Modelo productivo para el **cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.)** en el departamento de Boyacá

Autores

Yeirme Yaneth Jaimes Suárez
Genaro Andrés Agudelo Castañeda
Eliana Yadira Báez Daza
Felipe Montealegre Bustos
Roberto Antonio Coronado
Gersaín Antonio Rengifo Estrada
Jairo Rojas Molina



El campo es de todos · Minagricultura · SGR · AGROSAVIA EDITORIAL
Siempre Santander Gobernación · Gobernación de Boyacá · Secretaría de Agricultura · Boyacá Avanza · Gobernación de Sucre · EPI · Sucre se reactiva

Modelo productivo para el **cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.)** en el departamento de Boyacá

Autores

Yeirme Yaneth Jaimes Suárez
Genaro Andrés Agudelo Castañeda
Eliana Yadira Báez Daza
Felipe Montealegre Bustos
Roberto Antonio Coronado
Gersaín Antonio Rengifo Estrada
Jairo Rojas Molina

AGROSAVIA
EDITORIAL

Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el departamento de Boyacá. / Yeirme Yaneth Jaimes Suárez [y otros seis] -- Mosquera, (Colombia) : AGROSAVIA, 2022.

216 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye tablas, fotos y referencias bibliográficas
ISBN: 978-958-740-558-3
ISBN e-Book: 978-958-740-559-0

1. *Theobroma cacao* 2. Productividad 3. Manejo del suelo 4. Comercio internacional 5. Medidas fitosanitarias 6. Genotipos 7. Cosecha 8. Indicadores económicos 9. Boyacá (Colombia).

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura Agrovoc
Catalogación en la publicación – Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA
Centro de Investigación La Suiza. Kilómetro 32, vía al mar, vereda Galápagos, Ríonegro-Santander.
Código postal: 687511, Colombia.

Esta publicación es el resultado de los proyectos "Investigación, desarrollo e innovación de cacaos especiales bajo arreglos agroforestales (2015-2022) con BPIN 2013000100255;" "Recomendaciones técnicas de sistemas alternativos de producción intensiva y tradicionales de cacao con énfasis en arreglos agroforestales (SAF)" (2013-2017); "Estrategias de manejo integrado de las principales plagas y enfermedades del cultivo de cacao" (2013-2017); "Mejoramiento genético del cultivo de cacao mediante la selección varietal y propagación de genotipos sobresalientes, con participación comunitaria en fincas de agricultores en las principales regiones productoras de Colombia" (2008-2011); "Esquemas de fertilización convencional y orgánica para el sistema de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) y su efecto en el rendimiento y calidad del grano en las principales zonas productoras de Colombia" (2008-2011); "Sistema de producción de cacao bajo sistemas agroforestales como estrategia para la competitividad del cultivo en Colombia" (2008-2011); "Evaluación de clones de cacao regionales de alto rendimiento bajo nuevos arreglos forestales con maderas finas tropicales en zonas productoras de Colombia" (2008-2011); "Evaluación de biocontroladores y productos no convencionales para el control de la moniliasis" (2005-2008); "Evaluación de la respuesta a moniliasis de algunos clones universales y regionales de cacao" (2005-2008) y "Evaluación del potencial adaptativo y productivo de clones regionales promisorios de cacao en zonas productoras de Colombia" (2005- 2008), entre otros.

Colección Alianzas AGROSAVIA
Tipología: Modelo Productivo
Primera impresión: 500 ejemplares

https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Preparación editorial

Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co
Edición: Liliana Gaona García
Corrección de estilo: Andrés Castillo Brieva
Diseño: Mónica Cabiativa
Diagramación: Diego Abello Rico
Impresión: DGP Editores S.A.S.
Impreso en Bogotá, Colombia, julio de 2022
Printed in Bogotá

Citación sugerida: Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Montealegre Bustos, F., Coronado, R. A, Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. *Modelo productivo para el cultivo de cacao (Theobroma cacao L.) en el departamento de Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. https://doi.org/10.21930/agrosavia.model.7405590

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@agrosavia.co
www.agrosavia.co

Contenido

15 Los autores

19 Agradecimientos

21 Introducción

CAPÍTULO I. Cadena productiva del cacao-chocolate 23

CAPÍTULO II. Situación mundial del cacao 27

27 Producción

28 Moliendas

CAPÍTULO III. Situación nacional del cacao 31

31 Producción

35 Comercio internacional

CAPÍTULO IV. Descripción de la producción en Boyacá 37

38 Características naturales de las zonas productoras de cacao en el departamento de Boyacá

44 Características socioeconómicas

CAPÍTULO V. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo de cacao 47

47 Altitud

48 Relieve

48 Temperatura

48 Radiación solar

50 Vientos

51 Precipitaciones
52 Humedad relativa
53 Requerimiento edáfico

Capítulo VI. Taxonomía y material genético 57
57 Descripción taxonómica
58 Materiales genéticos
65 Métodos de propagación del material genético
67 Genotipos de cacao utilizados para la producción de patrones
71 Variedades de cacao utilizadas como copas productivas de *T. cacao*
74 Compatibilidad sexual

Capítulo VII. Manejo agronómico 81
81 Sistemas agroforestales con cacao en Boyacá
84 Investigación de AGROSAVIA en sistemas agroforestales
91 Establecimiento del cultivo
97 Sustratos esenciales para la producción de clones de cacao en etapa de vivero
100 Fertilización del sistema agroforestal con cacao

Capítulo VIII. Manejo fitosanitario 129
129 Monilia
134 Escoba de bruja
139 Mazorca negra
144 Mal del machete
148 Llaga estrellada
152 *Monalonion*
153 Carmenta negra

Capítulo IX. Modernización de plantaciones envejecidas 157
158 Renovación y rehabilitación de plantaciones

CAPÍTULO X. Beneficio y poscosecha del grano de cacao 171

171 Tipos de granos
173 El grano de cacao
174 Cosecha de mazorcas
177 Extracción del grano (desengrulle)
180 La fermentación
187 Secado
192 Almacenamiento
194 Requisitos para la comercialización de grano nacional

CAPÍTULO XI. Costos de producción 197

197 Costos de establecimiento de vivero y producción de material vegetal clonado de cacao
198 Costos de establecimiento del cultivo de cacao bajo arreglo agroforestal y de mantenimiento de 20 años

201 Referencias

Lista de figuras

Figura 1	Estructura de la cadena del cacao-chocolate	24
Figura 2	Representantes de la cadena productiva del cacao-chocolate en Colombia	24
Figura 3	Producción de grano de cacao seco de los once principales países productores (2020)	28
Figura 4	Comportamiento del precio promedio nacional e internacional del grano seco de cacao en los últimos once años	30
Figura 5	Área sembrada de cacao (*Theobroma cacao*) por departamento, 2020	32
Figura 6	Participación en la producción nacional de grano de cacao seco (%) de los principales departamentos productores de Colombia, 2019	33
Figura 7	Producción por departamentos de *T cacao*, 2017	34
Figura 8	Importaciones y exportaciones de granos de cacao seco realizadas en Colombia durante el periodo 2009-2019	35
Figura 9	Municipios y provincias con actividad cacaotera en el departamento de Boyacá	37
Figura 10	Municipios cacaoteros del departamento de Boyacá, 2021	38
Figura 11	Mapa de suelos del departamento de Boyacá	44
Figura 12	Distribución por regiones de los productores de grano de cacao en el departamento de Boyacá, 2020	45
Figura 13	Material genético de alto rendimiento	59

Figura 14 Viveros con técnicas de propagación especifica que garantizan el uso de materiales productivos 59

Figura 15 Técnicas de rehabilitación (injerto malayo) para cambio de copas 60

Figura 16 Banco de Germoplasma de cacao ubicado en el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA 61

Figura 17 Material genético liberado por AGROSAVIA en 2014 y 2017 63

Figura 18 Inclusión de materiales genéticos de AGROSAVIA en parcelas de productores de Boyacá 65

Figura 19 Método de propagación asexual del cacao mediante injertos 66

Figura 20 Plántulas de *Theobroma cacao* con injertación 67

Figura 21 Variedades de material vegetal empleadas como patronaje en la propagación vegetativa del cacao 69

Figura 22 Semilla de cacao adecuada para la obtención de patrones, pregerminada para la siembra en sustrato 69

Figura 23 Material vegetal de cacao apto para establecimiento definitivo en campo 70

Figura 24 Materiales genéticos de cacao liberados por AGROSAVIA para las subregiones Montaña Santandereana y Magdalena Medio 74

Figura 25 Flores de *T cacao* en edad de fecundación 75

Figura 26 Modelo de siembra de materiales de la serie TCS liberados en combinación 76

Figura 27 Modelo de siembra por franjas de materiales autocompatibles de la serie TCS (liberados por AGROSAVIA) con alto porcentaje de fecundación

Figura 28 Clones de cacao especiales TCS de AGROSAVIA, sembrados ordenadamente en sistemas agroforestales de maderas finas tropicales en Muzo (Boyacá) 79

Figura 29 Diseño de sistemas agroforestales con cacao validados en el departamento de Boyacá 85

Figura 30 Sistema agroforestal roble-cacao, finca México Lindo, vereda San Carlos, municipio San Luis de Gaceno (Boyacá), 2021 86

Figura 31 Sistema agroforestal abarco-cacao, finca México Lindo, vereda San Carlos, San Luis de Gaceno (Boyacá), 2021 87

Figura 32 Sistema agroforestal roble-cacao, finca El Pino, vereda El Toldo, Campohermoso (Boyacá), 2021 87

Figura 33 Sistema agroforestal abarco-cacao, finca El Cauchal, vereda Pan de Azúcar, Páez (Boyacá), 2021 88

Figura 34 Sistema agroforestal abarco-cacao, finca La Florida, vereda Agustín de Cerro, Santa María (Boyacá), 2021 88

Figura 35 Ejemplos de patrones de recorrido para toma de submuestras de suelo 105

Figura 36 Disponibilidad de nutrientes según pH o grado de acidez del suelo 109

Figura 37 Principales deficiencias de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Mn, S, Fe, Cu, Zn, B) en tejido vegetal del cultivo de cacao 127

Figura 38 Síntomas y signos de la monilia en frutos de cacao 131

Figura 39 Ciclo de la monilia 132

Figura 40 Síntoma de escoba de bruja: tejido vegetal necrosado en ramas terminales y laterales del dosel del árbol de cacao 135

Figura 41 Síntomas de *M perniciosa* en cacao 136

Figura 42 Ciclo de la escoba de bruja 137

Figura 43 Basidiocarpos de *M perniciosa* sobre tejido enfermo necrosado de planta de cacao 138

Figura 44 Síntomas y signos de mazorca negra en fruto de cacao 140

Figura 45 Síntomas de cánceres ocasionados por *Phytophthora* sp en tronco de árbol de cacao 141

Figura 46 Ciclo de la mazorca negra en frutos de cacao 142

Figura 47 Procedimiento para el manejo de cánceres de *Phytophthora* sp en árboles de cacao 144

Figura 48 Síntomas de clorosis ocasionada por el mal de machete 146

Figura 49 Ciclo del mal del machete en árboles de *T cacao* *147*

Figura 50 Síntomas y signos de la llaga estrellada en árboles de cacao 150

Figura 51 Insecto plaga del género *Monalonion* y daño que ocasiona 153

Figura 52 Daño ocasionado por larva de *Carmenta foraseminis* en frutos de cacao 155

Figura 53 Parcelas improductivas 158

Figura 54 Cambio de copas por nuevas variedades altamente productivas 159

Figura 55 Plano del diagnóstico elaborado por un productor en el que representa el estado de su parcela para ser rehabilitada con los siguientes signos de identificación: X = árboles de cacao para rehabilitar, O = espacios libres para resiembra, Δ = árboles maderables y otros 161

Figura 56 Poda fuerte para injertación 163

Figura 57 Siembra de colinos de plátano como sombrío temporal 163

Figura 58 Injerto malayo 165

Figura 59 Diagrama del proceso de injertación lateral "injerto malayo" para cambio de copa en la rehabilitación de plantaciones improductivas 165

Figura 60 Proceso de injertación 166

Figura 61 Cubrir el injerto con vinipel 167

Figura 62 Injerto en leño grueso de *T cacao* 168

Figura 63 Inducción para generar chupón 169

Figura 64 Eliminación de copa de material vegetal de cacao rehabilitado 170

Figura 65 Esquema de las partes del grano de cacao húmedo 173

Figura 66 Cambio en la coloración que indica madurez óptima 174
Figura 67 Mazorcas maduras aptas para cosecha 175
Figura 68 Cosecha de cacao con tijeras de mano 176
Figura 69 Mazorca de cacao con diferentes grados de madurez 176
Figura 70 Desengrulle de frutos de cacao cosechados en campo 177
Figura 71 Método para partir las mazorcas con mazo de madera 178
Figura 72 Etapas del proceso de desengrulle de frutos de cacao 178
Figura 73 Manejo de residuos sólidos y lixiviados de la recolección de granos de cacao 179
Figura 74 Fermentación de granos de cacao 179
Figura 75 Método para tapar la masa de forma adecuada 181
Figura 76 Cajón lineal de fermentación de granos de cacao 182
Figura 77 Cajón de fermentación de granos de cacao tipo escalera 183
Figura 78 Tipos de cajones en madera para la fermentación de granos de cacao 184
Figura 79 Fermentador en la modalidad de tambor rotatorio 185
Figura 80 Corte de grano para verificar estado de la fermentación en material acriollado 186
Figura 81 Remociones periódicas para un secado adecuado 188
Figura 82 Tipos de secador 188
Figura 83 Paseras de secado 189
Figura 84 Formas de verificar la humedad del grano de cacao 190
Figura 85 Cortes de granos de cacao con guillotina 191
Figura 86 Grano de cacao bien fermentado 191
Figura 87 Almacenamiento de grano seco de cacao 192
Figura 88 Descuento por humedad del grano seco en centro de acopio en San Pablo de Borbur (Boyacá) 193
Figura 89 Productos de agricultores y transformadores de cacao de Pauna y Borbur (Boyacá) 194



Lista de tablas

Tabla 1 Producción, moliendas e inventarios mundiales de grano de cacao seco en los cinco últimos años cacaoteros 29

Tabla 2 Caracterización socioeconómica del departamento de Boyacá 46

Tabla 3 Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de cacao en Colombia 55

Tabla 4 Taxonomía del cacao 58

Tabla 5 Principales características productivas de los materiales genéticos de cacao con registro ICA recomendados para Boyacá 72

Tabla 6 Matriz de compatibilidad entre materiales genéticos de AGROSAVIA 77

Tabla 7 Matriz de compatibilidad entre materiales universales y de Fedecacao 78

Tabla 8 Elementos químicos esenciales para el crecimiento y desarrollo de la mayoría de las plantas 94

Tabla 9 Descripción de las cantidades mínimas de nutrientes disponibles en la mayoría de los suelos cacaoteros de Colombia 96

Tabla 10 Niveles óptimos en las propiedades físicas y fisicoquímicas de un sustrato para la siembra de plántulas de cacao en vivero 99

Tabla 11 Ejemplo de etiqueta con la descripción de los principales datos que debe llevar la muestra que se envía el laboratorio de química de suelos 106

Tabla 12 Interpretación de la fertilidad de suelos cacaoteros de Colombia 107

Tabla 13 Rango para la interpretación del pH o grado de acidez de los suelos agrícolas 108

Tabla 14 Rangos óptimos de disponibilidad de nutrientes en suelos de acuerdo con el grado de acidez 110

Tabla 15 Cantidad estimada de nutrientes absorbidos por la planta de cacao en diferentes etapas de desarrollo 112

Tabla 16 Principales nutrientes removidos por tonelada de semilla y de cacota de cacao 113

Tabla 17 Extracción de nutrientes (kg/1000 kg de grano seco) en clones de cacao con aplicaciones de nitrógeno, fósforo y potasio 113

Tabla 18 Factores que promueven o limitan la disponibilidad del nitrógeno en el suelo y estrategias de manejo 114

Tabla 19 Factores que promueven o limitan la disponibilidad de fósforo y potasio en el suelo y estrategias de manejo 115

Tabla 20 Nitrógeno, fósforo y potasio: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso 119

Tabla 21 Calcio, magnesio y azufre: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso 121

Tabla 22 Hierro y cobre: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso 122

Tabla 23 Síntomas visuales de las principales deficiencias nutricionales en tejido vegetal y frutos 124

Tabla 24 Clasificación para determinar la eficiencia productiva de la plantación en general y la intervención de cada árbol 160

Tabla 25 Principales tipos de cacao 172

Tabla 26 Dimensiones de los cajones fermentadores individuales 182

Tabla 27 Clasificación del grano de cacao para comercialización nacional 195

Tabla 28 Tolerancias para el grano de cacao 195

Tabla 29 Costos de construcción y dotación de vivero y de producción de plántulas de cacao a precios de 2020 197

Tabla 30 Flujo de caja para el establecimiento de una hectárea de cacao bajo arreglo agroforestal a precios de 2020 199

Los autores

Yeirme Yaneth Jaimes Suárez
Correo: yjaimes@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7942-0598

Microbióloga con énfasis en alimentos de la Universidad de Pamplona, maestría en Biología Aplicada de la Universidad Militar Nueva Granada y doctorado en Agronomía Protección de Plantas de la Universidad Estatal Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Botucatu (São Paulo, Brasil). Trabaja como investigadora PhD en AGROSAVIA desde el 2008. Ha recibido entrenamiento en fitopatógenos del cacao, en el Centro de Investigación en Cacao (Ceplac), en Itabuna (Bahía, Brasil). En cacao, ha trabajado principalmente en el diseño de esquemas para el manejo de *Moniliophthora roreri* y *M. perniciosa*, y en la biología de poblaciones de estos patógenos y *Phytophthora* sp. y *Rosellinia* sp. Ha publicado artículos científicos en revistas indexadas sobre temas relacionados con el cultivo del cacao.

Genaro Andrés Agudelo Castañeda
Correo: gagudelo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-0469-1406

Ingeniero agrónomo, magíster en Fisiología Vegetal con énfasis en Ecofisiología de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja. Posee experiencia en la evaluación y selección de materiales genéticos de cacao adaptados a diferentes ambientes, en modelos agroforestales asociados a cacao con maderas finas tropicales, en manejo productivo del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales y en manejo de viveros y producción de material vegetal de siembra para el establecimiento de nuevos cultivos. Es autor de cuatro variedades de Cacao de Agrosavia TCS (Theobroma Corpoica La Suiza), ha publicado artículos científicos en revistas indexadas, manuales y escritos relacionados con el cultivo de Cacao. Actualmente, se desempeña como investigador máster vinculado a la Red de Cacao del Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA en Rionegro Santander.

Eliana Yadira Báez Daza
Correo: ebaez@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1059-1604

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Pamplona, magíster en Agroforestería Tropical con énfasis en Sistemas Agroforestales de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Bogotá. Cuenta con experiencia en manejo de recurso genético, en caracterización morfológica de materiales, en selección de materiales genéticos de cacao con requerimientos de producción, calidad y factores climáticos, en el manejo de cosecha y poscosecha de cacao, en modelos agroforestales asociados a cacao con maderas finas tropicales, y en el manejo productivo del cultivo de cacao bajo SAF. Es autora de dos variedades de Cacao de Agrosavia TCS (Theobroma Corpoica La Suiza) y ha publicado artículos científicos en revistas indexadas. Actualmente se desempeña como investigador máster vinculado a la red de cacao y al Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA en Rionegro Santander.

Felipe Montealegre Bustos
Correo: fmontealegre@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-7757-6508

Economista egresado de la Universidad del Tolima y Magíster en Economía de los Recursos Naturales y del Medio Ambiente de la Universidad de Concepción – Chile, cuenta con una sólida fundamentación teórico – práctica en investigación económica, especialmente en el área socioeconómica, economía ambiental, economía de recursos naturales y valoración económica. En Chile y Colombia se ha desempeñado como docente en varias universidades e investigador en proyectos financiados por entidades públicas y privadas de orden nacional e internacional. Desde el año 2018 hace parte del equipo de Investigadores de AGROSAVIA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria), en el Centro de Investigación La Suiza, en el cual hace parte de Red Cacao y participa en procesos de investigación relacionados con cultivos como cacao, frutales y agricultura familia.

Roberto Antonio Coronado Silva
Correo: rcoronado@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-4916-5813

Ingeniero agrónomo, máster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente; especialista en Manejo Biológico de Cultivos, con entrenamiento especializado en fitotecnia del tabaco negro. Investigador Master Asociado en AGROSAVIA en el área de mejoramiento genético y curaduría de bancos de germoplasma de cacao, caña y tabaco. Participo en el equipo obtentor de las variedades de tabaco ICA TI 70, ICA Arsenal, ICA Sevita e ICA Corpoica Enciso. Publicaciones: El cultivo de tabaco negro en Colombia para la producción de capas (2003); Mejoramiento genético de tabaco García por resistencia a Meloidogyne sp. (1996); Identification and Initial Growth of Forest Species Used for Curing Virginia Tobacco (2019); y Virginia 4-3-30: selección y evaluación de una nueva línea de tabaco para la zona productora de Santander Colombia (2007).

Gersaín Antonio Rengifo Estrada
Correo: grengifo@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8716-6040

Licenciado en ciencias naturales de la Universidad de Pamplona e ingeniero ambiental de la Universidad Francisco de Paula Santander de Ocaña (UFPSO) y maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Manejo de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia. Recibió la capacitación en sistemas agroforestales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Se ha desempeñado como profesor catedrático en la carrera de Tecnología Agropecuaria e Ingeniería Ambiental de la UFPSO. Cuenta con experiencia en investigación agropecuaria, orientada a la búsqueda del equilibrio entre la seguridad alimentaria, biodiversidad y manejo sostenible y sustentable de los recursos naturales, con énfasis en los sistemas productivos de pastos, plátano, yuca, maíz, agroecología (en manejo integrado de insectos plagas y fertilidad orgánica), hortalizas, agricultura específica por sitio, frutales de clima medio, cacao, en extensión y transferencia de tecnología; específicamente en fisiología del cultivo, manejo y conservación de suelos y aguas fertilidad, evaluación de metales pesados en suelos cacaoteros y determinación de servicios ecosistémicos de los SAF (biodiversidad y carbono entre otros).

Jairo Rojas Molina
Correo: jrojas@agrosavia.co
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3929-9487

Ingeniero agrónomo de la Universidad del Tolima con maestría en Agroforestería del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), de Costa Rica. Trabaja como investigador máster asociado en AGROSAVIA desde 2007. Ha recibido entrenamiento en investigación en cacao, específicamente en sistemas agroforestales, en el Centro de Investigación en Cacao (Ceplac), en el estado de Bahía, Brasil. Se ha desempeñado como profesor en las maestrías de Sistemas Agroforestales en la Universidad de la Amazonia, la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA) y la Universidad de los Llanos. En cacao, ha trabajado con diseños de sistemas agroforestales, fertilidad en suelos y determinación de servicios ecosistémicos para los sistemas agroforestales (carbono, biodiversidad, etc.). Participó en la construcción del Modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) para el departamento del Huila y publicado en indexadas sobre temas relacionados al cultivo de cacao.

Agradecimientos

En el marco de desarrollo del proyecto “Investigación, desarrollo e innovación de cacaos especiales bajo sistemas agroforestales (2015-2022)” con BPIN 2013000100255, financiado con recursos del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación (FCTeI) del Sistema General de Regalías (SGR), se genera este documento. Desde la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, como entidad ejecutora, se extienden los más sinceros agradecimientos a las gobernaciones de Boyacá, Sucre y Santander por la confianza depositada.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a las instituciones aliadas que suscribieron con AGROSAVIA convenios para la ejecución de las actividades del proyecto en los departamentos de Boyacá, Santander y Sucre. Expresamos especial gratitud a la Universidad Industrial de Santander (UIS), a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), a la Universidad de Sucre, a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), a la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao), a la Cooperativa Ecocacao. Igualmente, extendemos un agradecimiento especial a los cacaocultores de los departamentos mencionados, quienes se vincularon al proyecto a través de la firma de acuerdos y nos permitieron validar en sus cultivos las recomendaciones de manejo.

Finalmente, los autores de este documento agradecen a los investigadores, profesionales de apoyo a la investigación, asistentes de investigación y personal del área administrativa del Centro de Investigación La Suiza y de la Sede Central de AGROSAVIA, quienes hicieron posible el desarrollo de las actividades de este proyecto y la consolidación del presente modelo productivo del cultivo de cacao para el departamento de Boyacá.



Introducción

Dentro de los sistemas productivos priorizados en Colombia se encuentra el cultivo del cacao. Esto se ve reflejado en el incremento del área sembrada entre los años 2010 y 2020, cuando el país pasó de 96.000 a 189.185 hectáreas. Este sector productivo beneficia aproximadamente a 65.341 familias y genera alrededor de 167.000 empleos, lo que corresponde a un 55,57 % de empleos directos y a un 44,43 % de empleos indirectos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021). Boyacá se encuentra dentro de los departamentos productores de cacao del país, con cerca de 2.500 familias productoras distribuidas en 20 municipios. Este cultivo es una de las principales fuentes de ingresos para el sostenimiento de los productores del occidente y oriente de Boyacá (Duarte, 2021).

En Colombia, el cacao se considera social y económicamente importante. El 95 % de los cacaocultores son pequeños productores con áreas promedio de tres hectáreas y una economía campesina (MADR, 2018), en la que predominan la mano de obra familiar y la diversificación de productos (Espinal G. et al., 2005; Pettersson, 2016). En el país, este cultivo se fomenta como una alternativa productiva a cultivos ilícitos en áreas de conflicto social y con altos niveles de pobreza (MADR, 2018). Además, los productos derivados del grano del cacao forman parte de la dieta de los colombianos en mayor proporción que el café (García-Cáceres et al., 2014).

El cultivo de cacao también tiene una importancia ambiental. En Colombia se establece principalmente bajo sistema agroforestal (SAF), asociado sobre todo a especies maderables o frutales (Álvarez-Carrillo et al., 2012). Como parte del concepto de SAF, se cultiva con o sin animales de pastoreo. Entre los beneficios que ofrecen estos sistemas se encuentran los microclimas favorables, la reducción de la erosión, la mejora de la biodiversidad, el incremento de la calidad del agua, la fertilidad del suelo. Los SAF se consideran una solución sostenible y una estrategia de mitigación de los efectos del cambio climático (Tomar et al., 2021).

En los últimos trece años, el departamento de Boyacá ha comenzado a incursionar en el cultivo de cacao y en la actualidad este presenta un rendimiento promedio de 470 kg de cacao seco/ha (MADR, 2021). Igualmente, el cultivo ha sido utilizado en la región como principal medio de sustitución de cultivos ilícitos, con lo cual se ha convertido en una nueva fuente de ingresos para los agricultores del oriente y occidente de Boyacá.

La mayor parte de la producción de Boyacá se comercializa en grano, negocio que está liderado por empresas nacionales como Casa Luker y la Compañía Nacional de Chocolates (CNCH) y por algunas empresas regionales. Sin embargo, las tendencias internacionales apuntan a otros mercados, como por ejemplo el de los "cacaos especiales" (Ríos et al., 2017), que incluyen cacaos de orígenes únicos, cacaos diferenciados por toques organolépticos, cacaos orgánicos o cacaos certificados (Fairtrade, Agricultura Sostenible, UTZ o Rainforest Alliance). Mercados diferenciados como estos plantean la necesidad de un cambio para adoptar estándares de producción más rigurosos y alcanzar una mayor calidad en la transformación del producto.

El modelo productivo que se ofrece en el presente documento resulta importante, dado el panorama descrito hasta aquí. El documento muestra la actualidad del sector cacaotero en Boyacá y brinda información sobre la oferta tecnológica que la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA y otros actores han desarrollado para el departamento. El fin de esta oferta es resolver las brechas tecnológicas y dar apoyo a los servicios de capacitación y asistencia técnica de las entidades que atienden a los productores, en aspectos sensibles de la productividad como obtención de material vegetal de calidad, manejo de enfermedades y plagas, establecimiento de plantaciones, procesos de beneficios y transformación del producto.

CAPÍTULO I.

Cadena productiva del cacao-chocolate

En Colombia, la cadena productiva se define como un conjunto de actividades que se articulan técnica y económicamente según la Ley 811 de 2003. La creación de la cadena productiva del cacao-chocolate y la conformación del Consejo Nacional Cacaotero (CNC) se dieron mediante el "Acuerdo sectorial de competitividad de la cadena del cacao y su agroindustria", celebrado en octubre de 2001. En este acuerdo se identificaron los siguientes actores como componentes de la cadena productiva del cacao-chocolate: 1) los productores, que son el eslabón primario y que en el CNC actualmente se encuentran representados por la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao), la Cooperativa Multiactiva de Cacaoteros del Departamento de Arauca (Coopcacao), y la Asociación de Cacaocultores del Tolima (Asocatol); 2) los acopiadores (incluidos los regionales), comisionistas y exportadores; y 3) los comercializadores internos y externos del grano de cacao, que son el eslabón terciario y que en el CNC se encuentran representados por la CNCH, Casa Luker, Colombina S. A. y Chocolate Gironés (figura 1) (Espinal et al., 2005).

La articulación de los tres eslabones de la cadena cacao-chocolate la llevan a cabo los entes del Gobierno, que se encuentran representados en el CNC por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT), entidades que se articulan con el sector de investigación, representado por AGROSAVIA, y el sector privado, en el que se encuentran Fedecacao, Coopcacao, Asocatol, CNCH, Casa Luker, Colombina, Chocolate Gironés, Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y representantes de los comités regionales (figura 2) (MADR, 2021).

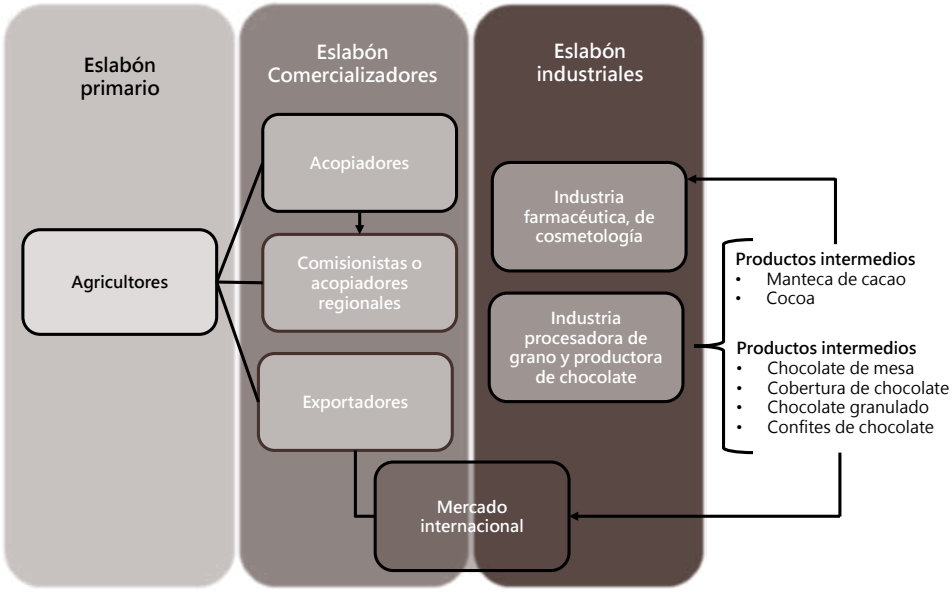


Figura 1.

Estructura de la cadena del cacao-chocolate.

Fuente: Espinal G. et al. (2005)



Figura 2.

Representantes de la cadena productiva del cacao-chocolate en Colombia.

Fuente: MADR (2021)

Fotos: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez y Silvia Juliana Flores

Si bien para el año 2020 en Colombia se lograron 63.400 toneladas de grano de cacao seco (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022), se proyecta para el año 2030 una producción de 160.000 toneladas. Con esto se busca abastecer el mercado nacional y a su vez tener excedentes de exportación para mercados especializados y diferenciados. Para esto, los diferentes actores en el CNC de la cadena productiva del cacao-chocolate trabajan en la generación de instrumentos y estrategias que permitan afrontar los diferentes desafíos que tiene la cacaocultura colombiana. Así, el Gobierno nacional busca que el país tenga sistemas productivos con cacao sostenibles y competitivos, así como granos de cacao que cumplan los requerimientos de los diferentes mercados, con lo cual se conseguiría la apertura de nuevos mercados para el grano y para los productos transformados.



Capítulo II.

Situación mundial del cacao

En 2020, existían en el mundo aproximadamente 12,32 millones de hectáreas de cacao, de las cuales 7,75 millones se encontraban en África occidental, 1,83 millones en Asia y Oceanía y 1,84 millones en Latinoamérica. En esta última región, Brasil tenía la mayor área, con 588.501 hectáreas, equivalentes a 31,67 %. Lo seguían Ecuador, Colombia y Perú, con 525.435, 188.371 y 170.954 hectáreas respectivamente, correspondientes a 31,67 %, 10,14 % y 9,20 % del área sembrada en Latinoamérica (FAO, 2022).

Producción

En el año cacaotero 2019-2020, la producción mundial fue de 4.735 millones de toneladas, y se estima que aumentará 117.000 toneladas en el año 2020-2021. África es la región que más aporta a la producción mundial de grano de cacao seco (74,9 %), seguida de América Latina (19,1 %) y Asia y Oceanía (6,0 %) (International Cocoa Organization [ICCO], 2022a). Costa de Marfil es el primer país productor de cacao, con 2,20 millones de toneladas (38,21 % de la producción mundial); seguido por Ghana, con 800.000 toneladas (13,90 %), e Indonesia, con 739.483 toneladas (12,85%) (figura 3) (FAO, 2022).

Ecuador, además de ser el primer productor de Latinoamérica, en el año 2020 se ubicó en el quinto lugar a nivel global, con 327.903 toneladas, equivalentes a 5,70 % de la producción mundial y 32,89 % de la producción de grano de cacao seco en la región. El séptimo y el noveno lugar a nivel mundial o el segundo y tercer lugar a nivel regional lo ocupan respectivamente Brasil y Perú, con 269.731 y 160.289 toneladas, correspondientes a 4,69 % y 2,78 % de la producción mundial y 27,05 % y 16,08 % de la producción regional. En 2020, Colombia ocupaba el onceavo

lugar en el mundo y el quinto en Latinoamérica, con 1,10 % de la producción mundial y 6,36 % de la producción regional (figura 3) (FAO, 2022).

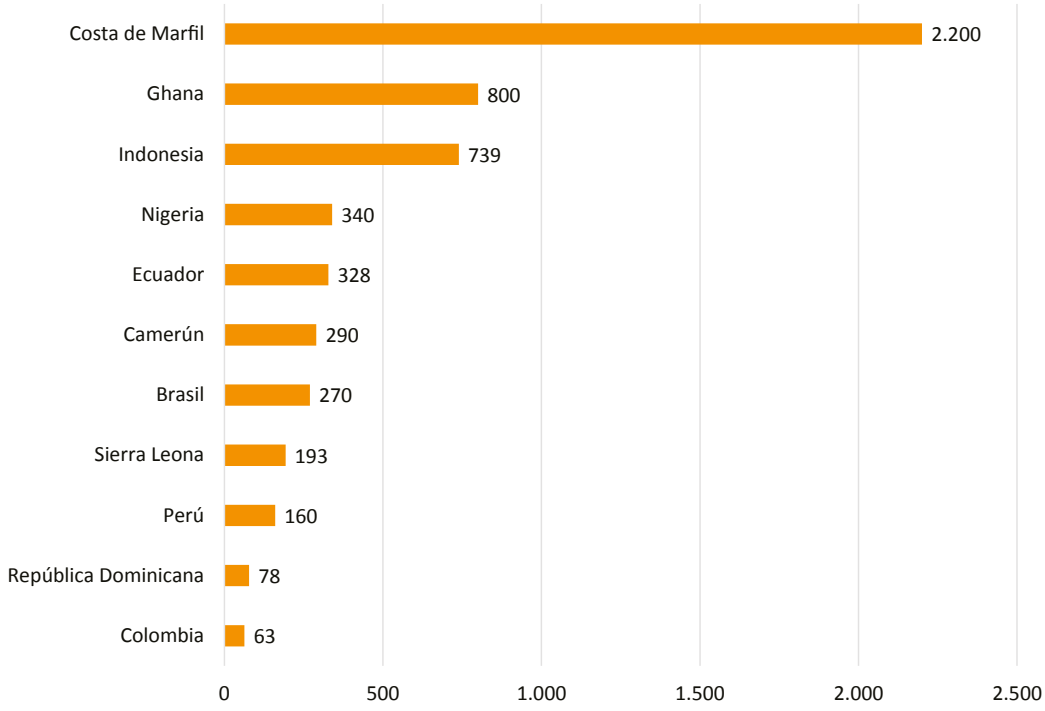


Figura 3.

Producción de grano de cacao seco de los once principales países productores (2020).

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022)

Moliendas

Para el año cacaotero 2020-2021, se estimó un crecimiento de 5,4 % en las moliendas mundiales de grano de cacao seco con respecto a años anteriores (tabla 1) (ICCO, 2022b). Ese mismo periodo las moliendas se estimaron en cerca de 4,96 millones de toneladas, con un crecimiento en las diferentes regiones del mundo. Latinoamérica y el Caribe reportaron el mayor crecimiento, con un incremento de 0,6 % (81.000 toneladas), seguidas de Asia y Oceanía, con 0,2 %. En lo que respecta al año cacaotero 2021-2022, se proyecta un total de moliendas de aproximadamente 5,09

millones de toneladas (2,6 % más con respecto al año anterior) (ICCO, 2022b), y una ligera reducción de la producción mundial de grano de cacao seco (5,2 %) (ICCO, 2022a).

Los incrementos en la producción y en las moliendas durante el año cacaotero 2016-2017 repercutieron en el precio internacional, que bajó en el periodo 2017-2019 y que en promedio fue de USD 2.221,2/t. Los precios internacionales de 2017 fueron los más bajos de los últimos diez años, y desde febrero de 2018 se viene presentando un leve incremento del precio del grano. El precio promedio entre enero de 2018 y marzo de 2020 fue de USD 2.343,4/t, con los precios más altos en enero y febrero de 2020 (USD 2.603,1 y USD 2.716,2/t respectivamente) (figura 4) (ICCO, 2022b). En cuanto a inventarios, se presentó un incremento aproximado de 36.000 toneladas entre 2017-2018 y 2018-2019, ya que se pasó de 1.723.000 a 1.759.000 toneladas de grano seco (tabla 1). Este leve incremento de los inventarios provocó un aumento de los precios desde marzo de 2018 hasta marzo de 2020, los cuales oscilaron entre USD 2.134,2 y USD 2.716,2/t (figura 4).

Tabla 1. Producción, moliendas e inventarios mundiales de grano de cacao seco en los cinco últimos años cacaoteros

Año cacaotero	Producción	Moliendas	Inventarios
	(miles de toneladas [t])		
2014-2015	4.252	4.152	1.600
2015-2016	3.994	4.127	1.427
2016-2017	4.768	4.394	1.753
2017-2018	4.646	4.585	1.769
2018-2019	4.784	4.784	1.731
2019-2020	4.735	4.706	1.713
2020-2021	5.226	4.959	1.928

Fuente: International Cocoa Organization [ICCO] (2022a, 2022b, 2022d)

El comportamiento del precio internacional incidió en Colombia. El precio en el país presentó sus registros más altos entre septiembre de 2015 y octubre de 2016, con un promedio de COP 8.082/kg de grano seco, y cayó a partir del mes de noviembre de 2016 hasta llegar a COP 4.718/kg

en febrero de 2018 (figura 4). Al igual que el precio internacional, el nacional se recuperó a partir de ese momento hasta alcanzar un registro promedio de COP 8.419, el mayor de los últimos cinco años (MADR, 2022).

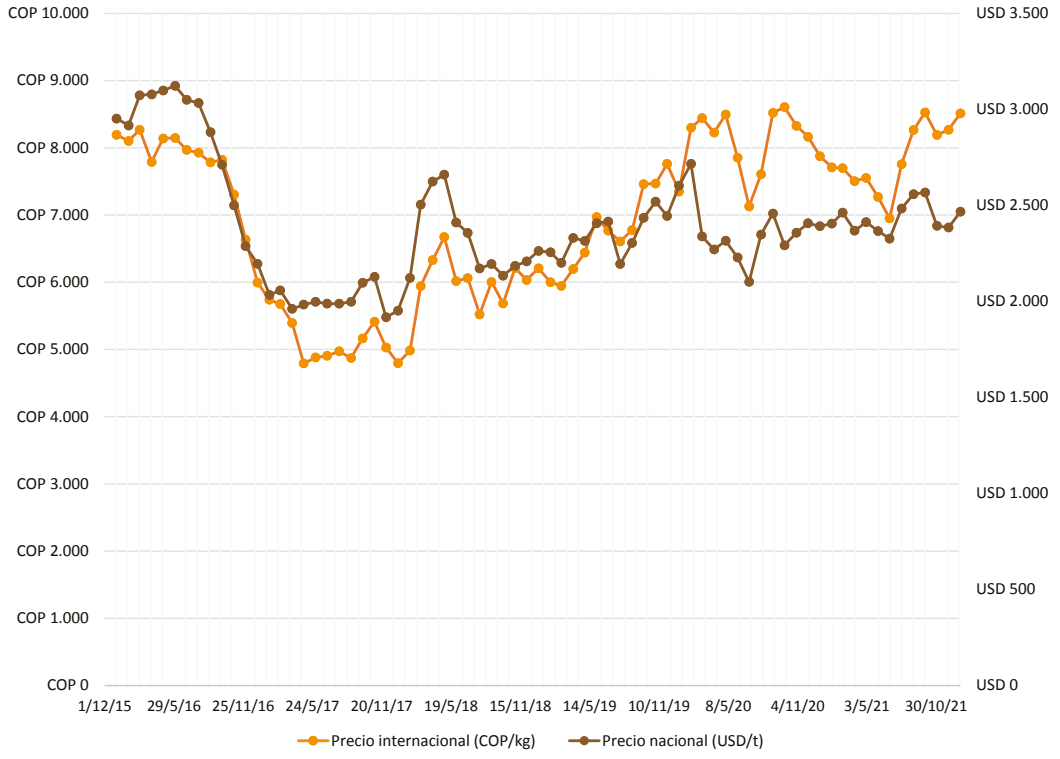


Figura 4.

Comportamiento del precio promedio nacional e internacional del grano seco de cacao en los últimos seis años.

Fuente: Elaboración propia con base en datos de ICCO (2021d) y MADR (2021)

Capítulo III.

Situación nacional del cacao

Al finalizar el año 2020, Colombia tenía un área aproximada de 183.741 hectáreas establecidas con cultivo de cacao (FAO, 2022). De acuerdo con el crecimiento promedio anual de área sembrada (3 %), se proyectó que para el año 2021 el país llegaría a tener cerca de 193.953 hectáreas. El departamento de Boyacá tiene un aproximado de 4.537 hectáreas sembradas de cacao, lo que corresponde a 2,47 % del área sembrada en todo el país (figura 5) (MADR, 2022).

Producción

En los últimos años, la producción del grano de cacao seco en el país registró un incremento, ya que pasó de 46.700 toneladas en 2013 a 69.101 en 2021, lo que significó un aumento de 22.401 toneladas. El departamento de Santander es el principal productor del país, con una participación de 40,57 % en el total de la producción nacional (figuras 6 y 7), correspondiente a 28.037 toneladas (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2022). Los departamentos que le siguen en importancia son Antioquia, Arauca, Huila y Tolima, con participaciones en la producción de 8,8 %, 7,6 %, 6,8 % y 6,6 % respectivamente (figura 6). En conjunto, estos cinco departamentos producen 71,9 % del grano de cacao seco en el país. Los rendimientos se mantienen en un promedio de 450 kg/ha, pese a las nuevas áreas establecidas con materiales clonados (MADR, 2022).

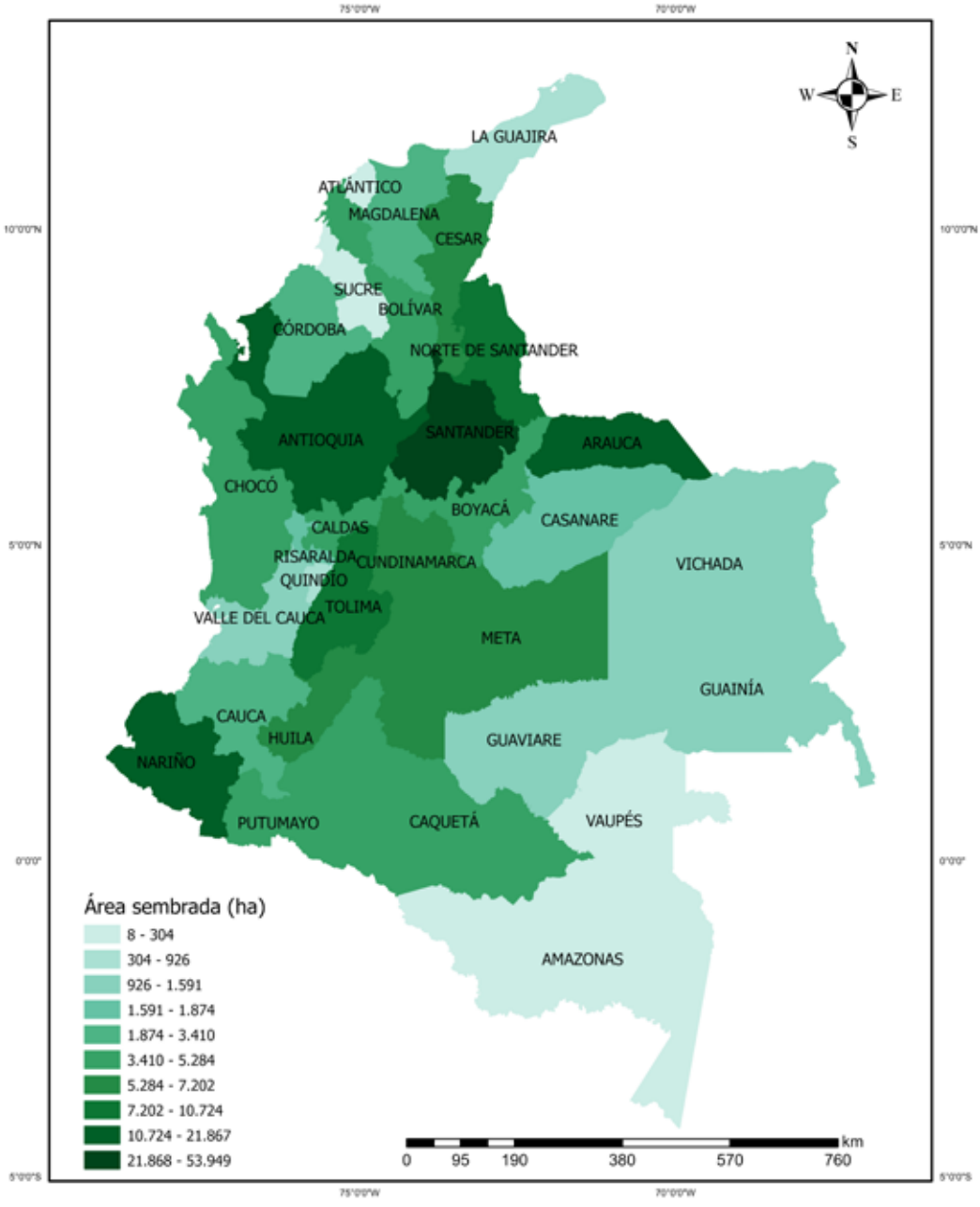


Figura 5.

Área sembrada de cacao (*Theobroma cacao*) por departamento, 2020.

Fuente: Elaborado por Alexandra Estefanía Fajardo Rojas con base en MADR (2022)

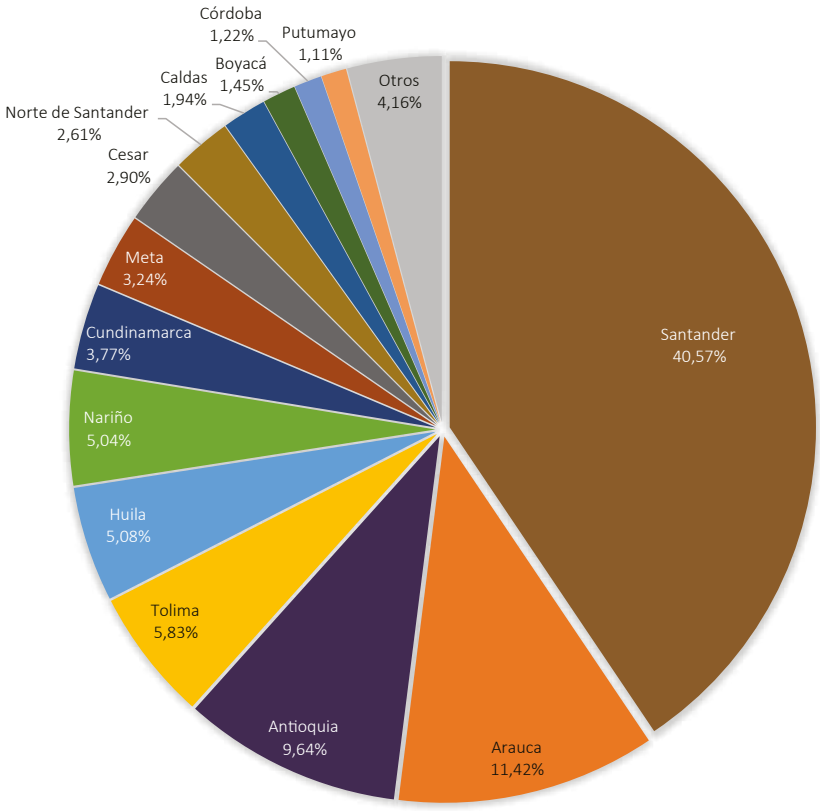


Figura 6.

Participación en la producción nacional de grano de cacao seco (%) de los principales departamentos productores de Colombia, 2019.

Fuente: Elaboración propia con base en Fedecacao (2022)

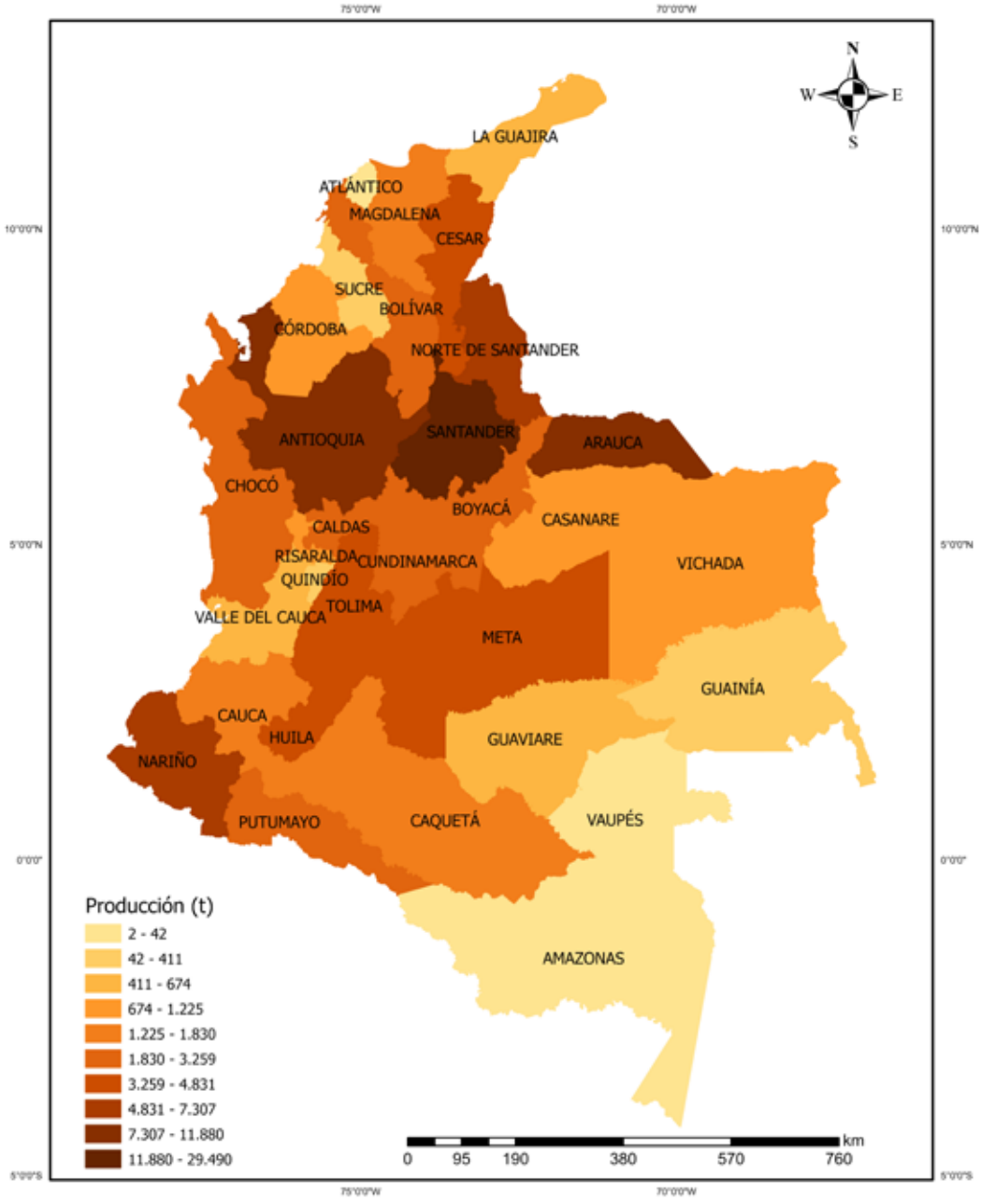


Figura 7.

Producción por departamentos de *T. cacao*, 2017.

Fuente: Elaborado por Alexandra Estefanía Fajardo Rojas con base en MADR (2022)

Comercio internacional

Durante los últimos años se viene presentando un continuo incremento de la producción de grano de cacao seco en Colombia, lo cual ha permitido aumentar la cantidad de grano exportado, y así mismo disminuir la cantidad de grano importado para satisfacer las necesidades de la industria local (figura 8). En el año 2020 se incrementaron las exportaciones en 4.092 toneladas de cacao en grano frente al año 2018. México fue el principal destino de las exportaciones colombianas de granos de cacao seco durante 2020, con una contribución al mercado de 79,85 % y una venta total de 8.902 toneladas. Otros destinos de las exportaciones colombianas durante este periodo fueron Italia, Bélgica, Países Bajos, Argentina, Estados Unidos y Malasia. En total se exportaron 11.148 toneladas a 28 países y se tuvo un ingreso aproximado de USD 29 millones. Este incremento de las exportaciones se atribuye al posicionamiento que ha venido logrando el grano colombiano como cacao fino por sus características de aroma y sabor, al aumento de la producción nacional, a mejores precios internacionales y a la apertura de nuevos mercados (MADR, 2021).

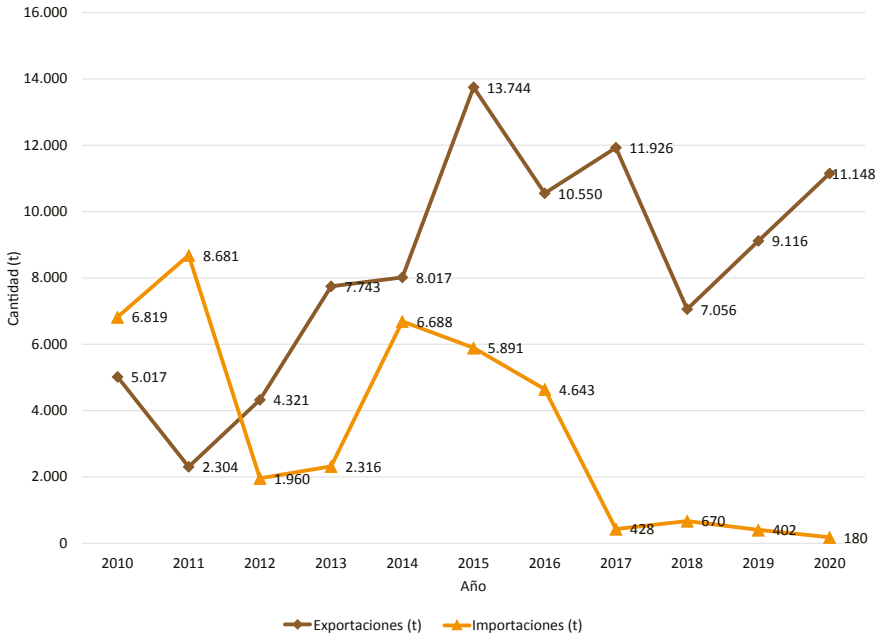


Figura 8.

Importaciones y exportaciones de granos de cacao seco realizadas en Colombia durante el periodo 2009-2020.

Fuente: MADR (2021)



Capítulo IV.

Descripción de la producción en Boyacá

El departamento de Boyacá se ubica en el doceavo puesto como productor nacional de grano de cacao, con 1.005 toneladas y 1,45 % de la producción nacional (MADR, 2022). El cacao se produce en 21 municipios del departamento, aunque 83,21 % del área sembrada y 87,76 % de la producción de grano de cacao seco se concentra actualmente en los municipios de Quípama, Maripí, Pauna, Otanche, Muzo, San Pablo de Borbur y Coper en la provincia de Occidente o región natural Valle del río Magdalena. Con menos área sembrada y menor producción de grano seco se encuentran el municipio de Puerto Boyacá y los de las provincias de Lengupá y Neira, ubicadas en la región natural Piedemonte de los Llanos Orientales, donde la cacaocultura ha tomando importancia en tiempos recientes (figuras 9 y 10).

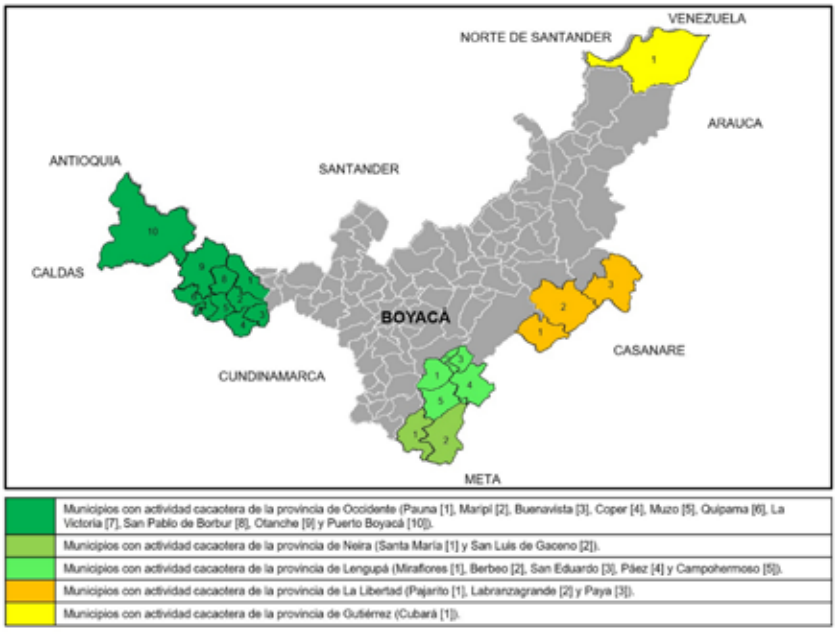


Figura 9.

Municipios y provincias con actividad cacaotera en el departamento de Boyacá.

Fuente: Elaboración propia a partir de mapa base de OCHA Services (2022)

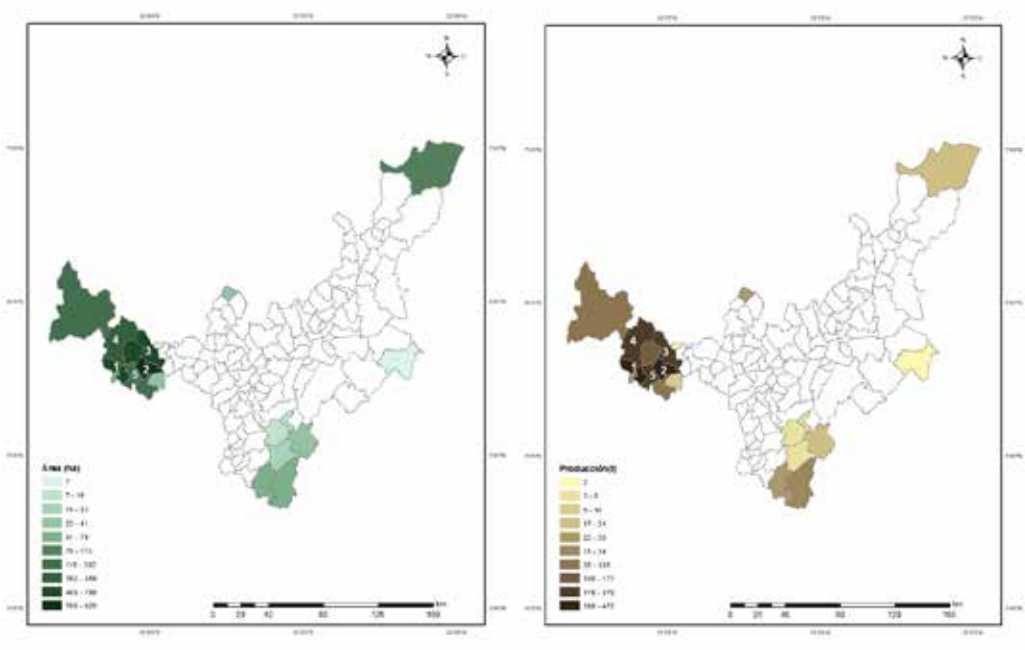


Figura 10.

Municipios cacaoteros del departamento de Boyacá, 2021. a. Área sembrada en hectáreas; b. Producción en toneladas.

Nota: Los números dentro de los mapas identifican los cinco municipios con mayor producción de granos de cacao seco de mayor a menor: 1) Maripí; 2) San Pablo de Borbur; 3) Pauna; 4) Quípama; 5) Otanche.

Fuente: Elaborado por Alexandra Estefanía Fajardo Rojas con base en MADR (2022)

Características naturales de las zonas productoras de cacao en el departamento de Boyacá

La mayor área cacaotera del departamento de Boyacá se encuentra en la provincia de Occidente, ubicada en la subregión Vertiente Occidental Andina, región natural Valle del río Magdalena. Con menor área se encuentran las provincias de Lengupá y Neira, localizadas en la subregión Valle de Lengupá, región natural Piedemonte de los Llanos Orientales. Las dos subregiones se caracterizan por el predominio de un clima cálido húmedo, apto para el cultivo del cacao.

Clima

Las áreas cacaoteras del departamento de Boyacá se ubican principalmente en los valles de la zona andina marginal baja y en la parte del piedemonte llanero que integra la región de la Orinoquía. En estas áreas, la precipitación promedio anual fluctúa entre 1.000 y 3.200 mm/año, la temperatura entre 21,7 y 30 °C, y la humedad relativa entre 80 y 90 %. Las regiones productoras de este departamento climatológicamente corresponden a las formaciones bosque húmedo tropical (bh-T) y muy húmedo tropical (bmh-T) (Gobernación de Boyacá, 2012).

El clima en la región Valle del río Magdalena es cálido y la humedad relativa varía de media a alta, con paisajes planos y ondulados, y en ellos se encuentran los municipios de Puerto Boyacá y Otanche. La zona correspondiente a la Montaña Santandereana está ubicada entre los 300 y 2.000 m s. n. m., con precipitaciones que oscilan entre los 1.900 y 2.500 mm/año. El clima predominante en esta región varía de cálido a cálido medio con alta humedad relativa, con pendientes de fuertes a moderadas, y en ella se ubican los municipios de La Victoria, Quípama, Muzo, Coper, Buenavista, San Pablo de Borbur, Pauna, Briceño y Tununguá. El régimen de lluvias para estas dos regiones es bimodal. Las precipitaciones inician en los meses de marzo y abril durante el primer semestre del año y en septiembre y octubre durante el segundo semestre (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] & Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC], 2005).

La zona del piedemonte llanero está ubicada entre los 500 y 1.300 m s. n. m. Su clima predominante es de cálido a cálido medio muy húmedo y presenta un relieve fuertemente ondulado. Allí se encuentran los municipios de San Luis de Gaceno, Santa María, Pajarito, Paya y Labranzagrande. La zona montañosa de oriente y Lengupá se ubica entre los 800 y 3.800 m s. n. m., su clima varía de cálido húmedo a muy frío, y presenta una topografía ondulada. Los municipios de esta región aptos para el cultivo de cacao son Miraflores, Páez y Campohermoso. Las precipitaciones de estas regiones superan los 3.000 mm/año y se distribuyen en un régimen monomodal. Las lluvias empiezan en los meses de marzo y abril y se extienden hasta noviembre y comienzos de diciembre. Existe un periodo de verano fuerte que se prolonga desde diciembre hasta finales de marzo (IGAC & UPTC, 2005).

Las regiones de Boyacá donde se desarrolla la actividad cacaotera presentan dos pisos térmicos. El piso cálido se ubica entre el nivel del mar y los 1.000 m s. n. m., su temperatura media anual supera los 24 °C y representa 16 % del territorio departamental. El piso térmico templado se ubica entre los 1.000 y 2.000 m s. n. m., sus temperaturas medias anuales oscilan entre 18 y 24 °C y representa 20 % del territorio de Boyacá. El cultivo de cacao se desarrolla en ambos pisos térmicos con una mayor concentración en la provincia de Occidente. El tope de altitud del cultivo son los 1.200 m s. n. m., que es el límite para lograr un crecimiento y un desarrollo adecuados de las plantas y obtener buenos rendimientos productivos.

Zonas agroecológicas

El área cacaotera del departamento de Boyacá se localiza en diferentes zonas agroecológicas, identificadas como MPA, MPE, MPX, MVA, MVX, LVD, LVG y VVB. La zona MPA corresponde a montañas estructurales erosionables con presencia de crestas, bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), rango de altitud de 1.000 a 2.000 m s. n. m., temperatura media anual de 20 °C, precipitaciones de 2.000 a 4.000 mm/año, topografía moderadamente escarpada con procesos de movimiento en masa debidos a deslizamientos, textura de suelos franco-arcillosa, buen drenaje, saturación de aluminio superior a 65 %, pH del suelo de <4,5 a 5,5, pendientes de 50 a 75 % y fertilidad natural baja (IGAC & UPTC, 2005).

La zona MPE corresponde a montañas estructurales erosionables con presencia de lomas, bosques muy húmedos premontanos (bmh-PM) y húmedos premontanos (bh-PM), rango de altitud de 1.000 a 2.000 m s. n. m., temperatura media anual de 20 °C, precipitaciones inferiores a 2.000 mm/año, topografía moderadamente escarpada con procesos de movimiento en masa debidos a deslizamientos, pendientes mayores a 50 %, textura de suelos arcillosa-gravillosa, poca profundidad efectiva, saturación de aluminio de 60 a 80 %, pH del suelo de <4,5 (extremadamente ácido) y fertilidad natural baja. La zona MPX es de montañas estructurales erosionables fuertemente onduladas, con bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), rango de altitud de 1.000 a 2.000 m s. n. m., temperatura media anual de 20 °C, precipitaciones de 3.000 mm/año, topografía fuertemente ondulada con pendientes de

12 a 50 %, textura de suelos entre franco-arcillo, limosa y franco-arcillo-arenosa, buena profundidad efectiva, saturación de aluminio superior a 45 %, suelos de fuertemente a moderadamente ácidos (pH de 5,1 a 6,0) y moderadamente fértiles (IGAC & UPTC, 2005).

La zona MVA corresponde a montañas estructurales erosionables moderadamente escarpadas con presencia de vigas y crestas, bosque húmedo tropical (bh-T), rango de altitud de 300 a 1.000 m s. n. m., temperatura media anual de 26 °C, precipitaciones entre 2.000 y 4.000 mm/año, topografía moderadamente escarpada con pendientes superiores a 50 %, textura de suelos franco-arcillosa, buena profundidad efectiva, saturación de aluminio superior a 85 %, suelos fuertemente ácidos (pH de 5,1 a 5,5) y fertilidad natural baja. La zona MVX corresponde a montañas estructurales erosionables con presencia de lomas y cuestas, bosque húmedo tropical (bh-T), entre 400 y 1.000 m s. n. m., temperatura media anual de 26 °C, precipitación promedio anual de 2.000 mm, topografía de moderada a fuertemente quebrada con presencia de pedregosidad superficial y pendientes inferiores a 50 %, textura de suelos franco-arcillosa-gravillosa y franco-arcillo-arenosa, moderadamente profundos y bien drenados, saturación de aluminio superior a 50 %, fuertemente ácidos (pH de 5,1 a 5,5) y fertilidad natural moderada (IGAC & UPTC, 2005).

Las zonas LVD y LVG corresponden a suelos de lomerío y valles, con bosque húmedo tropical (bh-T), 200 m s. n. m., temperatura media anual de 26 °C, precipitaciones de 2.000 a 4.000 mm/año, topografía moderadamente ondulada con pendientes entre 25 y 50 %, suelos de textura franco-arcillosa-arenosa, franco-arcillosa y franco-arenosa, moderadamente profundos y bien drenados, saturación de aluminio superior a 50 %, de fuertemente a muy fuertemente ácidos (pH de 4,6 a 5,5) y fertilidad natural de muy baja a moderadamente baja. Finalmente, la zona VVB corresponde a valles aluviales planos y planos inundables, con bosque húmedo tropical (bh-T), por debajo de los 180 m s. n. m., temperatura media anual de 26 °C, precipitaciones entre 2.000 y 4.000 mm/año, topografía plana con pendientes de 1 a 3 %, suelos de textura franco-arenosa-arcillosa, franco-arenosa y arcillo-arenosa, moderadamente profundos e imperfectamente drenados, saturación de aluminio inferior a 50 %, de moderadamente a ligeramente ácidos (pH de 5,6 a 6,5) y fertilidad natural de alta a moderada (IGAC & UPTC, 2005).

Las áreas cacaoteras del departamento de Boyacá se encuentran en un rango de altura de 300 a 1.200 m s. n. m. (Servicio Geológico Nacional, 2013). En estas áreas predomina una topografía entre moderada y fuertemente quebrada, con pendientes inferiores a 50 %. La vegetación boscosa de estas zonas fue talada y reemplazada por pastos y en menor proporción por rastrojos, y en ellas predominan cultivos de café, cacao, yuca, cítricos y caña (Gómez et al., 2005). Los suelos de los municipios cacaoteros de este departamento se caracterizan por tener una pedogénesis o evolución del suelo de baja a mediana (figura 11). El material parental de estos suelos cacaoteros proviene de la meteorización de formaciones ígneas, metamórficas y sedimentarias (estas últimas tienen mayor influencia en su formación). En términos generales, estos suelos se encuentran constituidos por rocas clásticas arenosas y clásticas arcillo-limosas (Servicio Geológico Colombiano, 2013).

Los suelos de los municipios cacaoteros de la provincia de Occidente del departamento de Boyacá tienen rocas sedimentarias del tipo lutitas y lodolitas, con tamaños de grano de <1/16 mm, y del tipo areniscas, con tamaños de grano entre >1/16 mm y <2mm. Estos suelos tienen depósitos superficiales coluvio-aluviales y se encuentran conformados por las unidades cartográficas Typic Eutrudepts (40 %), Typic Dystrudepts (35 %), Typic Udorthents (25 %) y Humic Dystrudepts (25 %), con 10 % de inclusiones de Fluventic Dystrudepts, Lithic Hapludands y Typic Hapludands (Gómez Guzmán et al., 2005).

Los suelos de la región del occidente presentan diferenciación de horizontes debido a la tasa de mineralización de la materia orgánica, y a la liberación y oxidación del hierro, entre otros factores. La textura de estos suelos varía entre franco-arcillosa-gravillosa, franco-arcillo-limosa, y arcillosa-gravillosa. Son suelos de estructura blocosa moderada, moderadamente bien drenados, ligeramente superficiales, con un grado de acidez de fuerte a moderadamente ácido, limitados por saturación de aluminio, con una capacidad de intercambio catiónico de bases de moderada a alta, en su mayoría con fertilidad natural de baja a moderada, con pedregosidad en superficie, que se pueden incluir en los grados IV y VI según clase agroecológica (Gómez Guzmán et al., 2005).

Los suelos de los municipios cacaoteros de la región oriental del departamento de Boyacá se originan a partir de rocas sedimentarias de las cuencas del valle medio del río Magdalena, de la Sierra Nevada del Cocuy y del piedemonte llanero. Corresponden en parte a asociaciones cartográficas constituidas por Typic Udifluvents (40%), Fluvaquentic Endoaquepts (30%), Typic Udipsamments (20%) e inclusiones de Aquic Dystrudepts (10%.%), así como a Typic Dystrudepts (50%), Ruptic-Ultic Dystrudepts (40%) e inclusiones de Typic Placorthods (10%) (Gómez Guzmán et al., 2005).

En la región de oriente del departamento, los suelos se caracterizan por ser de color pardo amarillento a pardo oscuro, gris y pardo, con textura franco-arenosa, arenosa franca en profundidad, moderadamente profundos, con límites fluctuantes por nivel freático, bien drenados en algunos horizontes, con grado de acidez de muy fuerte a fuertemente ácido, saturación de aluminio, capacidad de intercambio catiónico baja, una saturación de bases de moderada a alta y una fertilidad natural moderada. Debido a su capacidad de uso, los suelos se pueden clasificar agroecológicamente entre los niveles V y VII. Con la adición de fertilizantes, estos suelos se pueden explotar con cultivos de tipo comercial (Gómez Guzmán et al., 2005).

En cuanto al municipio de Puerto Boyacá, los suelos se localizan en una terraza agradacional (terraza reciente), originada por depósitos superficiales clásticos hidrogénicos, mixtos aluviales, transportados por los ríos Magdalena, Ermitaño y Guaguaquí, con topografía de ligeramente plana a pendientes de 1 a 3%. Corresponden a las asociaciones cartográficas Fluventic Eutrudepts (40%), Typic Udorthents (30%), Typic Epiaquents (20%) e inclusiones de Chromic Hapluderts y Fibric Haplohemists (10%), así como a Oxic Dystrudepts e inclusiones de suelos Typic Eutrudepts (20%) (Gómez Guzmán et al., 2005).

Los suelos de Puerto Boyacá son de color gris oscuro, gris claro, con machas de rojizas a oscuras y amarillentas; texturas franco-arenosa-gravillosa, arcillo-arenosa y arenosa; profundos y limitados en partes por arcillas (contenidos de arcilla mayores a 60%), cascajos y arenas; moderadamente bien drenados con restricciones por nivel freático

fluctuante e imperfectamente drenados en algunas zonas; fuertemente ácidos, con saturación de aluminio y capacidad de intercambio catiónico de moderada a muy alta; saturación de bases altas, y fertilidad natural de moderada a alta. Estos suelos, por sus características, se pueden incluir en la clase IV por capacidad de uso. Con adición de fertilizantes y el establecimiento de obras de drenaje, pueden ser explotados con cultivos de maíz, yuca, plátano y cacao (Gómez Guzmán et al., 2005).

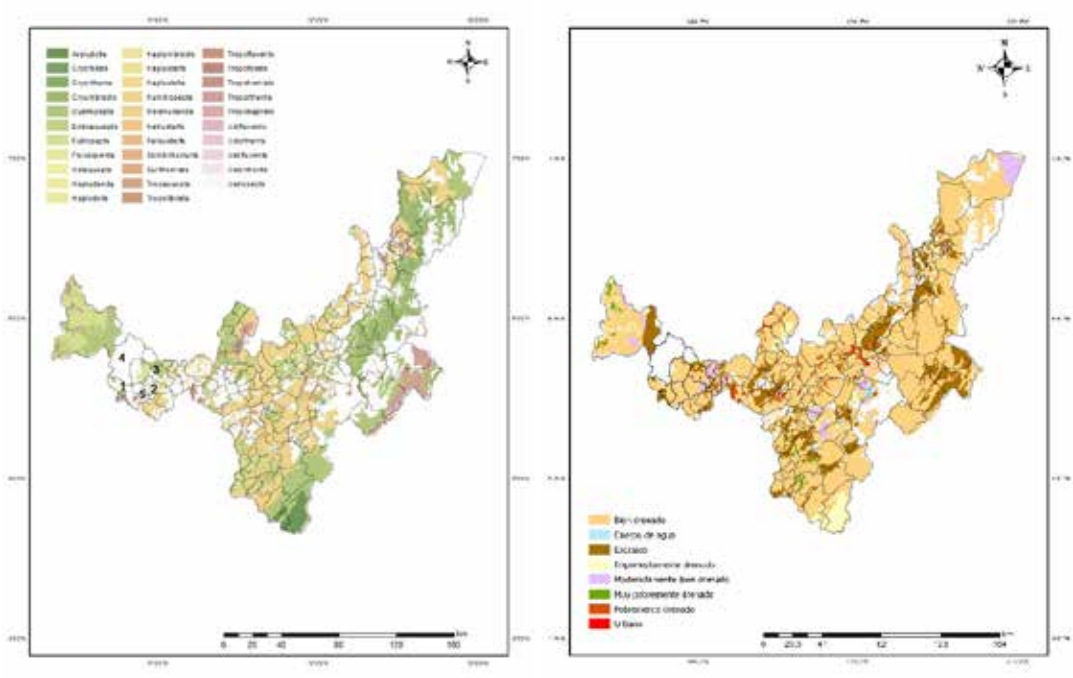


Figura 11.

Mapa de suelos del departamento de Boyacá. a. Clasificación taxonómica; b. Drenaje.

Nota: Los números dentro de los mapas identifican los cinco municipios con mayor producción de granos de cacao seco de mayor a menor: 1) Maripí, 2) San Pablo de Borbur, 3) Pauna, 4) Quípama, 5) Otanche.

Fuente: Elaborado por Alexandra Estefanía Fajardo Rojas con base en datos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2020)

Características socioeconómicas

La producción de cacao en el departamento de Boyacá depende de alrededor de 1.312 productores, de los cuales 89,02 % tiene su explotación agrícola en la región occidental, y 9,30 % en la región oriental (figura 12)

(Gobernación de Boyacá, 2020). La tipología del productor predominante es de pequeño y mediano agricultor, con un área sembrada promedio de tres hectáreas y predominio de tenencia de los predios. La producción de cacao es su principal actividad agrícola y su más importante fuente de ingresos. A diferencia de otros departamentos productores, donde se tiene un alto porcentaje de plantaciones envejecidas, en Boyacá las plantaciones de cacao son relativamente jóvenes, con un rango de edad de 10 a 15 años (tabla 2).

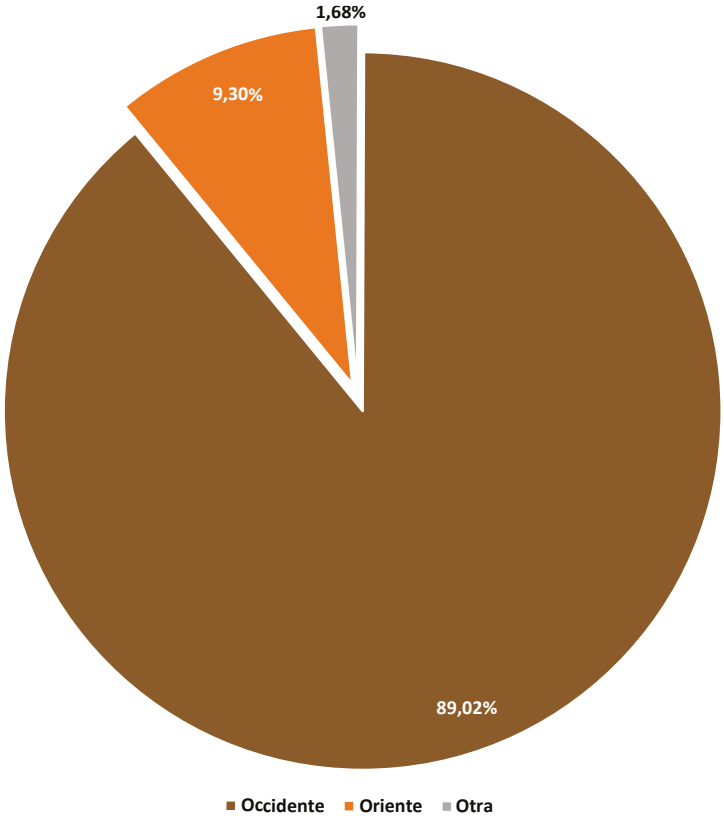


Figura 12.

Distribución por regiones de los productores de grano de cacao en el departamento de Boyacá, 2020.

Fuente: Elaboración propia con base en Gobernación de Boyacá (2020)

Tabla 2. Caracterización socioeconómica del departamento de Boyacá

Tipología del productor	Predominan los pequeños y medianos productores, economía campesina, escasos recursos económicos y poca infraestructura para producir cacao. En relación con la distribución de género de los productores, se evidencia que los hombres tienen una participación de 60 % más que las mujeres. El promedio de edad de los productores hombres es de 58 años y el de las mujeres de 45. El máximo nivel de educación alcanzado es básica primaria y en algunos casos secundaria.
Tamaño de las explotaciones	El tamaño promedio de una explotación cacaotera es de 3 ha. El 60 % de los ingresos de los productores proviene principalmente del cultivo de cacao.
Forma de tenencia	La administración de los predios cacaoteros se da por tenencia del cultivo.
Edad de las plantaciones	Los cultivos son jóvenes, con una edad promedio de 10 a 15 años. La experiencia de cultivo de los productores es de 8 a 10 años aproximadamente.

Fuente: Elaboración propia

Capítulo V.

Requerimientos edafoclimáticos del cultivo de cacao

Theobroma cacao L. es una especie perenne con alta diversidad genética, adaptada al bosque húmedo tropical, cuyo ecosistema es estructural y ambientalmente diverso y alberga aproximadamente 50 % de las variedades registradas a nivel mundial (Dueñas-C et al., 2007). Originario de la cuenca alta del río Amazonas (Cuatrecasas, 1964), para su desarrollo requiere de zonas cálidas y húmedas con periodos cortos de sequía, clasificadas edafoclimáticamente como áreas aptas para la siembra y establecimiento del cultivo. Esta caracterización le permite al productor tomar decisiones relacionadas con la siembra e implementación de prácticas de manejo y mantenimiento que contribuyen al desarrollo y productividad de la cosecha de grano seco.

Altitud

El cultivo se desarrolla mejor en la zona tropical, desde la línea del ecuador hasta los 15° o 20° de latitud, tanto hacia el norte como hacia el sur (Rojas & Sacristán, 2013). Se desarrolla bien desde el nivel del mar hasta los 1.200 m s. n. m. En Colombia, *T. cacao* se adapta a regiones clasificadas como sumamente aptas (A1), entre los 400 y 800 m s. n. m.; moderadamente aptas (A2), de 500 a 1.000 m s. n. m.; marginalmente aptas (A3), de 900 a 1.200 m s. n. m., y no aptas (N), por encima de 1.200 m s. n. m. (MADR, 2010). Algunas regiones contienen microclimas especiales, en los cuales se puede explorar el cacao por encima de este rango altitudinal, tales como la zona cafetera y la Sierra Nevada de Santa Marta (tabla 3) (Landaeta Tuay, 2016).

Relieve

Aunque el cultivo se desarrolla muy bien en pendientes mayores de 50 %, lo ideal es sembrarlo en áreas planas o con pendientes de 20 a 50 %, porque en ellas se facilita el establecimiento de prácticas relacionadas con el manejo integrado del cultivo, tales como poda, manejo fitosanitario de insectos plaga y enfermedades, fertilización, cosecha y transporte de insumos al lote, entre otras. Los lotes con pendientes pronunciadas aumentan las pérdidas de suelo, materia orgánica y nutrientes por erosión laminar durante los primeros años del cultivo, puesto que en estas condiciones el suelo permanece con poca cobertura vegetal, la cual se incrementa a partir del tercer año, cuando la planta de cacao desarrolla la copa (tabla 4) (García Lozano, 2009).

Temperatura

La temperatura influye en algunos procesos importantes para la formación de flores y la maduración de la mazorca de cacao. En zonas de clima frío con temperaturas por debajo de los 18 °C, el fruto demora de 167 a 205 días para obtener su madurez óptima de cosecha, mientras que en localidades de clima cálido con temperaturas por encima de los 24 °C, la mazorca tarda de 140 a 175 días para estar en condiciones de cosecha (Johnson et al., 2008). En Colombia, se recomienda cultivarlo en regiones cuya temperatura esté entre 18 y 32 °C, en aquellas clasificadas como sumamente aptas (A1), con un rango de temperatura de 24 a 28 °C; modernamente aptas (A2), con un rango de 20 a 30 °C, y marginalmente aptas (A3), con un rango de 18 a 32 °C. En contraste, las no aptas (N) tienen una temperatura inferior a 18°C y superior a 32°C, lo que limita el desarrollo del cultivo (tabla 4) (García Lozano et al., 2007).

Radiación solar

Debido a que la planta de cacao es originaria de los trópicos húmedos del noreste de América (zona amazónica), su óptimo desarrollo es bajo sombrío, ya que este disminuye la exposición a la radiación solar y al estrés hídrico ocasionado por el aire situado alrededor (Gutiérrez Rojas

et al., 2015). La intensidad lumínica, la temperatura y el movimiento del aire influyen en la humedad relativa del ambiente y el suelo. Este cambio de las condiciones ambientales estimula el crecimiento y desarrollo de una mayor área foliar y aumenta las concentraciones de clorofila, lo cual influye en las tasas de asimilación de CO_2 con una menor densidad estomática y en las bajas tasas fotosintéticas con saturación a bajos niveles de luz y fotoinhibición de la fotosíntesis en bajas radiaciones (tabla 4) (Jaimez et al., 2008). Para Beer et al. (1998), la sombra en el cultivo altera algunos factores climáticos, como la temperatura, la humedad relativa, la evapotranspiración, la disponibilidad de agua y de nutrientes en el suelo (debido a los nutrientes que incorpora la hojarasca al sistema productivo). Dichos factores influyen en el crecimiento y la producción de la cosecha.

El uso de árboles como sombrío del cultivo disminuye la radiación solar, la fotosíntesis, la transpiración, el metabolismo y el crecimiento de la planta, así como la demanda nutricional del suelo, con lo cual se favorece el establecimiento del cultivo en suelos de baja fertilidad. Esto se debe a que la exposición a la radiación solar afecta negativamente la actividad fotosintética de la planta de cacao, dada su sensibilidad a la fotoinhibición (Boyer, 1971). Como el cultivo requiere 60 % de luminosidad en los primeros cuatro años de sembrado, se recomienda el uso de sombrío estratificado de acuerdo con las componentes del sistema (forestal, transitorio, cacao). En Colombia, los cultivos de variedades criollas, forasteras y trinitarias requieren una radiación solar de 400 a 700 µmol/m^2/s, o 30 % de luz y 70 % de sombra, intensidades que corresponden a un rango de 25 a 30 % en un día despejado, con una tasa de asimilación de CO_2 de 6 a 7 µmol/m^2/s (Jaimez et al., 2008). Estas características permiten clasificar edafoclimáticamente las regiones cacaoteras de Colombia en zonas sumamente aptas (A1), moderadamente aptas (A2) y marginalmente aptas (A3). Las zonas no aptas (N), dado que se encuentran por encima de los 1.200 m s. n. m., presentan una alta nubosidad (tabla 3) (García Lozano et al., 2007).

Por otro lado, los excesos de sombra reducen procesos fisiológicos de la planta como la fotosíntesis, la transpiración y el metabolismo, lo cual provoca una disminución en el transporte de agua y nutrientes minerales esenciales para el crecimiento y desarrollo. La exposición directa al

sol o los excesos de luz tienen efectos negativos sobre la actividad fotosintética, debido al cierre estomático y a la sensibilidad que pueda tener la especie a la fotoinhibición, lo cual ocasiona daños en el aparato fotosintético y muerte celular (Boyer, 1971).

Según Agudelo-Castañeda et al. (2018), las especies utilizadas para sombrío del cacao desempeñan un papel importante en la disponibilidad de luz y en la respuesta de la fotosíntesis en cada uno de los materiales genéticos cultivados. Por lo anterior, y después de evaluar tres especies maderables, se recomienda el abarco (*Cariniana pyriformis*) para ser utilizado como sombrío permanente, siempre y cuando se use de forma ordenada y regulada, de manera que aporte un sombrío adecuado en los nuevos cultivares.

Vientos

Algunos autores mencionan que vientos con velocidades superiores a 4 m/s aumentan la evapotranspiración; ocasionan deshidratación, desecación y caída prematura del tejido foliar; y limitan la polinización de las flores (Rojas & Sacristán, 2013). El daño se incrementa en cultivos establecidos sobre pendientes mayores de 15 %, dado que en tales condiciones se alteran los procesos fisiológicos, productivos y mecánicos de la planta (por rotura de tallos y ramas, y caída de hojas y cojines florales), y se favorece la pérdida de suelo por erosión eólica (Batista, 2009). También aumenta la velocidad de transpiración de las hojas y disminuye la concentración circundante de dióxido de carbono (CO_2) (tabla 4) (Sáenz & Cabezas, 2007).

Para minimizar este efecto en el estado inicial de la planta de cacao, se recomienda sembrar barreras rompevientos alrededor del lote, las cuales, al crecer, disminuyen el daño en las plantas (Rojas & Sacristán, 2013). Velocidades de 1 a 2 m/s no afectan el cultivo, y para que no ocurran daños en plantaciones establecidas, el viento no debe superar los 2,5 m/s (Alvim, 1987). El efecto de los vientos baja cuando el cultivo se encuentra bajo sombríos transitorios y permanentes, ya que estos actúan como barrera rompevientos, aunque en tales casos sí se producen daños en las plantas situadas en el borde del lote (tabla 4) (Rojas Ardila et al., 2012).

Precipitaciones

En Colombia, el cultivo de cacao se adapta muy bien y tiene buenas perspectivas de rentabilidad en regiones con precipitaciones que oscilen entre 1.200 y 3.800 mm/año. Las tres zonas definidas para este cultivo son las sumamente aptas (A1), con precipitaciones de 1.200 a 2.600 mm/año; moderadamente aptas (A2), de 1.200 a 3.800 mm/año, y las marginalmente aptas (A3), de 1.500 a 3.800 mm/año. Los cultivos establecidos en zonas no aptas (N), con precipitaciones menores de 1.200 o mayores de 3.800 mm/año, pueden verse afectados por problemas fitosanitarios de insectos plaga y enfermedades, o por desórdenes fisiológicos ocasionados por deficiencias nutricionales, los cuales alteran el desarrollo productivo de la planta. El agua lluvia aportada a la planta depende del volumen de precipitación y de su distribución durante todo el año en el área cultivada (tabla 3) (García Lozano et al., 2007).

En regiones de baja precipitación se puede sembrar cacao con suministro de agua por sistema artificial de riego, lo cual convierte estas zonas en aptas para el fomento del cultivo. En cambio, no se puede sembrar en aquellas superficies con exceso de lluvia, debido a que en tales condiciones se presentan problemas fitosanitarios que pueden afectar el desarrollo y productividad de la planta y cuyo control aumenta los costos de producción por hectárea. La eficiente disponibilidad y distribución del agua en la planta a lo largo del año es el factor responsable de las diferencias en producción y rentabilidad del sistema productivo por hectárea (Mejía Flórez & Argüello Castellanos, 2000).

Fisiológicamente la planta de cacao es muy sensible a temporadas prolongadas de verano (superiores a dos meses), dado que el déficit hídrico en el suelo ocasiona secamiento, caída de flores y pepinos. En estas plantaciones se recomienda establecer sistemas de riego que minimicen las pérdidas por baja productividad (Pinzón Useche et al., 2012). Cambios bruscos, seguidos o prolongados de verano e invierno limitan la floración, formación y llenado de mazorcas (Alvim, 1987). Factores como potencial hídrico, fotosíntesis neta y crecimiento se ven afectados por la disminución de precipitaciones o el déficit hídrico, ya que estas condiciones cierran los estomas y provocan una disminución notoria en la actividad fisiológica de la planta (Lozano García & Fonseca Moreno, 2016).

Los municipios de la provincia de Occidente de Boyacá presentan un régimen de lluvias bimodal, lo cual favorece la formación de dos cosechas al año, una de mayor y otra de menor proporción y presencia de frutos. Por su parte, los municipios de las otras provincias (Oriente, Neira, Lengupá, Libertad y Norte) tienen un régimen monomodal, con un periodo de verano marcado al final y el comienzo del año, lo que afecta el desarrollo del cultivo y el rendimiento productivo. Para estas últimas provincias es importante contar con disponibilidad de agua adicional a las precipitaciones, con el fin de suministrar el líquido en los periodos de mayor déficit hídrico. Lo anterior se debe a que las plantas son sensibles fisiológicamente a los cambios fuertes de disponibilidad hídrica y responden a los contrastes entre el verano e invierno con presencia de alta floración, y formación y llenado de frutos (Alvim, 1975).

Como en Colombia hay poca investigación sobre el requerimiento hídrico del cultivo y los productores tienen un bajo nivel tecnológico y económico, son pocas las parcelas con sistema de riego (Barragán Quijano et al., 2012). Debido a que los principales municipios cacaoteros del departamento de Boyacá presentan un régimen bimodal de lluvias (en dos épocas del año), los productores obtienen dos cosechas de cacao anuales. La primera se da entre los meses de junio y agosto, y la segunda de noviembre a enero. Además, se obtienen mazorcas con madurez fisiológica a lo largo de todo el año, en meses de baja o alta producción, lo que resulta benéfico para el flujo de recursos económicos en periodos de poca cosecha, pero perjudicial para el manejo fitosanitario de enfermedades.

Humedad relativa

No existen estudios a nivel nacional que indiquen la humedad relativa ideal para establecer un cultivo de cacao. Algunos autores sostienen que la planta requiere un alto porcentaje de humedad relativa para su desarrollo. Otros, en cambio, afirman que la humedad relativa del aire puede bajar hasta un 40 o 50 % sin afectar negativamente a la planta, siempre y cuando haya suficiente agua en el suelo. Esta es una razón válida para establecer el cultivo en zonas secas donde haya posibilidad de aplicar riego suplementario, como en los valles interandinos secos (tabla 4) (Rojas Ardila et al., 2012).

La apertura de los estomas de las hojas depende de la humedad del aire. Los estomas se mantienen abiertos bajo condiciones de alta humedad relativa, y cuando se encuentran cerrados no tienen un control eficiente sobre la pérdida de agua, probablemente debido a la alta transpiración cuticular. Sin embargo, algunos genotipos de cacao muestran resistencia a la baja humedad relativa (Almeida & Valle, 2007). En zonas secas como las de los valles interandinos secos, el cultivo de cacao requiere implementar sistemas de riego para favorecer el buen desarrollo de las plantas y garantizar la producción (Rojas Ardila et al., 2012).

Requerimiento edáfico

El suelo como recurso natural no renovable está formado por minerales de arcilla, limo y arena; materia orgánica; macro y microorganismos, y agua y aire, cuyos componentes le confieren características físicas, químicas y biológicas (Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [Intagril], 2017). Lo anterior responde a la topografía y el clima de la región de origen, estos factores contribuyen a la adaptación, crecimiento y desarrollo de los diversos cultivares que permiten la manutención alimenticia del hombre. La interacción de estos factores con el manejo integrado del suelo y del cultivo de cacao determina la formación y disponibilidad de nutrimentos minerales esenciales para su crecimiento, desarrollo, producción y rentabilidad (tabla 8).

El cultivo de cacao se adapta al contenido textural de una gran variedad de terrenos. El contenido textural es la característica que indica el tamaño y proporción de las partículas minerales. Los suelos ricos en arcillas (A) y limos (L), por su composición, poseen respectivamente fracciones inferiores a 0,002 mm y de 0,002 a 0,5 mm. Además, presentan alta capacidad de retención de nutrimentos de forma natural y de agua en época de invierno. Esto último afecta el crecimiento de las raíces, favorece la aparición de enfermedades radiculares, y en verano hace que las raíces se resequen, se fracturen y se compacten con facilidad, lo cual altera la circulación de aire y agua y reduce la absorción de nutrimentos en la planta (Intagril, 2017). En contraste, los suelos de textura franca y de colores oscuros (los cuales denotan altos contenidos de materia orgánica) son los más aptos para la siembra y el establecimiento del cacao (tabla 8).

Como los terrenos de textura franca poseen partículas de arcilla, limo y arena en proporciones equilibradas, tienen una adecuada disponibilidad de nutrientes, buena aireación y un nivel freático superior a 1,50 m de profundidad efectiva, lo cual facilita el crecimiento y desarrollo del sistema radical. Los suelos de textura franco-arcillosa (de 30 a 40 % de arcilla), y de textura franco-arenosa (de 50 a 70 % de arena), en contraste con los de más de 55 % de arcillas, tienen buena capacidad de retención de humedad y disponibilidad de nutrientes, a pesar de que en verano se resecan y se compactan con facilidad (lo cual limita el desarrollo del sistema radicular). Por su parte, los arenosos con más de 85 % de arena facilitan el desarrollo y la penetración del sistema radical, pero retienen muy poca humedad y presentan baja disponibilidad de nutrientes (tabla 8) (García Lozano et al., 2007).

Suelos con impedimentos físicos, como rocas, pizarras, capas compactadas o arcillas endurecidas, de colores grises, azulosos, verdosos, amarillos intensos y pegajosos, no son aptos para el cultivo de cacao porque limitan internamente la aireación, la circulación y la retención de agua, así como el crecimiento del sistema radicular en profundidad. Tampoco se recomiendan los muy arenosos, ya que son pobres en nutrientes y no retienen agua (por su alto grado de porosidad), lo cual ocasiona estrés hídrico en temporadas de verano (Fedecacao, 2015).

La planta de cacao se desarrolla muy bien en suelos cuyo contenido textural se aproxima a 30 % de arcilla, 50 % de arena y 20 % de limo. Estas son las características más importantes para determinar y permitir la profundidad efectiva, así como el crecimiento y desarrollo de las raíces. No hay una correlación significativa entre la producción de cacao y el contenido textural, la disponibilidad de agua y oxígeno y el crecimiento vegetativo de la planta. Estos aspectos pueden afectar la compactación, la presencia de conglomerados, la sedimentación, el drenaje y las altas densidades de siembra (Snoeck et al., 2016).

Desde el punto químico, la fertilidad es la capacidad del suelo de suministrar los nutrimentos que la planta requiere para su crecimiento, desarrollo y producción. Dentro de las características que determinan la fertilidad del suelo, sobresale el grado de acidez o pH, cuyo punto óptimo para este cultivo oscila entre 5,5 y 6,5, rango en el que se mantienen disponibles

los principales elementos nutricionales. Se considera que un terreno es adecuado para el cacao cuando aporta las cantidades de minerales que se requieren para una óptima producción y rentabilidad de la cosecha. En este sentido sobresale la materia orgánica (con aportes superiores a 3 %), seguida del potasio (K) (aportes encima de 0,40 cmol/kg), fósforo (P) (aportes de 0,30 mg/kg), magnesio (Mg) (aportes de 3,0 cmol/kg) y calcio (Ca) (aportes de 5,0 cmol/kg) (García Lozano et al., 2007). Cuando se cultive en suelos con bajos contenidos de nutrientes, estos se deben suplir con aplicaciones de fertilizantes de síntesis química u orgánicos.

Tabla 3. Requerimientos edafoclimáticos para el cultivo de cacao en Colombia

N.º	Cualidad de la tierra	Factor de diagnóstico	Unidad	Clasificación por factores			
				Sumamente apta	Moderadamente apta	Marginalmente apta	No apta
				A1	A2	A3	N
1	Altitud	m s. n. m	m	400-800	500-1.000	900-1.200	>1.200
		Pendiente	%	<25	25-50	50-75	>75
2	Régimen de temperatura	Temperatura media mensual	°C	18-32 24-28	20-30	18-32	<18 y >32
		Diferencia entre máxima y mínima	°C	<9			
3	Radiación solar	Brillo solar	µmol/m²/s	En los primeros dos años se requieren niveles bajos de radiación solar, de 400 a 700 µmol/m²/s.			Alta nubosidad
			%	En los primeros dos años la planta necesita 30 % de luz y 70 % de sombra. Después del tercer año, requiere 70 % de luz y 30 % de sombra.			
4	Vientos	Velocidad	m/seg	1 a 2	<2,5	<2,5	>2,5
5	Humedad disponible (humedad total)	Precipitación anual	mm	1.200-2.600	1.200-3.800	1.500-3.800	<1.200 y >3.800

Fuente: García Lozano et al. (2007), Jaimez et al. (2008)



Capítulo VI.

Taxonomía y material genético

El cacao (*Theobroma cacao* L.) pertenece a la familia Malvaceae. La mayor diversidad genética proviene de la región del alto Amazonas, la cual abarca desde el nacimiento del río Marañón en Perú hasta la frontera con Brasil (Zhang & Motilal, 2016), así como de las regiones del bajo Amazonas, Orinoco y la Guayanas, donde se encuentran poblaciones del grupo denominado "forasteros" (Motamayor & Lanaud, 2002). De acuerdo con las características morfogenéticas, el cacao está clasificado en tres grupos, conocidos como "criollo", "forastero" y "trinitario, este último fruto del cruce entre los dos primeros. En Colombia predominan los grupos criollo y trinitario, los cuales producen granos de alta calidad sensorial en cuanto a aroma y sabor (Cardona Velásquez et al., 2016).

Descripción taxonómica

El cacao se encuentra naturalmente en la Amazonía, donde presenta su mayor diversidad genética, principalmente en los grupos criollo y forastero, razón por la cual esta región se considerada el centro de origen de la especie (Cuatrecasas, 1964; Motamayor & Lanaud, 2002). La clasificación taxonómica de la especie es obra de Carlos Linneo y fue publicada en *Species Plantarum*, en 1753. En 1882, Bentham y Hooker la clasificaron en la familia Sterculiaceae del orden Malvales (Batista, 2009). La última reclasificación se realizó en 1999, en la que se incluyó en la familia Malvaceae, perteneciente al orden Malvales (tabla 4) (Alverson et al., 1999).

Tabla 4. Taxonomía del cacao

Especie	*Theobroma cacao* L.
Familia	Malvaceae
Genero	*Theobroma*
Clase	Magnoliopsida
División	Magnoliophyta
Reino	Plantae

Fuente: EcuRed (2019)

Materiales genéticos

El material genético es muy importante en el establecimiento de cultivos de cacao, para asegurar buenos rendimientos productivos, tolerancia a las enfermedades limitantes y calidad del grano (figura 13). Es por esto que se ha venido utilizando la propagación asexual en la producción de plantas en vivero, mediante el uso de semilla sexual para el desarrollo del portainjerto o patronaje y de varetas portayemas para los procesos de injertación en copas productivas identificadas. De esta manera se garantiza la identidad genética del material vegetal producido con la variedad correspondiente (Quiroz & Mestanza, 2012; Compañía Nacional de Chocolates [CNCH] et al., 2014). Actualmente, Colombia y el departamento de Boyacá, gracias al apoyo del gremio para el desarrollo de nuevas siembras, cuentan con tecnologías apropiadas para la multiplicación de plantas en vivero y la injertación en campo (figura 14).



Figura 13.

Material genético de alto rendimiento.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda



Figura 14.

Viveros con técnicas de propagación especifica que garantizan el uso de materiales productivos.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

De igual manera, se desarrollan técnicas de injertación apropiadas para la rehabilitación de plantaciones improductivas, con el fin de recuperar su capacidad productiva en el corto plazo y mejorar los rendimientos productivos de las regiones (figura 15).



Figura 15.

Técnicas de rehabilitación (injerto malayo) para cambio de copas.

Foto: Jiner Niño Solano

El fortalecimiento de la cacaocultura colombiana empezó en 1960, cuando el Departamento de Investigación Agropecuaria del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) estableció el Banco de Germoplasma en Palmira, Valle del Cauca. Posteriormente, en 1964 se introdujeron los materiales genéticos ICS (Imperial College Selection), TSH (Trinidad Selected Hybrids), EET (Estación Experimental Tropical), UF (United Fruit), IMC (Iquitos Marañón Collection) y PA (Parinari), provenientes de Trinidad, Ecuador, Costa Rica y Perú, los cuales fueron la base de la producción de semilla híbrida en el país. En 1969, se crearon las colecciones nacionales ABC (Arboleda, Buriticá, Correa), EBC (Expedición Botánica al Caquetá) y CR (Criollo). Finalmente, en 1991 se estableció el Banco Nacional de Germoplasma en Rionegro, Santander, en el Centro de Investigación

La Suiza, con la inclusión de 105 materiales genéticos, con los cuales se inició el fomento del cultivo mediante propagación asexual (Argüello et al., 1999). Actualmente, el Banco Nacional de Germoplasma cuenta con 509 materiales genéticos introducidos y nacionales, bajo responsabilidad de AGROSAVIA en dos de sus centros de investigación: La Suiza (figura 16) y Palmira.



Figura 16.

Banco de Germoplasma de cacao ubicado en el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA.

Foto: Eliana Báez Daza

A partir de la década del noventa, se valoró la importancia de evaluar y seleccionar materiales genéticos con excelente comportamiento en campo producto de cruzamientos naturales y propagación desarrollada mediante semilla híbrida. Esta investigación fue llevada a cabo por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuario (Corpoica, en la actualidad AGROSAVIA), se desarrolló mediante selección participativa de árboles de cacao sobresalientes en fincas de productores, y arrojó como resultado materiales genéticos regionales seleccionados e identificados como SCC (Selección Colombia Corpoica) (Argüello et al., 1999).

El desarrollo cacaotero en el departamento de Boyacá comenzó en 2005 con el proyecto "Consolidación de cadenas agroforestales asociadas a cacao en diez municipios del departamento de Boyacá", liderado por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá) y con la participación de la Gobernación de Boyacá (a través de la Secretaría de Fomento Agropecuario); las alcaldías municipales de Maripí, Coper, Pauna, Tununguа, San Pablo de Borbur, Muzo, Quípama, La Victoria, Otanche y Puerto Boyacá; el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) de Boyacá; la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) y Corpoica. El resultado principal del proyecto fue la creación y consolidación de asociaciones en los municipios, el establecimiento de jardines clonales y viveros de cacao como base para la multiplicación de plantas a nivel local, y todo un proceso de capacitación del sistema productivo.

Con la instalación de los jardines clonales, se incorporaron materiales genéticos (IMC 67, PA 46 y PA 121) para usarlos como semilla de patronaje o portainjerto. De igual manera, se establecieron cultivares llamados "universales" o "introducidos" para ser desarrollados como copas productivas en la región (materiales universales como ICS 1, ICS 39, ICS 60, ICS 95, TSH 565, CCN 51, EET 8 y CAP 34, y regionales como SCC 59 y SCC 61). Las asociaciones de productores iniciaron el fomento del cultivo a nivel local, mediante los cultivares antes mencionados en la región del occidente de Boyacá.

A partir de 2008 Corpoica desarrolló el proyecto de investigación "Selección varietal participativa en las principales regiones productoras de Colombia", que incluyó la región del occidente de Boyacá, donde se evaluaron *in situ* más de treinta materiales genéticos y se seleccionaron materiales promisorios identificados con la sigla TCS (Theobroma Corpoica La Suiza) (Palencia et al., 2011a). La selección tuvo en cuenta la evaluación del comportamiento productivo y la puesta a punto de materiales genéticos con características agronómicas deseables, entre ellas alto potencial productivo, tolerancia a enfermedades, calidad del grano y adaptación a diferentes ambientes de Boyacá y Santander. El resultado significó un gran aporte a la cacaocultura puesto que en 2014 se incorporaron por primera vez en Colombia variedades de cacao al registro nacional de cultivares comerciales del ICA. Esto se materializó en las resoluciones 1552 y 1553 de 2014 para la comercialización

de materiales genéticos de la serie Theobroma Corpoica La Suiza, denominados TCS 01 y TCS 06 (figura 17), disponibles para la región Andina, subregión natural Montaña Santandereana y zonas con similares condiciones agroecológicas.

Igualmente, en 2008 Corpoica inició el proyecto de investigación "Evaluación de clones de cacao regionales de alto rendimiento bajo nuevos arreglos forestales con maderas finas tropicales en zonas productoras de Colombia", en el que se incluyó la región del occidente de Boyacá (Palencia et al., 2011a). Los resultados de este proyecto fueron principalmente recomendaciones tecnológicas para el establecimiento de nuevos cultivos mediante modelos agroforestales con maderas finas tropicales como abarco (*Cariniana pyriformis*) agrupados bajo el nombre "Modelo Agrosavia", cuya oferta tecnológica se puso a disposición de los productores de las zonas Montaña Santandereana y Magdalena Medio. Además, se incorporaron variedades de cacao en el registro nacional de cultivares comerciales del ICA, mediante las resoluciones 8328 y 8330 de 2017 para la comercialización de materiales genéticos de la serie Theobroma Corpoica La Suiza, denominados TCS 13 y TCS 19 (figura 17), disponibles para la región Andina, subregiones naturales Montaña Santandereana y Magdalena Medio y zonas con similares condiciones agroecológicas.

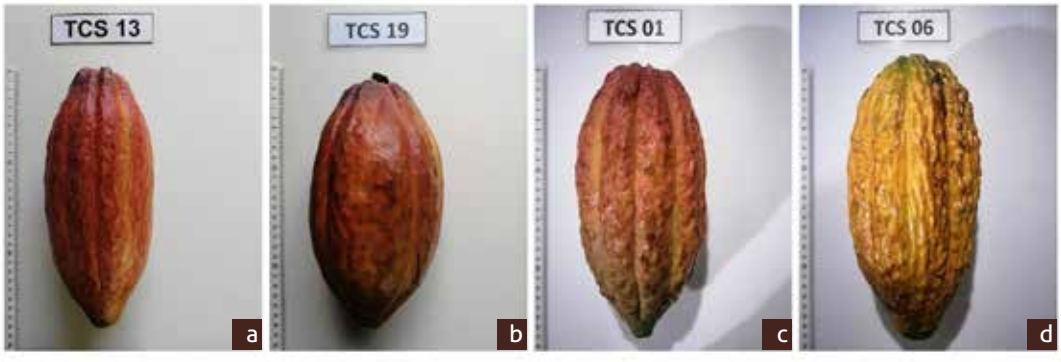


Figura 17.

Material genético liberado por AGROSAVIA en 2014 y 2017. a. TCS 13 (2017); b. TCS 19 (2017); c. TCS 01 (2014); d. TCS 06 (2014).

Fotos: Carol Castro Rodríguez

Por otro lado, Fedecacao seleccionó materiales genéticos en fincas de productores y llevó a cabo estudios de evaluación agronómica en los departamentos de Arauca y Santander, cuyo resultado fue la incorporación de los genotipos denominados FEAR (Fedecacao Arauquita), FSA (Fedecacao Saravena), FLE (Fedecacao Lebrija), FEC (Fedecacao El Carmen) y FSV (Fedecacao San Vicente). En diciembre de 2014, Fedecacao lanzó ocho materiales genéticos, los denominados FEAR 5, FEC 2, FLE 2, FLE 3, FSA 12, FSA 13, FSV 41, FTA 2, con los registros ICA 10478, 10480, 10482, 10484, 10488, 10494, 10497, 10500 respectivamente. Posteriormente, aumentó la disponibilidad de cultivares por medio del material genético FSV 155, con registro ICA 15823.

Estas trece variedades con registro ICA (sumadas las de AGROSAVIA y Fedecacao) están a disposición de los productores de la Montaña Santandereana, incluido el occidente de Boyacá, para siembras nuevas o rehabilitación de plantaciones improductivas. Cabe señalar que AGROSAVIA ha implementado las variedades desarrolladas y evaluadas directamente en el occidente de Boyacá, en diferentes parcelas de productores (TCS 01, TCS 06, TCS 13 y TCS 19) (figura 18) de las provincias de Occidente, Lengupá, Neira y La Libertad, variedades que han mostrado muy buenos resultados de adaptación a las condiciones edafoclimáticas de la zona. Lo anterior ha dado alternativas rentables a las asociaciones y productores de la región que están incursionando en el cultivo de cacao, ya que les ha proporcionado variedades de cacao especiales, finas en cuanto a aroma y sabor y altamente productivas.



Figura 18.

Inclusión de materiales genéticos de AGROSAVIA en parcelas de productores de Boyacá.

Foto: Eliana Báez Daza

Métodos de propagación del material genético

La multiplicación de plantas de cacao en el departamento de Boyacá se lleva a cabo con métodos asexuales para mantener la identidad genética de las variedades usadas como copas productivas en las plantaciones de cacao que se establecen. Para el desarrollo de este sistema de propagación se utilizan ramas o varetas portayemas (figura 19a) provenientes de las variedades recomendadas anteriormente para realizar procesos de injertación sobre plantas denominadas "patrones" (figura 19b), que son producidos mediante la germinación de semilla sexual (CNCH, 2021). A partir de este método de propagación, se combinan características de los materiales y se establece la relación copa-patrón para disminuir problemas adversos del suelo, lograr mayores rendimientos productivos

y disminuir el tiempo entre el establecimiento en campo y la fase productiva del cultivo (figura 19c).



Figura 19.

Método de propagación asexual del cacao mediante injertos. a. Rama portayema; b. Patrón de propagación de material de cacao; c. Plántula injertada.

Fotos: a. Fabian Bohada; b y c. Genaro Andrés Agudelo Castañeda

Para la injertación de plantas en vivero, los viveristas vienen utilizando injertos en parche y de púa terminal (figuras 20a y 20b). Este último se está implementado con mayor fuerza y mejores resultados gracias a su facilidad de manejo y al realce que desarrolla la planta desde vivero. De igual manera, existen productores y técnicos que prefieren establecer en campo plantas en patronaje para luego injertar mediante la técnica de aproximación, llamada coloquialmente "injertación pechito con pechito" (CNCH, 2021). Adicionalmente, para los procesos de rehabilitación de plantaciones de cacao improductivas se utiliza el injerto lateral en tronco, llamado "injerto malayo" (figura 20c), recomendado para la zona y para todo el territorio nacional.

Mediante estas técnicas de injertación se ha fomentado el uso de genotipos introducidos, más conocidos como "clones universales". El empleo de estas variedades se incrementó a partir del año 2000 con la llamada modernización de la cacaocultura colombiana, cuya finalidad fue aumentar los rendimientos y homogenizar los cultivos para facilitar el manejo agronómico (Mejía Flórez et al, 2003). Esta tecnología fue implementada con mayor fuerza en la provincia de Occidente del departamento de Boyacá a partir del año 2005, con el fomento asociativo y de cultivos que impulsaron Corpoboyacá, la Secretaría de Agricultura del departamento, el SENA, la UPTC y Corpoica.



Figura 20.

Plántulas de *Theobroma cacao* con injertación. a. Injerto de parche; b. Púa terminal. c. Injerto malayo.

Fotos: a, b. Genaro Andrés Agudelo Castañeda; c. Eduar Antolinez Sandoval

Genotipos de cacao utilizados para la producción de patrones

Para la multiplicación en vivero, se desarrollan plantas mediante germinación de semilla sexual, llamadas "patronaje", las cuales conforman el sistema radical de las plantas establecidas en campo. Este sistema está constituido por una raíz pivotante que mejora el anclaje al suelo de la planta, y que presenta raíces secundarias y pelos absorbentes cercanos a la superficie que permiten el transporte del agua y de nutrientes minerales esenciales desde el suelo hasta la parte aérea de la planta (Jaimes Suárez et. al., 2021).

Los genotipos de cacao usados para la producción de patronaje y que conforman la parte radical de la planta establecida en campo, además de proporcionar buen anclaje al suelo, deben presentar características indispensables para la duración del cultivo en campo. Entre las características importantes están la tolerancia a la acidez por toxicidad debida a la presencia de aluminio y la tolerancia a enfermedades causadas por hongos del suelo (Palencia C. et al., 2007). Los genotipos más empleados y recomendados para la producción de patronaje en la multiplicación masiva de plantas son IMC 67, PA 46, PA 121, CAU 39, los cuales se encuentran en algunos de los jardines clonales establecidos en 2005 y 2021, en convenio con las asociaciones de las provincias de Occidente y Lengupá, en Boyacá.

La selección de este material para la producción de patrones depende de los genotipos disponibles en los huertos básicos para la producción de semilla sexual. Estudios desarrollados por Corpoica demostraron que los genotipos IMC 67, seguidos de PA 46 y PA 121 (figuras 21a, 21b y 21c), presentan mayor desarrollo en vivero, mejor adaptación a baja disponibilidad de agua por disminución de lluvias y a suelos con pH ácido, y ofrecen mayor tolerancia a enfermedades como *Phytophthora* sp. y *Ceratocystis* sp. (Palencia C. et al., 2007).

Para la producción en vivero de plantas de patronaje o portainjerto, se deben cosechar frutos fisiológicamente maduros (los frutos están maduros cuando la coloración cambia de verde a amarillo intenso). Los granos se extraen de los frutos y se lavan con abundante agua y aserrín o arena para retirar el mucílago que recubre la semilla. Inmediatamente, los granos se ponen a germinar con aserrín en un recipiente limpio y manteniendo la humedad, ya que esta semilla es recalcitrante y no requiere periodos de reposo (figura 22). Con lo anterior, el embrión se desarrolla y aparece la radícula. Las semillas germinadas se deben sembrar por aparte en bolsas dispuestas en vivero, máximo cinco días después de extraído el grano del fruto, con el fin de evitar malformaciones de la raíz en la fase inicial de desarrollo de la planta (Agudelo Castañeda et al., 2021).



Figura 21.

Variedades de material vegetal empleadas como patronaje en la propagación vegetativa del cacao. a. IMC 67; b. PA 46; c. PA 121.

Fotos: a. Carol Castro Rodríguez; b y c. Eliana Báez Daza



Figura 22.

Semilla de cacao adecuada para la obtención de patrones, pregerminada para la siembra en sustrato.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

La injertación se lleva a cabo a partir del patronaje desarrollado en vivero, cuando las plantas alcanzan una edad de 60 a 80 días. Para ello se usa la vareta portayema procedente de las variedades comerciales recomendadas, las cuales se deben seleccionar previamente de acuerdo con la disponibilidad de los materiales genéticos y la preferencia o solicitud del productor. Las varetas portayema deben tener una edad similar a la del patronaje, es decir, de 60 a 80 días contados a partir de la elongación o rebrote de las ramas. También deben proceder de huertos básicos debidamente registrados ante el ICA, con el fin de asegurar la calidad genética, física, fisiológica y sanitaria del material. Finalmente, de dos a tres meses después de la injertación en vivero se obtiene una planta compuesta con adecuadas características de calidad para la siembra en campo (figura 23) (Agudelo Castañeda et al., 2021).



Figura 23.

Material vegetal de cacao apto para establecimiento definitivo en campo.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

Variedades de cacao utilizadas como copas productivas de *T. cacao*

Las variedades de cacao conocidas como “clones” se seleccionan por características de interés para producción, como tamaño de fruto y grano, calidad del grano, adaptación al ambiente del cultivo y tolerancia a las principales enfermedades limitantes. Un clon es una planta injertada proveniente de una variedad que ha sido propagada con métodos asexuales. Cuando se cultiva en condiciones edafoclimáticas óptimas, con un buen manejo agronómico, presenta un excelente comportamiento productivo. Si se somete a buenas prácticas de poscosecha y beneficio, el clon conserva las características sensoriales propias de la variedad (Jaimes Suárez et al., 2021).

La selección de los genotipos o copas productivas debe responder a las recomendaciones dadas para las variedades existentes con registro y su interacción con los factores climáticos y las condiciones ambientales, esto en razón a que los cultivos de cacao son perennes y su éxito o fracaso dependen en gran medida del material de siembra. De acuerdo con lo anterior, los productores cacaoteros deben adquirir las plantas para el establecimiento en campo en sitios de confianza que cuenten con registro ICA. Los viveros y huertos básicos para la producción de semilla deben cumplir con una serie de procedimientos y requisitos regulados mediante las resoluciones ICA 3168 de 2015 y 0780006 de 2020, lo cual garantiza la calidad física, genética, fisiológica y sanitaria del material que ofrecen y la pureza y trazabilidad de las plantas (Agudelo Castañeda et al., 2021).

De igual manera es importante conocer las características principales de las variedades que se van a cultivar, principalmente índice de grano, índice de mazorca, rendimiento, calidad, tolerancia a las enfermedades y compatibilidad sexual. Lo anterior, sumado a las recomendaciones de manejo de cada variedad, garantiza la máxima producción de frutos. En el establecimiento del cultivo, una variedad autoincompatible debe acompañarse de otra con buena afinidad para donarle polen y maximizar el cuajamiento de los frutos (Jaimes Suárez et.al., 2021).

Cuando se van a establecer cultivos en zonas bajas y/o muy húmedas, es necesario seleccionar variedades o clones con mayor tolerancia a enfermedades limitantes como la monilia (*Moniliophthora roreri*). Las variedades recomendadas para el departamento de Boyacá que cumplen esta condición son TCS 06 y TCS 19, que se pueden establecer combinadas, ya que TCS 06 es autoincompatible mientras que TCS 19 se puede cultivar en cultivos monoclonales (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica], 2015). Fedecacao recomienda la variedad FEC 2, que tiene bajas pérdidas por monilia. Esta variedad es autoincompatible y necesita un donador de polen recomendado por la Federación. En la tabla 5 se presentan las características productivas de las variedades universales más cultivadas y de las nacionales con registro ICA recomendadas para cultivar en Boyacá.

Tabla 5. Principales características productivas de los materiales genéticos de cacao con registro ICA recomendados para Boyacá

Material genético	Color fruto	Índice de grano	Índice de mazorca	Rendimiento (kg/árbol)	Compatibilidad
TCS 01	Rojo	3,0	10	3,3	(AC)*
TCS 06	Rojo	2,0	12	2,0	(AI)**
TCS 13	Rojo naranja	1,8	14	1,5	(AC)
TCS 19	Rojo naranja	1,6	16	1,8	(AC)
FSA 12	Verde rojizo ligero	1,3	18	1,5	(AI)
FSA 13	Verde rojizo ligero	1,3	24	1,8	(AI)
FEAR 5	Rojo intermedio	1,6	17	1,6	(AC)
FLE 2	Verde rojizo ligero	2,0	13	1,6	(AI)
FLE 3	Rojo intermedio	1,6	17	1,8	(AI)
FSV 41	Rojo intenso	2,1	13	1,9	(AC)
FEC 2	Rojo intenso	1,6	16	1,8	(AI)

Continúa

Continuación tabla 5

Material genético	Color fruto	Índice de grano	Índice de mazorca	Rendimiento (kg/árbol)	Compatibilidad
FTA 2	Rojo intermedio	1,8	15	1,3	(AC)
FSV 155	Verde intermedio	1,6	18	1,3	(AC)
CCN 51	Rojo intermedio	1,6	15	1,4	(AC)
ICS 1	Rojo intenso	1,7	17	1,1	(AC)
ICS 60	Verde intermedio	2,3	13	1,0	(AI)
ICS 95	Rojo intenso	1,4	20	0,9	(AC)
EET 8	Violeta	2,2	13	1,2	(AI)

*** (AC):** Autocompatible

**** (AI):** Autoincompatible

Fuente: Agudelo Castañeda et al. (2017), Quintana Fuentes et al. (2018)

Las variedades de cacao TCS desarrolladas y recomendadas por AGROSAVIA tienen características de interés como precocidad (inician la producción 18 meses después de establecidas en campo) y alta estabilidad en cuanto a comportamiento agronómico, lo que garantiza buenos rendimientos en las condiciones naturales de las subregiones agroecológicas cacaoteras de Boyacá (Agudelo Castañeda et al., 2017).

Características como la coloración de los frutos pueden variar según condiciones edafoclimáticas como disponibilidad de luz, agua y nutrientes minerales, así como altitud y competencia con otras plantas cultivadas alrededor (figuras 24a, 24b, 24c y 24d). Índice de grano, tamaño de fruto y número de granos por fruto pueden variar según clima, disponibilidad de agua, fertilidad natural de los suelos, disponibilidad de nutrientes esenciales y manejo agronómico del cultivo (Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 24.

Materiales genéticos de cacao liberados por AGROSAVIA para las subregiones Montaña Santandereana y Magdalena Medio. a. TCS 13; b. TCS 19; c. TCS 01; d. TCS 06.

Fotos: Genaro Andrés Agudelo Castañeda y Eliana Báez Daza

Compatibilidad sexual

La polinización de las flores del cacao es cruzada y se da por medios externos. La llevan a cabo principalmente insectos del género *Forcipomyia,* aunque puede ser asistida de manera controlada por el hombre. La autocompatibilidad de una variedad de cacao la determina el porcentaje de aceptación del polen de la misma variedad, lo cual define si es autocompatible (AC) o autoincompatible (AI). La intercompatibilidad entre variedades distintas también la determina el porcentaje de aceptación

de polen, y esto define si una variedad es intercompatible (IC) o interincompatible (II) en relación con el polen donado de otra variedad. En términos generales, la auto o intercompatibilidad se definen por el número de flores polinizadas efectivamente (figura 25), que debe ser mayor que 30 % del total de las flores polinizadas de manera controlada (Pinzón Useche et al.,2012).



Figura 25.

Flores de *T. cacao* en edad de fecundación.

Foto: Jiner Niño Solano

Tres variedades de AGROSAVIA son autocompatibles (TCS 01, TCS 13 y TCS 19) y una es autoincompatible (TCS 06). Esta última se debe establecer por surcos al lado de TCS 19 o TCS 01 para mejorar la producción de frutos (figura 26). La TCS 13, pese a ser autocompatible, presenta una eficiencia de fecundación de 35 %, por lo que se recomienda sembrarla por surcos junto a TCS 19. Las variedades TCS 01 y TCS 19 se pueden sembrar solas en monocultivo o franjas homogéneas (figuras 27a y 27b), ya que presentan un nivel de eficiencia en la fecundación superior a 70 % (tabla 6). Actualmente

se registran las siguientes variedades como autocompatibles: CNCH 12, CNCH 13, ICS 1, FSV 41, FTA 2, FEAR 5 (CNCH, 2021).

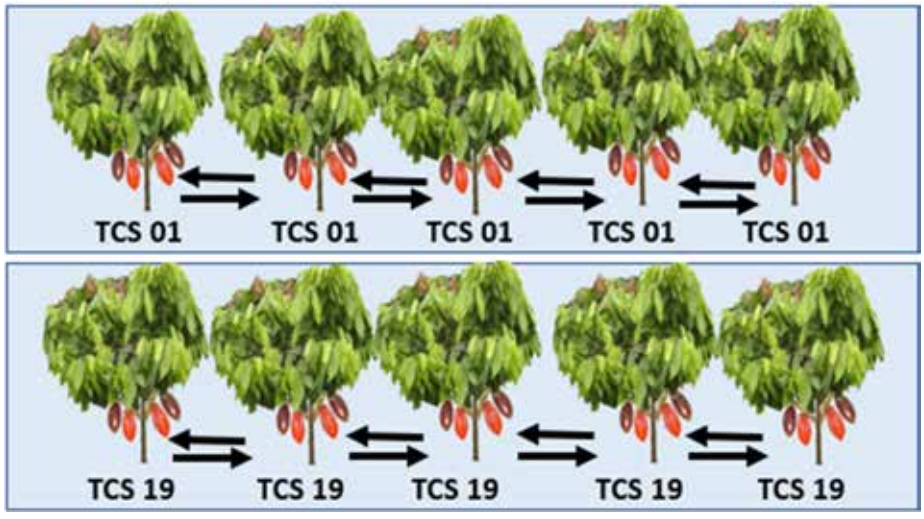


Figura 26.

Modelo de siembra de materiales de la serie TCS liberados en combinación.

Fuente: Jaimes Suárez et al. (2021)

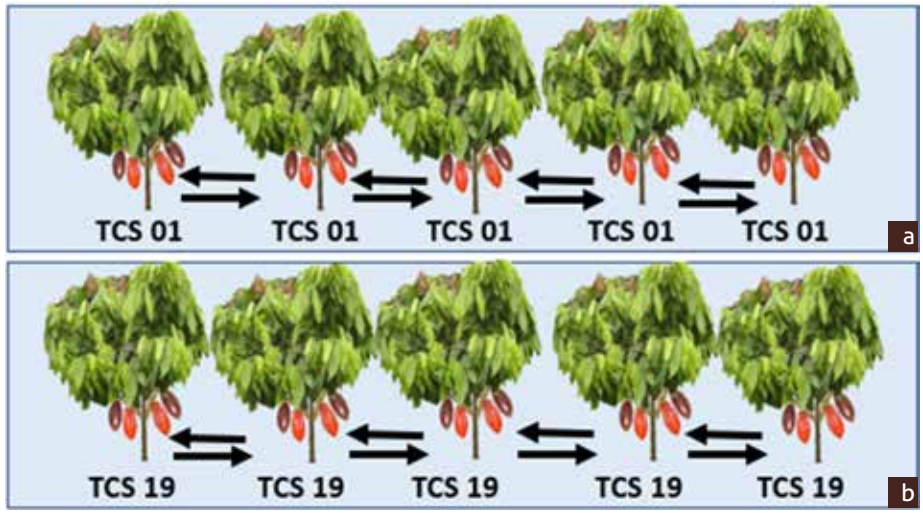


Figura 27.

Modelo de siembra por franjas de materiales autocompatibles de la serie TCS (liberados por AGROSAVIA) con alto porcentaje de fecundación. a. TCS 01; b. TCS 19.

Fuente: Jaimes Suárez et al. (2021)

Tabla 6. Matriz de compatibilidad entre materiales genéticos de AGROSAVIA

Padre ♂ \ Madre ♀	TCS 01	TCS 06	TCS 13	TCS 19
TCS 01	AC*	IC*	IC	II
TCS 06	II	AI	II	IC
TCS 13	II	IC	AC	II
TCS 19	IC	IC*	IC	AC*

AC	Autocompatible	IC	Intercompatible
AC*	Autocompatible >70 %	IC*	Intercompatible >70 %
AI	Autoincompatible	II	Interincompatible

***Superior a 70%**

Fuente: Jaimes Suárez et al (2021)

En la actualidad Colombia cuenta con tecnologías para la producción de variedades universales y regionales que multiplican las plantas por medio de procesos de injertación en vivero. El país igualmente tiene capacidad de generar recomendaciones tecnológicas, variedades y adecuadas prácticas de manejo del cultivo. Por lo anterior es necesario disponer de matrices de compatibilidad y modelos de siembra efectivos que permitan mejorar cada día el rendimiento productivo. Los clones universales y de Fedecacao se deben establecer de acuerdo con las recomendaciones generadas por estudios de compatibilidad. En general, una variedad autoincompatible se debe establecer al lado de otra que le aporte polen para mejorar el cuajamiento de los frutos (tabla 7).

Tabla 7. Matriz de compatibilidad entre materiales universales y de Fedecacao

			Madre ♀																									
	Clon		ICS					TSH			EET		CCN	IMC	FLE		SCC	CAU		FEC	FSV		FTA	FEAR	FSA			
			1	6	39	60	95	565	792	812	8	96	51	67	2	3	61	39	43	2	41	155	2	5	11	12	13
Padre ♂	ICS	1	95						★									★								★		
		6		50								★			★	★			★									
		39			3					★																		
		60				3				★																		★
		95				★	85									★												
	TSH	565		★	★	★	★	3		★	★		★												★			
		792				★			0									★										
		812		★						60		★			★		★											
	EET	8		★			★	★			20							★										
		96		★			★			★		70	★		★	★	★		★		★			★				★
	CCN	51		★	★	★		★					63		★	★		★	★					★				
	IMC	67	★		★	★	★	★	★	★				0	★						★							
	FLE	2					★	★	★	★		★	★		15				★			★						
		3		★	★	★	★		★		★	★				3												
	SCC	61	★						★	★		★					3											
Padre ♂	CAU	39			★				★	★	★			★				0										
		43		★	★						★	★						★	20									
	FEC	2									★																	
	FSV	41												★							54							
		155																				44						
	FTA	2																	★				45		★		★	
	FEAR	5										★												55		★	★	
	FSA	11																					★		15			
		12									★	★														5		
		13					★																★				5	

	Intercompatible (≥30 % y ≤70 %)	Autocompatible (≥30%)	Interincompatible (<30 %)
★	Intercompatible (≥70 %)	Autoincompatible (<30 %)	Por definir

Fuente: Fedecacao (2017, 2019)

Para el establecimiento de nuevos cultivos de cacao en Boyacá, AGROSAVIA recomienda emplear clones especiales con evidencias de respuestas productivas locales asociados a maderas finas tropicales de modelos de siembra de sistemas agroforestales (figura 28). El Modelo Agrosavia es una oferta tecnológica desarrollada mediante estudios en diferentes departamentos, incluido Boyacá. Este modelo agroforestal debe incluir una especie forestal como sombrío permanente (árboles maderables) que sea rentable para los productores en el largo plazo, y especies como plátano, maíz, yuca o semejantes como sombrío transitorio que generen ingresos en el corto plazo mientras el cacao produce (Jaimes Suárez et al., 2021). La asociación de especies permanentes y transitorias en un mismo sistema durante las fases de establecimiento y producción permite aprovechar el espacio, obtener productos de consumo y recibir ingresos en el corto, mediano y largo plazo. Además, cultivar cacaos especiales en sistemas agroforestales da la posibilidad de incrementar las producciones, homogenizar la calidad del grano y mantener la vida útil del cultivo por más tiempo (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, 2022a).



Figura 28.

Clones de cacao especiales TCS de AGROSAVIA, sembrados ordenadamente en sistemas agroforestales de maderas finas tropicales en Muzo (Boyacá).

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda



Capítulo VII.

Manejo agronómico

El cultivo de cacao se establece tradicionalmente en sistemas agroforestales, donde se asocia con especies que se integran como sombrío transitorio o como sombrío permanente. En Colombia, cerca de 90 % de las plantaciones de cacao se encuentran establecidas en SAF. Estos sistemas contribuyen a la diversificación de ingresos en las fincas, y se considera que generan beneficios económicos y de sostenibilidad ambiental dado que ofertan servicios ecosistémicos y de resiliencia en un escenario de cambio climático que amenaza los sistemas productivos y la seguridad alimentaria de las naciones. Sin embargo, para mantener una buena productividad en los SAF se requiere de una adecuada selección de las especies acompañantes acorde con la oferta ambiental, con un diseño de siembra adecuado y con el apropiado manejo agronómico de las especies de sombrío y cacao. En los siguientes apartes se presentan los diferentes aspectos que deben considerarse para tener un SAF de cacao con una adecuada productividad.

Sistemas agroforestales con cacao en Boyacá

El departamento de Boyacá tiene un amplio potencial para el establecimiento del cultivo de cacao bajo sistemas agroforestales. Los principales municipios productores de cacao en Boyacá son los de la provincia de Occidente (Pauna, Maripí, Otanche, San Pablo de Borbur, Muzo, entre otros), en los cuales se han establecido diversos programas que fomentan la producción del grano como alternativa a la producción de cultivos ilícitos o a la actividad minera de esta zona del departamento (Pineda Jaimes, 2018).

Boyacá tiene gran potencial para la producción cacaotera. En un estudio realizado por Corpoica, Corpoboyacá y la Gobernación, se determinó que

existen 100.000 hectáreas con alta capacidad para la siembra del grano (Niño Porras, 2012). La Gobernación de Boyacá (2020) reporta para el año 2016 un área de siembra de cacao de 5.114 hectáreas.

Duarte (2021), en su estudio relacionado con el análisis de la producción y del mercado del sector en el occidente de Boyacá (2015-2019), reconoce que se vienen promoviendo acciones para generar alternativas productivas con enfoque en un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. En el marco de este enfoque, el cultivo de cacao se ha convertido en una alternativa para el proyecto de vida de los productores de la región, ya que impulsa los cultivos agroforestales de la zona. Destaca la conveniencia de establecer el sistema agroforestal, ya que este combina la producción de cacao con la de otros productos, para el autoconsumo o la venta (por ejemplo, maíz, yuca, plátano, guayaba, banano, cítricos, cedro, aguacate, entre otros), con bajas o nulas prácticas de manejo.

Vega (2016) caracteriza la agrocadena del cacao en el Valle de Tenza (Boyacá), en los municipios cacaoteros de Santa María y San Luis de Gaceno, y señala que lo predominante son las plantaciones viejas, sin ningún nivel de manejo técnico ni de plagas y enfermedades, lo que hace que tengan una baja productividad. Por lo anterior, se han adelantado actividades de promoción de técnicas adecuadas de manejo, entre las cuales se encuentra la incorporación del componente forestal, para convertir el cultivo en un SAF.

Sobre el sistema agroforestal en Boyacá, Palencia C. et al. (2006) informan sobre tecnologías productivas sostenibles implementadas con el proyecto "Impulso integral para la consolidación de cadenas agroforestales asociadas a cacao en 10 municipios de la provincia de Occidente de Boyacá". En estas tecnologías se combina cacao de alto rendimiento con maderables, con el fin de contribuir a solucionar la problemática de la deforestación, controlar la erosión, conservar el agua, mejorar el suelo y ayudar a preservar la biodiversidad. Se destaca que este tipo de tecnologías se acomodan a las condiciones de los productores y están orientadas al conocimiento de las características básicas de las especies forestales como componente biótico de los sistemas con cacao.

Palencia C. et al. (2006) recomiendan algunas especies para incorporar a estos sistemas en el occidente de Boyacá, entre las cuales destacan siete

como sombrío potencial: nogal cafetero (*Cordia alliodora*), teca (*Tectona grandis*), melina (*Gmelina arborea*), cedro (*Cedrela odorata*), caoba (*Swietenia macrophylla*), roble (*Tabebuia rosea*) y abarco (*Cariniana pyriformis*).

En el marco de la evaluación de sistemas agroforestales con cacao en Boyacá, y desde un enfoque ambiental asociado al ciclaje de nutrientes, Báez Daza (2018) adelantó la investigación *Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco (Cariniana pyriformis M.), teca (Tectona grandis L. f.) y cacao (Theobroma cacao L.) en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá*, en la que determinó el aporte de los nutrientes de la hojarasca (N, P, K, Mg, B, Ca y Mn) en un SAF de cacao asociado con abarco y teca. En el sistema establecido en el municipio de Muzo, el abarco fue la especie de mayor aporte de hojarasca, con 3.279 kg/ha/año, seguido del cacao, 4.248,6 kg/ha/año, y de la teca, 1.253 kg/ha/año. El mayor aporte del abarco fue de N (56,1 kg/ha) y Ca (51 kg/ha), mientras que el de la teca fue de K (37,1 kg/ha). El abarco realiza un mayor aporte tanto en materia seca como en contenidos nutricionales de la hoja, principalmente bajo el diseño de siembra surco doble, el cual actúa como acompañante y proveedor de sombrío para el cultivo de cacao.

Lo anterior reafirma la evidencia de que los SAF proveen servicios ecosistémicos tales como polinización, secuestro de carbono, regulación del recurso hídrico y conservación de la biodiversidad, entre otros (Vaast & Somarriba 2014; Mortimer et al., 2018). Por lo tanto, se considera que los SAF de cacao ayudarían a mantener la biodiversidad en paisajes cuyos hábitats de bosque han disminuido debido a la presión por el uso de la tierra por parte de los seres humanos (Saj et al., 2017). En un estudio de Mejía y Barón (2019) sobre cacaotales en el municipio de Santa María, se destacó la importancia de los árboles asociados al cacao como medio para la conservación de la biodiversidad. Se encontraron 78 especies de aves asociadas a los árboles sombra de los cacaotales, ya que estos les sirven como percha, para forrajeo, anidación, para movimiento a través de las ramas, y les prestan otros servicios.

En vista de lo anterior, existe un interés creciente por el diseño y manejo de los sistemas desde un enfoque holístico, con el fin de mejorar y diversificar la productividad de las fincas y del paisaje, asegurando su

sostenibilidad y brindando los servicios ecosistémicos mencionados (Mortimer et al., 2018). Por ello, AGROSAVIA y otras entidades han enfocado su investigación en la implementación de sistemas agroforestales que sean productivos y amigables con el medio ambiente.

Investigación de AGROSAVIA en sistemas agroforestales

Desde el año 2007 se vienen estableciendo cultivos de cacao con procesos de manejo integrado basados en el paquete tecnológico dado por AGROSAVIA para uso de material de propagación mejorado genéticamente (clonados), en beneficio y cosecha con establecimiento de marquesinas y cajones fermentadores en las unidades productivas.

AGROSAVIA entregó una oferta tecnológica para sistemas agroforestales con maderas finas tropicales, producto de un trabajo de investigación de varios años en el departamento de Boyacá en una parcela de largo plazo del municipio de Muzo (Agudelo-Castañeda et al., 2018; Báez Daza, 2018). De acuerdo con los resultados de la investigación, se establecieron ensayos de validación en el oriente de Boyacá.

Para ello se establecieron parcelas que seguían las recomendaciones generales de AGROSAVIA. En ellas se trazaron y sembraron de manera secuencial los sombríos permanentes, los temporales y posteriormente, a los 8 meses, el cacao. Se hizo un arreglo de surcos dobles (4 × 4 m en tresbolillo) de las especies maderables abarco (*Cariniana pyriformis*), roble (*Tabebuia rosea*) y limba (*Terminalia superba*), con una distancia entre surcos dobles de 14 metros, en los cuales se incluyeron cinco líneas de cacao con arreglo de 3 × 3 m en tresbolillo, con una densidad de siembra de 15 % más de árboles de cacao. Los surcos dobles de cacao estaban orientados de norte a sur para distribuir la entrada de luz en la plantación.

El sombrío temporal se sembró con plátano, a una distancia de 3 m en tresbolillo, al inicio de la época de lluvias, específicamente en los meses de marzo y abril (en el oriente de Boyacá, las lluvias tienen un comportamiento monomodal). En algunas parcelas se sembraron

cultivos transitorios (maíz, fríjol y en algunos casos yuca) para brindar un mejor flujo de caja al productor (Alfonso, 2020).

Los cultivos asociados se sembraron según un cronograma basado en el ciclo vegetativo de las especies y en el régimen de lluvias de la zona. Simultáneamente, entre los surcos de plátano se sembraron estacas de matarratón (*Gliricidia sepium*) de 2 m de altura y a una distancia de 3 m como sombrío emergente o sombra móvil, con el fin de proteger los clones de cacao de la radiación solar en la etapa juvenil del cultivo. Para esta validación posteriormente se establecieron los cacaos de alto rendimiento, con registro ICA para la Montaña Santandereana, aunque para el departamento de Boyacá en la actualidad se están evaluando las variedades de AGROSAVIA (TCS 01, TCS 06, TCS 13 y TCS 19) y como testigo la variedad CCN 51, de uso común en las zonas cacaoteras, con una distancia de siembra de 3 × 3 m en tresbolillo (figura 29).

Se procedió a sembrar los materiales genéticos de cacao una vez los sombríos temporales y permanentes ofrecieron en conjunto de 50 a 60% de sombra. De esta manera se proporcionó al material genético la sombra adecuada para su óptimo desarrollo (Agudelo-Castañeda et al., 2018).

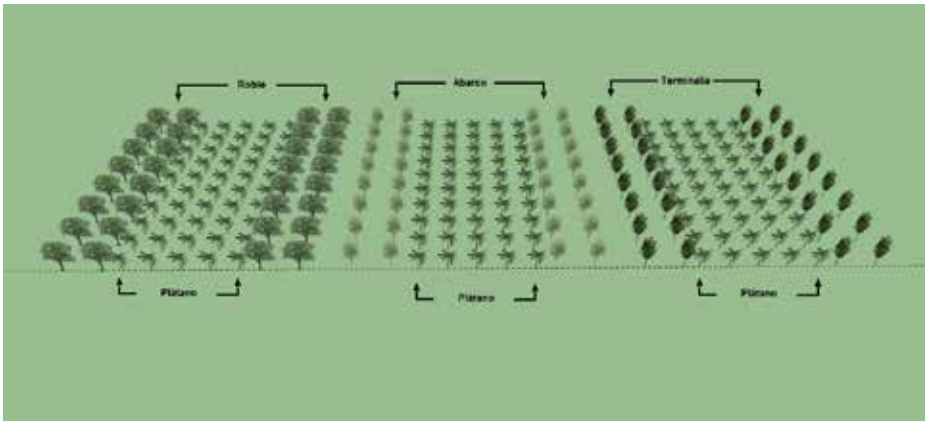


Figura 29.

Diseño de sistemas agroforestales con cacao validados en el departamento de Boyacá.

Fuente: José Luis Rodríguez Vitola

En este contexto, se evaluó el comportamiento de sistemas agroforestales compuestos por especies maderables finas y cacaos finos en cuatro

localidades del departamento de Boyacá (Páez, Campohermoso, Santa María y San Luis de Gaceno). Se evaluaron arreglos agroforestales bajo sombrío de tres especies forestales: abarco (*Cariniana pyriformis*), roble (*Tabebuia rosea*) y terminalia (*Terminalia superba*). La medición del crecimiento del componente forestal se efectuó mediante la toma de las variables dasométricas altura (m) y diámetro basal o DAP (diámetro a la altura del pecho). En Boyacá, *T. rosea* sobresalió en dos localidades, Campohermoso y San Luis de Gaceno, con 5,01 y 8,62 m de altura, y 12,12 y 19,91 cm de diámetro respectivamente; mientras que en Santa María y Páez se destacó *C. pyriformis*, con 7,05 y 5,33 m de altura, y 11,59 y 8,67 cm de diámetro. El mayor incremento medio anual tanto en altura como en diámetro se presentó en San Luis de Gaceno para *T. rosea*, con 2,87 m/año y 6,64 cm/año, seguido de *C. pyriformis*, con 2,73 m/año y 5,29 cm/año respectivamente (figuras 30, 31, 32, 33 y 34).



Figura 30.

Sistema agroforestal roble-cacao, finca México Lindo, vereda San Carlos, municipio San Luis de Gaceno (Boyacá), 2021.

Foto: Laura Dayana Escobar



Figura 31.

Sistema agroforestal abarco-cacao, finca México Lindo, vereda San Carlos, San Luis de Gaceno (Boyacá), 2021.

Foto: Laura Dayana Escobar



Figura 32.

Sistema agroforestal roble-cacao, finca El Pino, vereda El Toldo, Campohermoso (Boyacá), 2021.

Foto: Laura Dayana Escobar



Figura 33.

Sistema agroforestal abarco-cacao, finca El Cauchal, vereda Pan de Azúcar, Páez (Boyacá), 2021.

Foto: Laura Dayana Escobar



Figura 34.

Sistema agroforestal abarco-cacao, finca La Florida, vereda Agustín de Cerro, Santa María (Boyacá), 2021.

Foto: Laura Dayana Escobar

Los sistemas agroforestales permiten diversificar o mejorar la producción por unidad de área. Alfonso (2020) evaluó un diseño de cultivos transitorios en la etapa de establecimiento del sistema agroforestal con cacao bajo un modelo de agricultura familiar en el municipio de Páez (Boyacá), bajo tres diferentes especies forestales de sombrío (abarco [*C. pyriformis*], roble [*T. rosea*] y terminalia [*T. superba*]), en combinación con cultivos de maíz (*Zea mays*) y fríjol caupí (*Vigna unguiculata*), así: tratamiento 1: cacao-maíz, tratamiento 2: cacao-fríjol, tratamiento 3: cacao-maíz-fríjol. Se tomó información relacionada con variables de crecimiento y productividad, complementada con un análisis financiero basado en los resultados de flujo de caja en diferentes escenarios. Para ello se estimó la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN), la relación costo-beneficio (C/B) y la tasa equivalente de la tierra (TET).

En cuanto a altura de planta se destacó el crecimiento bajo roble y terminalia del sistema cacao-fríjol (63,55 y 62,05 cm respectivamente). Para las variables diámetro de tallo y número de vainas por planta sobresalió el tratamiento cacao-fríjol bajo forestal roble (9,05 y 16,20 mm respectivamente). Para el caso de maíz, 75 % de las variables evaluadas fueron mayores significativamente en el sistema cacao-maíz bajo forestal abarco. En cuanto a variables productivas, se observó que el rendimiento para maíz bajo el sistema cacao-maíz fue de 3.854,7 kg/ha mientras que bajo la asociación cacao-maíz-fríjol fue de 3.436,8 kg/ha. Para el caso de fríjol, en el sistema cacao-fríjol el rendimiento fue de 1.634,8 kg/ha mientras que en cacao-maíz-frijol fue de 1.413,8 kg/ha.

Dentro del análisis económico para cacao-maíz se presentó una TIR de 11 % y una C/B de 1,84 pesos; para cacao-fríjol, una TIR de 19 % y una C/B de 3,48 pesos; mientras que para la asociación cacao-maíz-fríjol la TIR fue de 47 % y la C/B de 5,57 pesos. Esto último evidencia que la combinación cacao-fríjol-maíz genera ingresos altos y con ello mejores beneficios para el productor dado que el fríjol tiene un precio alto y sus costos de producción son relativamente bajos. El valor de la TET fue mayor para el cultivo asociado cacao-maíz-frijol, en el que hubo 15 % más de producción en el caso de fríjol y 12 % más en el caso del maíz, lo que indica que la asociación hace más eficiente el uso de la tierra.

Se observó que las asociaciones de cacao solo con maíz o solo con fríjol presentaron un mejor desempeño que la asociación cacao-maíz-fríjol en términos de rendimiento. Sin embargo, el análisis de costos reveló que la asociación de maíz y fríjol es más eficiente en el uso equivalente de tierra. Por tanto, se sugiere como sistema de siembra más rentable para el productor la asociación cacao-maíz-fríjol con maderas finas.

Ruiz (2021) caracterizó los sistemas agroforestales con cacao en tres municipios del oriente de Boyacá (Miraflores, Berbeo y Páez). El estudio se estructuró en varias etapas. En la primera se levantó información primaria mediante inventario florístico de los sistemas agroforestales y aplicación de encuestas a cinco agricultores por cada municipio. En la segunda etapa, con base en la información primaria se determinó el índice de valor de importancia (IVI) para identificar especies representativas en cada municipio.

La caracterización preliminar reveló que el sistema productivo de cacao se desarrolla principalmente en torno al minifundio en áreas menores a una hectárea, en donde se destaca el establecimiento de los clones CCN 51 y TCS 01 entre 2 y 6 años, dispuestos en un arreglo 3 × 3 m de tipo triangular, asociado principalmente a especies maderables y con una producción inferior a una carga por año. Dentro de los sistemas productivos se presentó una gran composición florística. Entre las principales familias de especies asociadas al cultivo de cacao se destacaron Meliaceae, Fabaceae y Rutaceae, de las cuales presentaron mayor importancia agroecológica las especies aguacate (*Persea americana*) en Miraflores y cedro (*Cedrela odorata*) en Berbeo y Páez. En cuanto a la evaluación del porcentaje de sombra, se presentaron valores de 59, 55 y 46 % para los municipios de Miraflores, Berbeo y Páez respectivamente.

Se concluyó que los sistemas agroforestales de la región de Lengupá presentan desórdenes en la distribución de las especies arbóreas dentro del sistema productivo. Además, son escasas las labores de manejo de sombra dentro del mismo, por lo cual se dan porcentajes de sombrío (30 %) no acordes con las recomendaciones para el cultivo en etapas productivas. Con base en la información encontrada en la investigación, se recomienda una distribución adecuada de la sombra mediante el establecimiento de arreglos agroforestales bajo un diseño específico; asimismo, se aconseja la

planificación de labores de poda del sombrío, para optimizar el uso eficiente de la luz y los diferentes procesos fisiológicos de las plantas de cacao.

Por otra parte, el cultivo de cacao requiere para su adecuado crecimiento y desarrollo determinados niveles de sombrío, los cuales se pueden manejar mediante sistemas agroforestales, que a su vez permiten diversificar la producción por unidad de área. Dentro de los sistemas agroforestales es importante identificar el tipo de arreglos y componentes adecuados para maximizar las interacciones positivas (Agudelo-Castañeda et al. 2018; Álvarez-Carrillo et al., 2012).

Establecimiento del cultivo

Con la definición del diseño del sistema productivo de cacao, incluida la selección de las especies que se integrarán al sistema agroforestal, se debe proceder a la selección del terreno. De esta selección dependerá el éxito o fracaso del sistema productivo. Para esto, se deben considerar las necesidades de cada especie, e identificar las limitantes del terreno y los ajustes que se implementarán para un correcto desarrollo de las plantas de cacao y las especies acompañantes. Se deben surtir las etapas que se presentan a continuación para el establecimiento de un SAF con cacao.

Selección del terreno

El éxito en la adaptación y rentabilidad del cultivo de cacao en lotes nuevos depende de que las propiedades edáficas del suelo sean acordes al requerimiento de la planta. Para esto se recomienda hacer análisis de laboratorio de algunas características físicas y químicas de las principales propiedades que más influyen en el crecimiento y desarrollo del cultivar. Estos análisis se complementan con observaciones en campo de algunas propiedades físicas del suelo, como profundidad efectiva, nivel freático y contenidos texturales de arcilla, limo y arena, las cuales definen y demarcan la estructura, porosidad, y capacidad de almacenamiento, distribución y drenaje del agua y circulación del aire, condiciones que delimitan e incentivan la actividad biológica de los macro y microorganismos encargados del ciclaje de nutrientes y mineralización de la materia orgánica

(MO) fundamental para la nutrición del cultivo. Estas características fisicoquímicas dependen de la combinación de factores climáticos y del manejo integrado del sistema productivo (Snoeck et al., 2016).

Adecuación del terreno

Una vez seleccionado el terreno se procede a su adecuación, para lo cual se deben llevar a cabo las siguientes actividades: 1) tumba de rastrojo y malas hierbas que afectan el normal desarrollo del cultivo; 2) trazado, ahoyado y siembra de sombríos transitorios y permanentes; 3) construcción del vivero para la producción, propagación, e injertación y manejo integrado de los genotipos de cacao; 4) trazado, ahoyado y encalado para la siembra de las plántulas de cacao; y 5) manejo agronómico y cosecha de los cultivos de ciclo corto, y los sombríos transitorios y permanentes.

Ahoyado

Para preparar el lote, se recomienda inicialmente controlar con suficiente anticipación las arvenses, las plantas indeseables y la biomasa del cultivo anterior, con el fin de incentivar la formación de materia orgánica en el suelo mediante su descomposición y mineralización. En lotes húmedos se sugiere construir drenajes que recojan y transporten el exceso de agua en el terreno, ya que la planta de cacao es sensible a la humedad en el sitio donde se sembró. Además, se sugiere realizar un diagnóstico del estado nutricional del suelo, con el fin de evaluar el grado de acidez y la disponibilidad de nutrimentos, mediante un análisis en laboratorio de la fertilidad del suelo y de metales pesados considerados potencialmente riesgosos para la calidad e inocuidad del gran seco de cacao (Arvelo Sánchez et al., 2017). Con los resultados del análisis de laboratorio y la recomendación de un asistente técnico, se procede a diseñar un plan de fertilidad para las diferentes fases de desarrollo y crecimiento de las plantas de cacao.

Siembra

Después de marcar los sitios en donde se va a sembrar la planta, con suficiente anticipación se procede a abrir huecos de 40 × 40 × 40 cm, con el fin de preparar física y químicamente el área donde posteriormente se

desarrollarán las raíces de la planta. Es conveniente agregar en el fondo del hoyo al menos 1 kg de abono orgánico bien maduro o descompuesto, mezclado con 100 g de cal dolomita, para acondicionar el suelo para el desarrollo del sistema radicular de la planta. Se sugiere sembrar la planta al inicio del periodo de lluvias para mejorar la humedad del suelo. Aunque la siembra se puede hacer en cualquier momento del año, se debe tener disponibilidad de agua y buen sombrío para favorecer el crecimiento y el desarrollo del cultivar (Arvelo Sánchez et al., 2017).

Antes de sembrar la planta de cacao en el sitio definitivo, se recomienda retirarle la bolsa plástica que trae del vivero sin dañar el pilón de sustrato y las raíces (Arvelo Sánchez et al., 2017). Seguidamente el hoyo se llena hasta la mitad con una mezcla de suelo y materia orgánica como lombrinaza, y sobre ella se ubica la planta, en el centro, de tal manera que sobresalga del borde superior del hueco, para luego llenar con suelo superficial, el cual se apisona ligeramente alrededor de la plántula para evitar encharcamientos por exceso de agua en invierno que afecten su buen estado fitosanitario. El tallo y las hojas del injerto se deben orientar hacia el occidente en lotes planos o en dirección de la pendiente cuando se trasplanta en lotes inclinados.

Después de ubicada la planta en el sitio definitivo, se recomienda repicar alrededor para descompactar y mejorar la porosidad del suelo, con el fin de facilitar el desarrollo del sistema radicular en profundidad, además de fertilizar con suficiente materia orgánica, previa aplicación de cal dolomita para minimizar el pH o grado de acidez del suelo. Igualmente, se aconseja colocar residuos de la biomasa vegetal de las arvenses o malezas para conservar la humedad del terreno en época de verano, mejorar la infiltración y evitar salpicaduras de gotas de agua en las hojas bajeras (Aranzazu Hernández, 2003; Palencia Calderón, 2005).

En el departamento de Boyacá se recomienda sembrar el cultivo de cacao al inicio de la época de invierno, que presenta dos periodos marcados de precipitación a lo largo del año, de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, en los municipios de la provincia de Occidente. En la provincia de Oriente se da un periodo seco de diciembre a marzo y una temporada lluviosa que se prolonga durante el resto del año, con máxima

precipitación de junio a julio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [Ideam], s. f.)

Nutrición del cultivo

Para que un elemento nutricional sea esencial debe cumplir con las siguientes reglas fundamentales: 1) que el elemento sea necesario para el óptimo crecimiento y desarrollo de la planta y que su ausencia o deficiencia en el suelo provoque en la planta un síntoma característico; 2) que el elemento no pueda ser sustituido por ningún otro; y 3) que el elemento esté directamente involucrado en el metabolismo de la planta (Pérez Leal, 2017).

Todas las plantas absorben nutrientes que provienen del aire, el agua y el suelo, en proporciones específicas y balanceadas para facilitar la absorción de acuerdo con la intensidad y cantidad de la demanda. Los principales son carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) (Pérez Leal, 2017); seguidos de macroelementos como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); de elementos secundarios como calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), y de microelementos como manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), molibdeno (Mo) y boro (B), aunque todos son esenciales para el desarrollo eficiente del metabolismo fisiológico y claves para la producción y rentabilidad de las cosechas (tabla 8) (López Báez et al., 2015).

Tabla 8. Elementos químicos esenciales para el crecimiento y desarrollo de la mayoría de las plantas

<table>
<tr><th colspan="3">Elementos esenciales para todas las plantas</th><th>Para algunas</th></tr>
<tr><td colspan="2">Extraídos en cantidades relativamente grandes</td><td colspan="2">Extraídos en cantidades relativamente pequeñas</td></tr>
<tr><td>Tomados del aire o el agua, como CO_2</td><td colspan="2">Tomados de los sólidos del suelo</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">Carbono (C)
Hidrogeno (H)
Oxígeno (O)</td><td>Nitrógeno (N)</td><td>Hierro (Fe)</td><td rowspan="6">Cloro (Cl)
Sodio (Na)
Silicio (Si)</td></tr>
<tr><td>Fósforo (P)</td><td>Manganeso (Mn)</td></tr>
<tr><td>Potasio (K)</td><td>Molibdeno (Mo)</td></tr>
<tr><td>Calcio (Ca)</td><td>Boro (B)</td></tr>
<tr><td>Magnesio (Mg)</td><td>Cobre (Co)</td></tr>
<tr><td>Azufre (S)</td><td>Zinc (Zn)</td></tr>
</table>

Fuente: Navarro Blaya y Navarro García (2000)

La planta de cacao fisiológicamente se desarrolla muy bien en suelos con un rango de acidez de 5,5 a 6,5. Esta propiedad química aporta información básica para saber cuál es el potencial productivo del terreno, y permite estimar la disponibilidad de los nutrientes esenciales y el grado de toxicidad de otros (Ministerio de Agricultura del Perú, 2004). Gracias a este pH, los elementos nutricionales que requiere el cultivo están más disponibles para su absorción durante todo el año. Esto no sucede con pH más ácidos, los cuales tienen repercusiones negativas en el rendimiento del cultivo, más acentuadas durante las etapas de floración y formación de la mazorca.

El pH o grado de acidificación del suelo es un proceso dinámico y paulatino que integra factores naturales como propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), clima de la región (precipitación, temperatura, humedad relativa) y factores antropogénicos (manejo del suelo). La velocidad en el incremento de la acidez está relacionada con las prácticas agrícolas (uso indiscriminado de fertilizantes químicos de reacción ácida, lixiviación de nitratos y remoción de cationes por plantas, suministro de abonos orgánicos sin madurar o descomponer, entre otras); por esto, la cal agrícola es la mejor alternativa para reducir dicha velocidad, aunque los costos de esto pueden resultar elevados. Se pueden adoptar otras prácticas agrícolas que ayuden a reducir la tasa de acidificación de los suelos (Espinosa & Molina, 1999).

Un esquema general de fertilización del cultivo de cacao incluye el primer abonado de las plantas con nutrimentos basados en fósforo y nitrógeno a partir del segundo mes de trasplantadas en lote definitivo, y un segundo abonado seis meses después de la siembra. En el segundo año se fertiliza con un incremento de 20 % de las dosis, mientras que a partir del tercero se aumenta 10 %. A partir de este punto, se debe fertilizar después de la poda aumentando anualmente 10 % las dosis de la fórmula completa de potasio y microelementos esenciales, la cual se basa en los resultados del análisis químico del suelo en su etapa productiva, etapa que se caracteriza por un requerimiento de mayores cantidades de nutrimentos esenciales. La aplicación se debe hacer preferiblemente al inicio de los periodos de invierno en la región (Arvelo Sánchez et al., 2017).

El análisis de suelo suministra las bases para establecer las dosis de correctivos de acidez (cal), abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis química que se deben aplicar de acuerdo con el pH; y también para elevar o mantener los niveles de nutrientes según los requerimientos del cultivo y la disponibilidad en el suelo, con el fin de obtener el mejor retorno económico posible. Existen tablas preparadas por regiones, con recomendaciones de corrección y abonado basadas en el análisis de suelo (Van Raij, 2011). La tabla 9 es un ejemplo de las tablas que existen para el caso colombiano y que indican el nivel de nutrientes que se debe aplicar (León Moreno et al., 2019).

Tabla 9. Descripción de las cantidades mínimas de nutrientes disponibles en la mayoría de los suelos cacaoteros de Colombia

Acidez (pH)	Materia orgánica (MO)	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Aluminio (Al)	CICe*	Saturación en %			
	%	µg/g	cmolc/kg					Al	Ca	Mg	K
5	3	12	0,2	4	1	<1,5	6	<20	>60	>20	>5
* Capacidad de intercambio catiónico efectiva											

Fuente: León Moreno et al. (2019)

La tabla 9 muestra los niveles mínimos requeridos en el suelo para el establecimiento del cultivo de cacao. Es importante, por tanto, analizar en laboratorio las propiedades químicas del suelo, con el fin de obtener la disponibilidad de los elementos nutricionales, y así poder realizar planes de fertilización acordes con las diferentes fases fenológicas del cultivo y sus recomendaciones técnicas. Se pueden incluir abonos orgánicos bien maduros o fertilizantes de síntesis química como estrategia para estimular el desarrollo de plantas de cacao sanas, vigorosas y productivas.

Sustratos esenciales para la producción de clones de cacao en etapa de vivero

Para la siembra y establecimiento de plantaciones de cacao, se debe iniciar con el diseño y montaje del vivero, es decir, con el modo como se acondicionará el sitio para la siembra, crecimiento, injertación y manejo fitosanitario (insectos plaga y enfermedades) e integrado de las plántulas clonadas de cacao, hasta que tengan la edad adecuada para ser trasplantadas al lote definitivo (Piñuela et al., 2013). El vivero es el sitio acondicionado para mantener la calidad genética del material de cacao.

El sustrato es el material de soporte que se emplea para que la semilla germine y la plántula desarrolle el sistema radicular adecuadamente. Se compone de una mezcla de 50 % de suelo, 25 % de arena (que proporciona las condiciones físicas adecuadas para la aireación, para la capacidad de retención de humedad, para el intercambio de gases en la raíz y para el buen drenaje), y 25 % de materia orgánica bien compostada (que aporta nutrientes a la plántula en sus primeros estados de desarrollo fenológico) (Abarca Mongue et al., 2002). Esta relación equivale en la preparación a tres partes de suelo por una parte de arena y una de materia orgánica. La interacción de estos elementos asegura el desarrollo y crecimiento óptimo del sistema radicular de la planta (Irigoyen & Cruz, 2005). Se puede enriquecer con la adición de microorganismos como micorrizas, *Rhizobium* sp. o *Trichoderma* sp. (Ramírez, 2006).

El suelo para el sustrato debe ser de textura franco-arenosa o franco-arcillosa, con materia orgánica bien compostada y mineralizada (que aporta nutrientes y mejora la retención de humedad) y arena de río cuyo diámetro de partícula sea de 0,5 a 2 mm, ya que si tiene de 0,25 a 0,50 mm o de 0,05 a 0,25 mm se puede cementar con el suelo, lo cual aumenta la compactación y altera el grado de porosidad, con efectos adversos en el crecimiento y desarrollo del sistema radicular (tabla 10) (Abarca Monge et al., 2002). El suelo y la arena se tamizan con malla de poro de 5 mm^2 para eliminar materiales extraños (gravas, gravilla, tallos, raíces grandes, entre otros) que afecten el crecimiento de la raíz de la planta (Irigoyen & Cruz, 2005).

Un buen sustrato debe tener las siguientes características (Abarca Monge et al., 2002):

1. ***Mullido y permeabilidad:*** Para evitar la saturación de humedad, que afecta el desarrollo del sistema radicular de la planta.
2. ***Capacidad de retención de agua:*** Para que conserve la humedad adecuada, que incentiva el desarrollo de las raíces y mejora la disponibilidad de nutrientes.
3. ***Estructura granular estable:*** Garantiza la distribución uniforme de los nutrientes necesarios para el desarrollo normal de la planta.
4. ***Capacidad de almacenamiento e intercambio de nutrientes:*** Esta propiedad la aporta la materia orgánica compostada, porque permite el intercambio de nutrientes entre la fase sólida y líquida necesario para el crecimiento y desarrollo de la plántula.
5. ***Libre de microorganismos patógenos y semillas de malezas o arvenses:*** La presencia de microorganismos puede ocasionar enfermedades fungosas en las raíces, mientras que las semillas de arvenses compiten por espacio y nutrientes con la plántula.
6. ***El pH del sustrato ideal:*** El grado de acidez debe estar entre 5,5 y 6,5. Si es menor que 5,5, ocasiona deficiencias nutricionales de N, K^{1+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} y B, y si es mayor que 6,5, bloquea la disponibilidad de Fe, P, Mn, Zn y Cu. Para corregir el pH del suelo se recomienda aplicar un kilogramo de cal por un metro cúbico de sustrato, lo cual aumenta de 0,3 a 0,5 unidades por metro cúbico. Los sustratos de origen orgánico presentan un alto poder de compensación de las variaciones de pH (Abarca Monge et al., 2002).
7. ***Desinfección del suelo:*** Para evitar la presencia de microorganismos patógenos, nematodos y semillas de arvenses en el sustrato, se recomienda desinfectar el suelo mediante el método de solarización, que consiste en extender capas de sustrato de 20 a 30 cm de altura, tapar con plástico negro calibre 6, y dejar a plena exposición solar entre 30 y 45 días, tiempo estimado para subir la temperatura del suelo de forma acumulativa a un rango de 30 °C a 50 °C, para controlar organismos patógenos de manera natural (Arboleya, 2018).

Con el sustrato preparado se llenan bolsas plásticas de polietileno con capacidad de almacenamiento de unos 2,5 kg, diámetro de 10 cm por 30 cm de alto y 2,5 cm de espesor en cada lado del fuelle. Las bolsas se llenan inicialmente hasta la mitad y se colocan sobre una base plana y firme; luego se oprime el sustrato con los dedos para eliminar los espacios de aire, se continúa llenando con sustrato hasta el borde superior y se repisa hasta dejar el sustrato a un centímetro del borde de la bolsa.

Tabla 10. Niveles óptimos en las propiedades físicas y fisicoquímicas de un sustrato para la siembra de plántulas de cacao en vivero

Parámetro	Unidad	Valor
Propiedades físicas del sustrato		
Textura del suelo	Francos o franco-arenosos	
Arena (tamaño de partícula)	mm	0,25-0,50
Densidad aparente	g/cm^3	Menor de 0,75
Densidad real	g/cm^3	1,45-2,65
Espacio poroso total	% en volumen	Mayor de 85
Capacidad de aireación	% en volumen	20-30
Agua fácilmente disponible	% en volumen	20-30
Agua de reserva	% en volumen	04-10
Capacidad de retención de agua	mL/L sustrato	600-1.000
Capacidad de retención de agua	%	55-70
Propiedades químicas del sustrato		
pH		5,2-6,5
Materia orgánica	% en volumen	20-50
Capacidad de intercambio catiónico (CIC) ideal con fertirriego ocasional	meq/100g	superior a 20
Conductibilidad eléctrica (CE) apropiada	mS/cm	0,75-3,5

Fuente: Elaboración propia con base en Martínez y Roca (2011)

Requerimientos nutricionales de plántulas de cacao en vivero

La tierra o sustrato utilizado para vivero debe pasar por un proceso de solarización con el fin de eliminar semillas de malezas o algunos patógenos. La preparación debe tener una relación de tierra, arena y materia orgánica de 3:1:1. Es necesario verificar el pH y si este es inferior a 5,5 es necesario aplicar correctivo como cal dolomita. Después de cernir se debe aplicar oxicloruro de cobre en una relación de 15 gramos por litro de agua y luego realizar el embolsado (Agudelo Castañeda et al., 2021).

Para evitar que las plántulas en vivero presenten deficiencias de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg, Fe, y B, se pueden aplicar fertilizantes de síntesis química conformados por los elementos mayores N (grado 10), P (grado 30), K (grado 10) y DAF, en dosis de 2 g por planta. La aplicación se debe hacer por el borde de la bolsa, retirada del tallo de la planta para evitar que este se queme, con el fertilizante diluido en agua mediante la técnica drench, lo cual también disminuye el riesgo de quemar las plantas (Vera Chang et al., 2016).

Fertilización del sistema agroforestal con cacao

La rentabilidad del sistema productivo de cacao depende de la interacción entre la inversión de los costos de siembra, el establecimiento del cultivo y la producción de la cosecha en kilogramos de grano seco por hectárea. Una buena rentabilidad se logra mediante la implementación de un plan de fertilidad como actividad fundamental para mantener las plantas sanas y vigorosas durante la mayor parte del año. Para esto, se recomienda hacer análisis cada dos años de las propiedades químicas del suelo cultivado, con el fin de diseñar, planificar y programar un plan de fertilización acorde con la interacción entre el requerimiento de la planta en su etapa fisiológica de desarrollo y la disponibilidad y aportes del suelo.

Para mejorar la producción y rentabilidad del sistema productivo de cacao se recomienda el uso de prácticas de fertilización que minimicen las pérdidas o mejoren el equilibrio de los nutrientes en el suelo. La fertilización se debe basar en el análisis de los resultados obtenidos en laboratorio de las propiedades químicas del suelo, y en el potencial productivo deseado de la planta según su estado de desarrollo y fase fenológica. El plan debe combinar el uso de fertilizantes orgánicos bien compostados con fertilizantes de síntesis química, lo cual integra los componentes biológicos y químicos del perfil del suelo. En algunos casos se recomienda el encalado, que resulta crítico para la buena absorción de nutrientes en suelos muy ácidos, así como el empleo de medidas adecuadas para reponer los nutrientes agotados en el suelo (Arvelo Sánchez et al., 2017).

Algunos estudios sobre requerimiento nutricional del cultivo reportan que la planta de cacao aumenta su velocidad y cantidad de absorción de elementos nutricionales de acuerdo con el tipo de nutriente, edad, estado productivo y etapa fenológica. Entre estos nutrimentos sobresale el nitrógeno, cuya tasa de asimilación aumenta en las primeras etapas de crecimiento y desarrollo vegetativo, pero disminuye a partir del quinto año de siembra, cuando inicia la fase productiva de cosecha. Esto contrasta con el potasio y el magnesio, que aumentan paulatinamente a partir del quinto año, con un mayor incremento en el décimo año. Independientemente de las condiciones fisicoquímicas del suelo y de las necesidades nutricionales del cultivar, se considera menor el requerimiento en estado de plántula que en etapa adulta a partir del décimo año, siendo esta última la etapa en la que se obtiene la mayor producción (López Báez et al., 2015; Snoeck et al., 2016).

A partir del primer año de sembrado el cultivo, se recomienda aplicar anualmente cal dolomita, para corregir el grado de acidez reportado por el análisis químico de suelo. De manera general se sugiere aplicar de 200 a 400 gramos de cal dolomita, distribuidos en dos aplicaciones durante los periodos de lluvia.

Como la mayoría de los suelos cacaoteros de Boyacá presenta problemas de acidez que limitan la disponibilidad de nutrientes, se pueden emplear enmiendas o correctivos de acidez, cuyas dosis se aplican según la

recomendación del asistente técnico de la región, de acuerdo con el análisis del laboratorio de las características químicas del suelo. Se debe suministrar la dosis de cal en forma de corona alrededor de la planta si el lote es plano o en forma de media corona si es pendiente. También se puede incorporar a unos 5 cm de profundad del suelo por todo el borde de la sombra que proyecta la copa en el suelo. Estas aplicaciones se hacen al inicio del periodo de lluvias (Mejía Flórez & Argüello Castellanos, 2000).

Para aplicar los correctivos de acidez y las dosis de fertilizantes de síntesis química en lotes planos, se sugiere realizar control manual de arvenses hasta la sombra que proyecta la copa, para incentivar el desarrollo del sistema radicular. En terrenos inclinados se deben hacer terrazas del ancho de la copa en la parte superior del tallo, con el fin de mejorar el anclaje y el desarrollo vertical del tallo.

Estudios de laboratorio realizados por Castilla et al. (2011) sobre el aporte y la disponibilidad de nutrimentos en los suelos cacaoteros de Colombia, permiten concluir que estos presentan un valor promedio de pH o grado de acidez de 5,2, lo que se considera fuertemente ácido; y un 40 % de aluminio, que es un contenido alto. Los estudios también indican que 76 % de los suelos presentan bajos contenidos de materia orgánica, lo que se refleja en una baja disponibilidad de nutrientes y una baja producción del cultivar.

De igual forma se evidenció que 49 % de los suelos presentan deficiencias de fósforo debido al grado de acidez, y que 85 % de ellos tienen deficiencias de potasio, elemento que más necesita el cultivo (Castilla et al., 2011). Esto permite afirmar que, si el potasio no se aplica como fertilizante de síntesis química, los rendimientos de las plantaciones no van a superar los 500 kg/ha (León Moreno et al., 2019).

Debido a que el análisis en laboratorio de las propiedades químicas del terreno constituye la etapa más importante para determinar si el lote reúne las mínimas condiciones de siembra, se recomienda hacer un muestreo preliminar mediante la toma de 20 a 30 submuestras por hectárea, las cuales se mezclan entre sí lo más homogéneamente posible para obtener una muestra representativa de todo el lote de mínimo

1 kg de suelo. La mezcla de submuestras se hace porque entre lotes se presentan variaciones de las propiedades que de cierta manera influyen en el rendimiento homogéneo de la cosecha, algo que los productores reconocen basados en su conocimiento empírico. Las submuestras identifican la variabilidad de todas las características de terreno que influyen en el desarrollo y producción de la cosecha.

Para obtener un buen análisis de laboratorio se deben tener en cuenta aspectos como los siguientes: 1) la muestra compuesta debe ser una mezcla de varias submuestras tomadas al azar según la topografía del lote; 2) se debe hacer el análisis en un laboratorio certificado; 3) es importante cumplir con los requisitos y tiempos que pide el laboratorio para la toma y envió de la muestra; 4) el plan de fertilidad se debe trazar de acuerdo con el contenido nutricional del suelo y según el requerimiento de la planta y su desarrollo fenológico; y 5) es importante hacer análisis preliminares de fertilización, para generar un programa de nutrición acorde con las metas de producción de la cosecha.

Un plan de manejo de la fertilidad del cultivo se debe basar en los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio de las propiedades químicas del suelo. Entre estas propiedades sobresalen el pH o grado de acidez intercambiable (Al + H); la presencia de aluminio (Al), de elementos mayores (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y azufre) y menores (hierro, cobre, manganeso, zinc y boro); la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y la conductividad eléctrica (CE). El análisis de suelo asegura la inversión que realiza el agricultor, ya que le permite conocer la cantidad exacta de fertilizante que se necesita para una excelente producción (Arévalo de Gauggel & Castellano, 2009).

Pasos para el muestreo de suelos

Para el muestreo de suelos en el lote cultivado se debe hacer a mano alzada un croquis del lote, a fin de demarcar las áreas por condiciones y forma del relieve (zonas planas y pendientes), identificar los sectores del lote que presentan limitantes para el desarrollo del cultivo (rocas sobre la superficie del suelo, caminos, ríos, entre otros), y establecer algunas propiedades físicas (diferencias de color; contenidos superficiales de

arena, arcilla o limo; grado de humedad, entre otras). Este reconocimiento permite al productor definir la cantidad de muestras que tomará y diseñar el patrón de recorrido para recoger submuestras en todo el campo (como ya se mencionó, las submuestras se mezclan para obtener una sola muestra compuesta de aproximadamente 1 kg, que se envía para análisis al laboratorio de química de suelos) (Schweizer Lassaga, 2011). El reconocimiento, una vez hecho el análisis, también permite definir la práctica de preparación y conservación del terreno, y establecer un plan de manejo de fertilización de forma independiente para cada zona identificada.

Se aconseja hacer el análisis químico de suelos cada dos años, con suficiente antelación para diseñar el plan de manejo de fertilización y agronómico del cultivo, preferiblemente de uno a tres meses antes de la siembra de los sombríos transitorios y permanentes, o entre cada encalada y fertilización del cultivar. No se debe muestrear después de hacer una tala o quema de rastrojo (en caso de que se practique) o de aplicar agroquímicos ya que en estos casos el resultado no es confiable dado que se han alterado las propiedades naturales del terreno. Se sugiere tomar las muestras cuando el terreno tenga buena humedad (de uno a dos días después de una lluvia o suministro de riego) para poder mezclar las submuestras y obtener una muestra compuesta homogénea (Schweizer Lassaga, 2011). Todas las submuestras se deben tomar en los primeros 30 cm de profundidad, ya que esta es la zona del suelo donde la planta tiene el mayor contenido de raíces

AGROSAVIA cuenta con un laboratorio que realiza análisis de suelo para análisis tanto físico-químico como de contenido de metales pesados y con ayuda de una empresa de mensajería permite la recepción directa y el envío de la muestra para análisis. Para la recolección de la muestra de suelo se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones: 1) las submuestras se toman del suelo de manera aleatoria a una profundidad de máximo 30 cm (zona donde la planta tiene el mayor contenido de raíces) mediante un recorrido del lote en forma de X, W, zigzag o cuadrícula (figura 35); 2) para tomar las muestras se deben emplear herramientas acordes con el grado de humedad del suelo, tales como palas, palines, paladragas, barras, barretones o barrenos muestreadores (holandés, uhland, en espiral); 3) las submuestras (de 20 a 30) se recolectan de los

bordes de los hoyos y con ayuda de un elemento cortante desinfectado se eliminan sus bordes; 4) las submuestras se depositan en balde plástico y allí se limpian de impurezas y se mezclan lo más homogéneamente posible para obtener una muestra de 1.000 gramos; 4) la muestra final se empaca en bolsa plástica (suministrada por la empresa de mensajería, en caso de que el análisis se haga con AGROSAVIA) debidamente rotulada (tabla 11) con marcador o marbetes para su identificación y posterior envío al laboratorio de análisis químico de suelos (AGROSAVIA, 2022a).

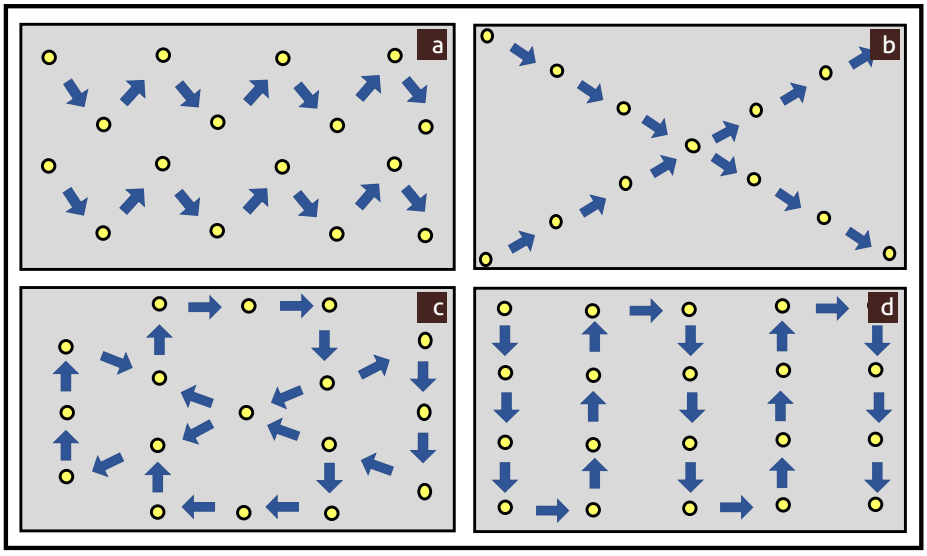


Figura 35.

Ejemplos de patrones de recorrido para toma de submuestras de suelo. a. Muestreo en zigzag; b. Muestreo en diagonal; c. Muestreo en forma dirigida; d. Muestreo dirigido en curvas.

Fuente: Elaboración propia con base en Schweizer Lassaga (2011)

Se recomienda no tomar submuestras en zonas aledañas a instalaciones agrícolas como bodegas, módulos de compostaje, viveros, establos, cocheras, galpones; próximas a viviendas, talleres de finca, caminos, quebradas, o en lotes recién talados, quemados o fertilizados con abonos orgánicos o fertilizantes de síntesis química. Las herramientas deben estar secas, limpias, sin residuos de tierra, abonos, fertilizantes, entre otros (Lizcano Toledo et al., 2017).

Tabla 11. Ejemplo de etiqueta con la descripción de los principales datos que debe llevar la muestra que se envía el laboratorio de química de suelos

Datos que debe contener la etiqueta que se le coloca a la muestra de suelo	
Tipo de análisis:	
Departamento:	
Municipio:	
Vereda:	
Finca:	
Propietario:	
Número telefónico:	
Correo electrónico (si lo tiene):	
Altura de la finca (m s. n. m.):	
Cultivo:	
Edad del cultivo:	
Profundidad de toma de la muestra (cm):	
Topografía de la finca (plana, ondulada o pendiente):	
Drenaje de la finca (bueno, regular o malo):	
Tipo de riego (aspersión, goteo, manguera, inundación, etc.):	
Fertilizantes aplicados recientemente:	
Cómo considera la producción de su cultivo (buena, regular, mala):	

Fuente: Elaboración propia

Solicitud de análisis

Existen varios tipos de análisis que pueden ser solicitados al laboratorio. Sin embargo, desde el punto de vista práctico y para obtener información adecuada sobre el estado de fertilidad de un suelo para el establecimiento de un cultivo de cacao o el mantenimiento de su productividad, se puede solicitar un análisis de caracterización (terminología usada por los laboratorios de suelos de AGROSAVIA), que provee la siguiente información:

textura, pH, materia orgánica, fósforo disponible, cationes intercambiables (calcio, potasio, magnesio y aluminio), y capacidad de intercambio catiónico. Además de lo anterior, se deben solicitar elementos menores (Fe, Cu, Mn, Zn, B), azufre y los micronutrientes cobre y zinc, que generalmente son deficientes en los suelos colombianos. Se recomienda contar con la asesoría de un ingeniero agrónomo, agrícola, agroforestal, o de un profesional especializado en edafología para que realice la interpretación de los resultados de laboratorio y genere una recomendación de fertilización acorde con los requerimientos nutricionales del cultivo.

Interpretación del análisis de suelos

Con los resultados del análisis de laboratorio, se diseñan planes para la aplicación de correctivos de acidez, abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis química, basados en tablas diseñadas especialmente para las regiones (tabla 12) (ICA, 1992).

Tabla 12. Interpretación de la fertilidad de suelos cacaoteros de Colombia

Resultados del análisis de suelos			
Clasificación	MO (%)	P (ppm)	K (meq/100 g)
Bajo	<2	<15	<0,25
Medio	2-3	15-30	0,25-0,45
Alto	>3	>30	>0,45

Fuente: ICA (1992)

Interpretación del pH o grado de acidez del suelo (reacción del suelo)

La interpretación del grado de acidez o pH del suelo se estima en el laboratorio, después de determinar el grado de acidez o alcalinidad con el uso de un potenciómetro (tabla 13) (Arévalo de Gauggel & Castellano, 2009).

Tabla 13. Rango para la interpretación del pH o grado de acidez de los suelos agrícolas

Rango	Interpretación
<4,4	Extremadamente ácido
4,5 a 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 a 5,5	Fuertemente ácido
5,6 a 6,0	Moderadamente ácido
6,1 a 6,5	Ligeramente ácido
6,6 a 7,3	Neutro
7,4 a 8,0	Medianamente alcalino
8,5 a 9,0	Fuertemente alcalino
>10	Extremadamente alcalino

Fuente: Arévalo de Gauggel y Castellano (2009)

El pH del suelo es un parámetro básico para interpretar la fertilidad del terreno que se va a cultivar. Es un buen predictor para visualizar el desarrollo y la producción de la mayoría de los cultivos (Snoeck et al., 2016). El rango óptimo para el cultivo de cacao es de 5,5 a 7,5; por debajo de 5,5 aumenta la toxicidad por la presencia de aluminio, el cual, cuando se acumula en el sistema radicular, inhibe la absorción y translocación de fósforo y calcio a la parte aérea de la planta, e igualmente limita la absorción y disponibilidad de elementos nutricionales para la mayoría de los cultivos, aunque hay reportes de materiales tolerantes a suelos ácidos (Snoeck et al., 2016).

En la figura 36 se explica qué suelos con pH ácidos, en el rango de 4,5 a 5,5, presentan poca disponibilidad de los nutrimentos N, P, K, S, Ca, Mg, y altos contenidos de los elementos menores Fe, Mn, B, Cu y Zn. A medida que el pH pasa de 5,5 a 7,0, aumentan los contenidos de la mayoría de las nutrientes, a tal punto que este rango se considera el ideal para los suelos cacaoteros. Sin embargo, a partir de 7,5 bajan los contenidos de los elementos menores Fe, Mn, B, Cu y Zn, que son indispensables para mejorar la producción y rentabilidad del cultivar (Castellanos, 2000, citado por Lizcano Toledo et al., 2017).

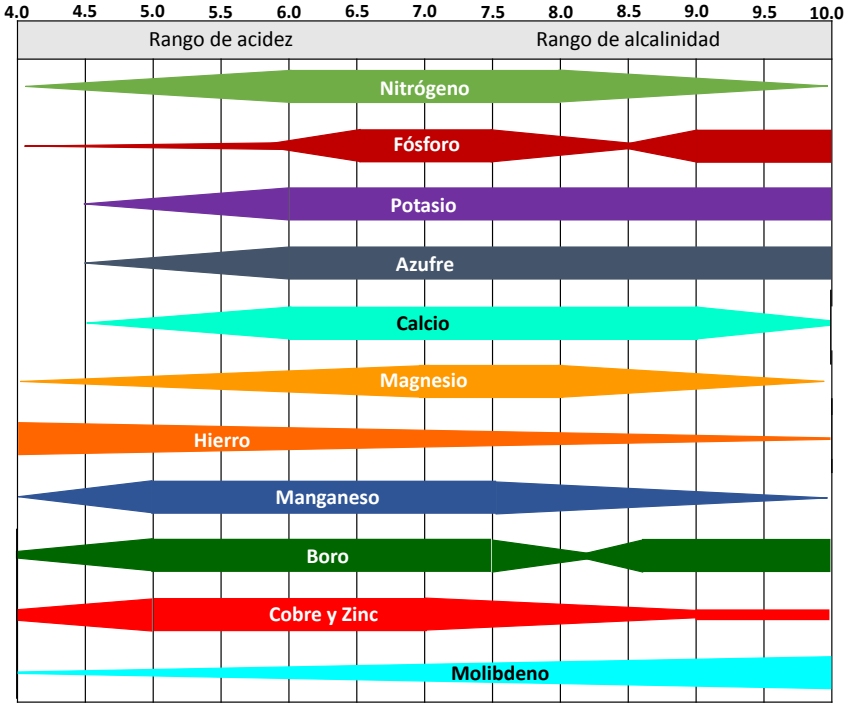


Figura 36.

Disponibilidad de nutrientes según pH o grado de acidez del suelo.

Fuente: Proain Tecnología Agrícola (2022)

Elementos nutricionales como nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio se movilizan por el floema, pero cuando baja su disponibilidad, se translocan de las hojas maduras a las jóvenes y los tejidos viejos presentan sus deficiencias. Debido a que los iones de calcio, manganeso, hierro y boro no se transportan por el floema a las hojas jóvenes, su deficiencia se evidencia en estas últimas, lo que contrasta con las maduras, que presentan altas concentraciones (Barbazán, 1998).

El azufre, cobre y zinc permanecen en el tejido viejo, pero cuando baja el suministro, se translocan al tejido joven, y es en estas donde puede apreciarse visualmente su deficiencia. Su reconocimiento requiere de experiencia para diferenciar sus señales de los síntomas de insectos plaga, enfermedades, senescencia del tejido o mala práctica en el manejo integrado del cultivo (Barbazán, 1998). La tabla 14 describe la disponibilidad de nutrientes de acuerdo con el pH o el grado de acidez del suelo.

El manejo integrado del sistema productivo de cacao está relacionado con las condiciones edáficas del suelo cultivado y los requerimientos nutricionales de la planta en las diferentes etapas de crecimiento y desarrollo productivo. Sin embargo, en Colombia hay pocos estudios de investigación que relacionen la interacción entre las necesidades básicas de nutrición con la productividad según el genotipo de cacao y las condiciones fisicoquímicas del suelo cultivado. Este vacío se refleja en la falta de recomendaciones sobre labores culturales como diseño de planes de aplicación de abonos orgánicos, correctivos de acidez y fertilizantes de síntesis química (Espinal et al., 2005). En la actualidad, se estima que 15 % de las plantaciones se han establecido con clones seleccionados por producción, tolerancia o resistencia fitosanitaria (tabla 14) (Fedecacao, 2013).

Tabla 14. Rangos óptimos de disponibilidad de nutrientes en suelos de acuerdo con el grado de acidez

Nutriente	pH óptimo del suelo	Factores que mejoran o reducen la disponibilidad del nutriente	
		Mejoran	Reducen
Nitrógeno	6-8	Presencia de bacterias	Alta humedad
		Aireación del suelo	Suelos arenosos
		Temperatura del suelo	
		Materia orgánica	
Fósforo	6,5-7,5	Calcio (Ca)	Exceso de aluminio (Al)
		Intercambio aniónico	Exceso de hierro (Fe)
		Microrganismos	
		Materia orgánica	
Potasio	Superior a 6	Materia orgánica	Exceso de calcio (Ca)
		Textura	Exceso de magnesio (Mg)
		Suelos arcillosos	
		Arcillas tipo 2:1	
		Humedad del suelo	

Continúa

Continuación tabla 14

Nutriente	pH óptimo del suelo	Factores que mejoran o reducen la disponibilidad del nutriente	
		Mejoran	Reducen
Calcio	Superior a 7	Materia orgánica	Precipitación pluvial excesiva
		Humedad del suelo	Lixiviación
		Aplicaciones de cales agrícolas	Exceso de magnesio (Mg)
			Exceso de potasio (K)
Magnesio	7-8.5	Aireación del suelo	Exceso de calcio (Ca)
		Materia orgánica	Exceso de potasio (K)
Boro	5-7	Materia orgánica	Sequía
		Exceso de cal	Suelos arenosos
Manganeso	5-6,5	Materia orgánica	Exceso de humedad
		Humedad del suelo	Exceso de potasio (K)
		Microorganismos	Exceso de cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn)
			Suelos con pH alcalinos
Hierro	Inferior a 6	Materia orgánica	Exceso de cal
		Minerales ricos en hierro (Fe) soluble	Exceso de magnesio (Mg), cobre (Cu) y zinc (ZN)
		Niveles elevados de nitratos y fosfatos	
Zinc	5-7	Materia orgánica	Suelos arenosos
		Presencia de microorganismos	Lixiviación
		Suelos arcillosos	Exceso de fósforo (P) en el suelo
		Contenido de materia orgánica	Exceso de fósforo (P) en los fertilizantes
		Humedad del suelo	Exceso de hierro (Fe)
Azufre	Superior a 6	Materia orgánica	pH menores de 5,5
		Presencia de microrganismos	Puede lavarse en suelos arenosos
		Buen drenaje	

Fuente: Elaboración propia a partir de Lora Silva (2001)

Fertilización en la etapa productiva de la planta

La fertilización del cultivo se debe aplicar cuando las condiciones edáficas y tecnológicas no cumplan con la demanda nutricional de la planta. Sin

embargo, los planes de fertilidad de abonos orgánicos y de fertilizantes químicos, por más ajustadas que tengan las dosis a los requerimientos del cultivo y a los resultados del análisis de suelo, no resuelven limitantes derivadas del manejo integrado del cultivo tales como plagas, enfermedades, renovación de plantaciones, entre otras, así como problemas inherentes a las épocas y formas de aplicar los fertilizantes, los abonos orgánicos y las enmiendas para corregir la acidez del suelo.

La producción y rentabilidad del cacao se pueden doblar o triplicar cuando se llevan a cabo planes de mejoramiento tecnológico que incluyen empleo de materiales mejorados, suministro de agua por riego, podas de manejo y programas de abonamiento afines con la demanda y las etapas fenológica y productiva del cultivo. El cacao necesita de los nutrimentos en abundante cantidad y su requerimiento es mayor en los casos de potasio, nitrógeno, calcio, fósforo, magnesio y azufre, cuyas dosis se deben aplicar de forma fraccionada entre tres y cuatro veces al año (tablas 15 y 16) (Amores, 2008).

Tabla 15. Cantidad estimada de nutrientes absorbidos por la planta de cacao en diferentes etapas de desarrollo

Estado desarrollo	Edad de la planta (meses)	Requerimiento nutricional medio en kg/ha							
		N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Total
Vivero	5-12	2,4	0,6	2,4	2,3	1,1	0,04	0,01	8,85
Establecimiento	28	136	14	151	113	47	3,9	0,5	513
Inicio producción	39	212	23	321	140	71	7,1	0,9	775
Plena producción	50-87	438	48	633	373	129	6,1	1,5	1.629

Fuente: Elaboración propia a partir de Figueroa Guevara (2012)

Muchos de los nutrimentos utilizados por la planta se retiran del terreno cuando se cosechan las mazorcas con sus respectivos granos de cacao. Sin embargo, otros vuelven al suelo cuando se descomponen las hojas, tallos, flores, frutos, cacotas, y residuos de podas y limpias de malezas que caen al terreno. De otra parte, los suelos cacaoteros de Boyacá no tienen las cantidades suficientes de nutrimentos que la planta necesita

para dar una buena cosecha sin agotar las reservas de estos elementos. Para compensar estas necesidades se deben aplicar abonos orgánicos y fertilizantes químicos que compensen los requerimientos del cultivar y las pérdidas por extracción y recolección de la cosecha (tabla 16).

Tabla 16. Principales nutrientes removidos por tonelada de semilla y de cacota de cacao

Parte vegetal analizada	kg/ha						g/ha				
	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	S	Fe	Cu	Mn	Zn	B
Almendra	15,80	7,30	8,90	3,60	3,70	1,20	50,30	16,80	17,60	33,80	20,60
Cacota	9,10	2,50	39,40	8,70	4,30	1,50	32,50	8,80	58,70	35,90	28,80
Placenta	0,40	0,10	0,70	0,20	0,10	0,00	3,50	0,40	0,40	0,70	0,90
Total	25,30	9,90	49,0	12,50	8,10	2,70	86,30	26,00	76,70	70,40	50,30

Fuente: Amores (2008), Figueroa Guevara (2012)

La extracción de nutrientes por el cultivo de cacao depende de los clones establecidos (Rosas-Patino et al., 2019; Souza Junior et al., 2018), y de las localidades (Souza Junior et al., 2018). Una investigación realizada en Miranda (Cauca) sobre la respuesta de cuatros clones a diferentes dosis de fertilidad sugiere que cada material tiene un requerimiento básico de fertilización (tabla 17) (Puentes Páramo et al., 2014).

Tabla 17. Extracción de nutrientes (kg/t de grano seco) en clones de cacao con aplicaciones de nitrógeno, fósforo y potasio

Clon	N	P	K
CCN 51	21,88	4,72	11,11
ICS 95	23,57	6	15,95
TSH 565	20,6	5,01	10,76
ICS 39	23,1	4,95	13,58

Fuente: Puentes Páramo et al. (2014)

Por otra parte, algunas investigaciones sobre nutrición vegetal abordan el tema de las interacciones entre los nutrientes, que suceden cuando un nutrimento afecta la absorción, distribución o función de otro, en lo que se conoce como "antagonismo" y "sinergismo". Estas interacciones producen desequilibrios fisiológicos nutricionales que se manifiestan en los órganos de las plantas. El antagonismo entre nutrientes sucede cuando el nivel de concentración de un elemento reduce la absorción de otro (tablas 18 y 19) (Intagril, 2015).

Tabla 18. Factores que promueven o limitan la disponibilidad del nitrógeno en el suelo y estrategias de manejo

Factores y procesos que limitan la disponibilidad	Estrategias para optimizar el manejo y mejorar la eficiencia del nutriente
Nitrógeno (N)	
Suelo con bajos contenidos de materia orgánica (MO).	Incorporación de MO para activar los procesos biológicos del suelo.
Suelos extremadamente ácidos (pH <5,5): baja la tasa de mineralización.	Adecuación de la acidez del suelo a pH de 5,5 a 7,5 mediante encalado.
Suelos con pH básicos tienen mayor volatilización.	
Suelos secos: ocasionan estrés hídrico.	Labranza de conservación para mejorar la circulación de aire y agua internamente.
Suelos inundados: ocasionan mal drenaje en su interior.	
Lixiviación: en suelos muy arenosos y pobres en MO. Inmovilización: nutrientes tomados por los microorganismos o aplicación de MO fresca. Erosión: por escorrentía o por suelos compactados.	Labranza de conservación. Aplicación de abonos verdes. Rotación de cultivos. Devolver al suelo los nutrientes tomados por la cosecha anterior. Manejo de la humedad del suelo a capacidad de campo.
Volatilización: pérdida gaseosa de nitrógeno. Zona de clima frío: suelos en climas fríos y con bajas temperaturas.	Aplicación e incorporación fraccionada y localizada de nutrientes.
Suelos muy arcillosos, que fijan el nitrógeno.	Evitar la aplicación de dosis excesivas de fuentes ricas en nitrógeno.

Fuente: Elaboración propia con base en Microfertisa (2018)

Tabla 19. Factores que promueven o limitan la disponibilidad de fósforo y potasio en el suelo y estrategias de manejo

Factores y procesos que limitan la disponibilidad	Estrategias para optimizar el manejo y mejorar la eficiencia del nutriente
Fósforo (P)	
Suelo con bajos contenidos de materia orgánica (MO).	Incorporación de MO para activar los procesos biológicos del suelo.
Suelos extremadamente ácidos (pH <5,5): el fósforo es fijado por complejos de aluminio o hierro.	Adecuación de la acidez del suelo a pH de 5,5 a 7,5 mediante encalado para suelos muy ácidos o yeso para suelos muy básicos.
Suelos básicos (pH >7,5) forman complejos insolubles de calcio.	
Suelos de origen volcánico con altos contenidos de hidróxidos de aluminio y hierro.	Suministro de nutrientes ricos en fósforo en la presiembra y siembra del cultivo.
Suelos muy arenosos: se lixivia el fósforo.	Incorporación de MO para activar los procesos biológicos del suelo.
	Fertilizar el suelo y los cultivos con microorganismos eficientes como las micorrizas.
Potasio (K)	
Suelos arenosos, calcáreos.	Mejorar el pH de suelos para alcanzar un rango de 5,5 a 6,5.
Bajas temperaturas.	Manejo de la humedad del suelo a capacidad de campo.
Fijación por arcillas 2:1. Suelos ácidos, derivados de ceniza volcánica, sódicos y sulfatados. Remoción por los cultivos.	Alta CIC, incorporación de materia orgánica, aplicación de cal.

Fuente: Elaboración propia con base en Microfertisa (2018)

Recomendaciones para la aplicación de correctivos de acidez, abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis química

Para obtener buenas producciones de cacao se aconseja realizar un plan de nutrición vegetal de la planta acorde con las condiciones del suelo y el requerimiento del cultivo en las diferentes etapas productivas, basado en los parámetros que se describen a continuación.

Siembras nuevas

En lotes nuevos se aconseja sembrar las plántulas de cacao en hoyos de 40 × 40 × 40 cm. Como el suelo extraído de los primeros 20 cm de profundidad corresponde al primer horizonte, formado por materia orgánica y nutrientes, esta porción se debe mezclar con mínimo 1 kg de abono orgánico bien compostado (lombricompost), y 200 g de cal dolomita si el suelo es ácido. Esta mezcla se deposita en el hueco, mientras que el resto de tierra se reserva para llenado al momento de la siembra de la plántula en el hoyo. Se recomienda dejar por un mes el hoyo abierto con la mezcla del abono y la cal para que estas fuentes nutricionales se mineralicen y mejoren la acidez del terreno en profundidad (tablas 18 y 19).

Cultivos ya establecidos

En cultivos de cacao sembrados en lotes de topografía plana o ligeramente ondulada, se recomienda aplicar los correctivos de acidez, los abonos orgánicos y los fertilizantes de síntesis química en forma de corona alrededor del tallo, cerca del área de goteo de las ramas del árbol de cacao. En suelos de ladera se sugiere aplicar en media corona por la parte superior de la pendiente. Estas sustancias se suministran debajo de la copa y alrededor de la planta, que debe estar libre de la hojarasca (la hojarasca se emplea como cobertura o tapa de estos productos). Los fertilizantes químicos también se pueden aplicar en hoyos de 5 cm de profundidad abiertos con chuzo de madera con punta en forma de lápiz, y distribuidos en el borde de la gotera de la copa. La cantidad recomendada del producto se dosifica en diferentes huecos, que se tapan con el abono orgánico. Esta forma de aplicación hace que la planta

asimile más rápido el nutriente ya que este queda en contacto directo con la humedad del suelo y el sistema radicular de la planta, con lo cual se disminuyen las pérdidas por evaporación, por transporte y consumo de las hormigas arrieras, por arrastre ocasionado por el agua lluvia, entre otros factores, con repercusiones negativas en los costos de producción y en la baja rentabilidad de la cosecha.

Los fertilizantes se aplican en el área de goteo de la copa porque esta es la zona con mayor concentración de raíces finas. La zona se ubica en el contorno de la copa (borde externo o puntas de las ramas), situada generalmente a una distancia de 0,50 a 1,50 m del tallo, aunque varía según el estado de crecimiento y desarrollo de la planta. Es el área más indicada para aplicar los fertilizantes puesto que en ella el árbol de cacao los aprovecha en mayor cantidad.

Épocas de aplicación

El éxito del programa de fertilización depende de la época de aplicación (invierno o verano), del tipo de fertilizante (edáfico o foliar), de los abonos y enmiendas, así como del momento de mayor demanda del nutriente para el desarrollo y producción del cultivo. Sin embargo, propiedades físicas del suelo como textura, densidad aparente, porosidad y grado de compactación, entre otras, limitan la disponibilidad de estos productos en la planta. Si el suelo es arenoso, tiene mayor cantidad de macroporos y esto lo hace más permeable, sobre todo en zonas de alta precipitación, lo que favorece la pérdida por lavado y lixiviación del fertilizante aplicado, y demanda una corrección, que se logra fraccionando las dosis a lo largo del tiempo y aplicando materia orgánica. Si el suelo es arcilloso, tiene mayor cantidad de microporos, lo que en invierno favorece la retención de agua y en verano provoca endurecimientos y agrietamientos que parten los pelos radiculares y dificultan la absorción de los nutrientes por parte de la planta. Por tanto, un buen suelo es aquel que posee una textura franca, una adecuada permeabilidad, y buen drenaje y poder de retención de agua, todo lo cual garantiza la buena nutrición de la planta.

La fertilización es la práctica más eficiente para que la planta de cacao exprese el potencial genético. Con la fertilización se ponen a disposición

las cantidades de nutrientes esenciales que la planta requiere para cumplir las funciones fisiológicas que le permiten aumentar la producción y calidad de su cosecha. Cuando se fertiliza sin un diagnóstico previo de las propiedades del suelo y sin un plan basado en las recomendaciones del asistente técnico, se generan desbalances nutricionales, ya que las aplicaciones inadecuadas de nutrimentos pueden afectar la rentabilidad del cultivo por el incremento de los costos de preproducción y por la baja eficiencia de la aplicación. La fertilización sin diagnóstico ni planeación altera el suelo a largo plazo y puede representar un aumento de 20 % a 35 % en los costos de producción (Microfertisa, 2012). Por lo tanto, se requiere realizar un plan de recomendación ajustado a las necesidades del suelo y del agricultor y que permita la incorporación en cantidades adecuadas de los elementos esenciales nitrógeno, fosforo y potasio, indispensables para el crecimiento del cultivo (Ruales Mora et al., 2010).

La textura del suelo y su contenido de materia orgánica inciden en la permanencia y efecto de fertilizantes ricos en N y K puesto que estos factores determinan la capacidad de retención de los nutrientes y la velocidad de infiltración. Suelos con altos contenidos de arenas y bajas cantidades de materia orgánica tienen mucha porosidad y demandan mayor cantidad de estos nutrientes ya que se lixivian más rápido (Microfertisa, 2012) (tablas 18 y 19).

La época y el momento oportunos para la aplicación dosificada de fertilizantes, abonos orgánicos y correctivos de acidez, dependen de la edad y la etapa fisiológica del cultivo, ya que el requerimiento varía mucho entre una etapa y otra. A continuación, se presenta un estimado de los momentos de fertilización según la fase de desarrollo del cultivo:

1. *Vivero:* 1 a 6 meses después de la germinación.
2. *Trasplante y siembra en sitio definitivo:* 6 meses después de la siembra.
3. *Crecimiento e inicio de la floración:* 18 meses después de la siembra.
4. *Establecimiento de la plantación:* 28 meses después de la siembra.
5. *Inicio de la producción:* 39 meses después la siembra.
6. *Plena producción:* 50 a 87 meses después de trasplantar al sitio definitivo.

Además, se deben tener en cuenta las podas como prácticas para corregir los defectos en la estructura aérea del árbol de cacao (podas de formación, mantenimiento, sanitarias y rehabilitación). Las podas siempre se hacen al inicio del invierno, y los elementos nutricionales (abonos orgánicos y fertilizantes de síntesis química) se deben aplicar aproximadamente un mes después de la poda si no se dispone de riego ya que la humedad del suelo favorece la asimilación por parte de la planta, lo cual incentiva los procesos fisiológicos que estimulan el crecimiento, el desarrollo vegetativo, la floración y la preparación del árbol. Las dosis de nutrimentos en etapa productiva del cultivo se deben suministrar anualmente en dos o tres aplicaciones, al inicio de las lluvias del primero y segundo semestre del año. Las tablas 20, 21, 22 y 23 describen las funciones de los principales nutrientes, así como los efectos de sus deficiencias y excesos (figura 37).

Tabla 20. Nitrógeno, fósforo y potasio: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso

Nutriente	Función del nutriente en la planta	Síntomas visuales		Causa
		Deficiencia	Exceso	
Nitrógeno	Forma parte de las proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos, enzimas.	Crecimiento lento en tallos y hojas.		
		Tallos delgados y hojas pálidas o cloróticas.	Aumento del follaje.	Escasa disponibilidad de materia orgánica en el suelo.
	Interviene en procesos enzimáticos.	Caída prematura de hojas y flores.	Rezago en la maduración.	Exceso de lluvia.
		Limitación de síntesis de proteínas y otros materiales esenciales para la generación de nuevas células.	Mayor susceptibilidad al ataque de plagas y enfermedades.	Falta en la fertilización
	Promueve el crecimiento y desarrollo vegetativo de la planta.			Exceso o desequilibrio en la fertilización.
		Color verde pálido proveniente de la reducción de clorofila.		

Continúa

Continuación tabla 20

Nutriente	Función del nutriente en la planta	Síntomas visuales		Causa
		Deficiencia	Exceso	
Fósforo	Ayuda al transporte y transferencia de energía para fotosíntesis y respiración. Formación de semilla, flores y frutos. Resistencia a bajas temperaturas. Promueve el desarrollo del sistema radicular. Se mueve fácilmente de tejidos maduros a nuevos.	Retraso en el crecimiento de tallos y hojas, en floración y maduración del fruto. Las hojas maduras presentan coloración de rojiza a púrpura con necrosis en puntas y bordes, y caída prematura. Las hojas jóvenes aparentan estar sanas, pero tienen escasa tolerancia al frío. Raíces cortas y delgadas. Deficiencias en la formación de semilla, flores y frutos.	Deficiencia inducida de cobre, hierro, manganeso y zinc en las hojas y la corteza gruesa.	Deficiencia en el suelo. Suelos altamente ácidos. Falta de fertilización. Exceso de fertilizante.
Potasio	Incrementa la fotosíntesis y mejora el transporte de sus productos. Mejora la fijación biológica de nitrógeno y estimula el crecimiento radicular. Prolonga el periodo de llenado del fruto. Mejora la calidad física y química del fruto. Aumenta la resistencia a enfermedades.	Quemado y necrosis de las puntas y márgenes de las hojas maduras, con manchas de color grisáceo o ceniza a lo largo del folíolo. Las hojas se enrollan y se arrugan. Frutos pequeños con piel delgada y coloreados prematuramente. Crecimiento lento, caída prematura de frutos y hojas. Por ser un elemento móvil, los síntomas se inician en las hojas maduras, lo cual retarda el desarrollo y crecimiento de la planta.	El exceso ocasiona deficiencia inducida de calcio y magnesio en hojas. En fruto desmejora la calidad de la piel, que se vuele gruesa y áspera.	Deficiencia del nutriente en el suelo. Exceso de cal. Falta de fertilización. Exceso en la fertilización.

Fuente: Elaboración propia a partir de Alvim (1967), Chepote et al. (2013) y Fedecacao (2012, 2015)

Tabla 21. Calcio, magnesio y azufre: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso

Nutriente	Función del nutriente en la planta	Síntomas visuales		Causa
		Deficiencia	Exceso	
Calcio	Estimula el desarrollo de las raíces. Regula la absorción de nitrógeno. Transloca proteínas y carbohidratos en el interior de la planta. Activa las enzimas.	Hojas nuevas amarillas y necróticas entre las nervaduras secundarias, en las puntas y márgenes. Poco desarrollo de frutos, con pudrición apical.	Hojas de color verde intenso. Disminuye el crecimiento y da una tonalidad verde muy oscura a la planta	Su deficiencia es ocasionada por el exceso de potasio y magnesio. Suelos muy ácidos. Falta de fertilización. Encalado excesivo.
Magnesio	Constituyente del núcleo central de la clorofila. Participa en las transformaciones de nitrógeno y en el metabolismo del fósforo. Es un activador de enzimas en la planta.	Retrasa la fase reproductiva de la planta. Por ser un elemento móvil, la deficiencia aparece entre las nervaduras de hojas maduras, con manchas amarillas cloróticas o marrones. Deficiencia inducida por altos contenidos de potasio o calcio y pH bajo. Menor cuajado del fruto.	Hojas de color verde intenso por la alta eficiencia fotosintética.	Exceso de potasio. Falta de fertilización. Excesiva aplicación de cal y de fertilizantes. Concentración alta de aluminio. Su deficiencia es ocasionada por exceso de calcio.
Azufre	Forma parte de vitaminas como tiamina y biotina, de proteínas vegetales (cisteína, cistina, metionina) y de otros componentes como el ácido lipídico y la coenzima A.	Hojas nuevas presentan amarillamiento clorótico uniforme en toda la lámina foliar. Crecimiento limitado. Tallos delgados con tonalidad púrpura.	Limitación de síntesis de proteínas y otros materiales esenciales para la generación de nuevas células. Lámina de la hoja de color verde pálido a clorótica debido a la reducción de clorofila.	Exceso en la fertilización. Poca materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia a partir de Alvim (1967), Chepote et al. (2013) y Fedecacao (2012, 2015)

Tabla 22. Hierro y cobre: funciones en el ciclo vegetativo del cultivo de cacao y síntomas visuales de su deficiencia y exceso

Nutriente	Función del nutriente en la planta	Síntomas visuales		Causa
		Deficiencia	Exceso	
Hierro	Ayuda a la síntesis de clorofila. Forma parte de algunas proteínas que intervienen en el proceso de oxidación de compuestos organometálicos. Participa en los procesos metabólicos de la fotosíntesis de la planta	Disminuye la síntesis de la clorofila y baja la respiración. Hojas jóvenes cloróticas con nervaduras verdes. Brotes tiernos pueden morir prematuramente. Los frutos son pequeños y la piel se torna pálida.	Manchas color marrón en hojas.	Suelos alcalinos Suelos muy calcáreos o muy ácidos. Aplicación excesiva de cal. No se da la absorción de fósforo. pH superior a 7.
Cobre	Interviene en la fotosíntesis y en la respiración. Participa en el metabolismo del nitrógeno y en la síntesis de la lignina.	Hojas jóvenes grandes y flácidas. Ramas con pústulas de goma y muerte. Muerte descendente (*dieback*) en frutos con erupciones pardas de goma (exantema). Hojas cloróticas con manchas necróticas con caída prematura y muerte de raíces.	Afecta el desarrollo radicular (aumenta). Reducción de ramas. Necrosis. Crecimiento lento.	Suelos muy pobres en cobre. Exceso de cal, nitrógeno y fósforo. Efecto acumulativo de pesticidas basados en cobre.

Fuente: Elaboración propia a partir de Alvim (1987), Chepote et al. (2013) y Fedecacao (2012, 2015)



Tabla 23. Síntomas visuales de las principales deficiencias nutricionales en tejido vegetal y frutos

Síntomas	Elemento deficiente														
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ni	Cl	MO	Estrés*
Caída de hoja															
Hojas bajeras o maduras	■	■	■		■										
Hojas superiores o jóvenes	■	■	■		■										
Hojas de la mitad de las ramas					■	■				■					
Clorosis o amarillamiento															
En todas las hojas	■					■									
En bordes de hojas						■			■				■	■	
Entre las venas, en hojas maduras y jóvenes	■				■										
Necrosis, moteados															
Hojas bajeras (maduras) o medias			■	■						■			■		■
Hojas superiores o jóvenes (apicales)							■						■		■
Necrosis apicales y bordes de hojas			■				■								■
Coloraciones rojizas, púrpuras o naranjas															
Hojas bajeras o maduras		■			■										
Hojas superiores o jóvenes									■	■					■
Generalizada		■													■
Malformaciones															
Ondulaciones en los bordes o sobre láminas de hojas				■			■				■				■
Malformaciones en los frutos				■			■	■			■				■

Síntomas	Elemento deficiente														
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ni	Cl	MO	Estrés*
Otros síntomas															
Caída de frutos			■	■	■		■				■				
Pudrición interna/corazón hueco				■			■								
Cuarteamientos o deformaciones				■			■	■			■				■
Caídas de flores o abortos	■	■			■		■				■			■	
Tallos cortos y delgados		■									■				
Muerte de yemas terminales				■			■								
Retardo del crecimiento y ramificación	■	■			■		■				■			■	

Fuente: Elaboración propia con base en Salisbury y Ross (1992) y Medina (2003), citados por Microfertisa (2018)

Síntomas de deficiencia de fósforo (P)



Síntomas de deficiencia de magnesio (Mg)



Síntomas de deficiencia de cobre (Cu)



Síntomas de deficiencia de nitrógeno (N)



Síntomas de deficiencia de calcio (Ca)



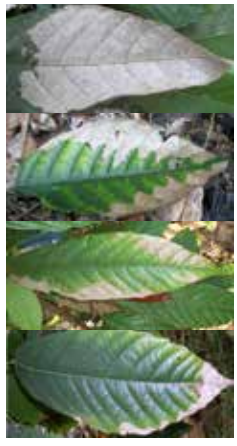
Síntomas de deficiencia de hierro (Fe)



Hoja sin síntoma



Síntomas de deficiencia de potasio (K)



Síntomas de deficiencia de manganeso (Mn)



Síntomas de deficiencia de zinc (Zn)



Síntomas de deficiencia de boro (B)



Figura 37.

Principales deficiencias de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Mn, S, Fe, Cu, Zn, B) en tejido vegetal del cultivo de cacao.

Fuente: Elaboración propia

Fotos: Gersain Antonio Rengifo Estrada



Capítulo VIII.

Manejo fitosanitario

Entre los años 2016 y 2020 se presentó un aumento de la producción mundial de grano de cacao seco de 1,11 millones de toneladas (FAO, 2022). El mismo comportamiento se registró en Colombia, cuyo aumento en la producción fue de 12.255 toneladas durante ese mismo periodo (Fedecacao, 2022). En el país este aumento, sin embargo, obedece al incremento del área de cosecha y no al mejoramiento de los rendimientos de las plantaciones de cacao. Aunque este producto registra un crecimiento constante de su demanda, los rendimientos promedio de sus plantaciones de cacao no superan los 467,4 kg/ha (FAO, 2022). Entre los factores responsables de esta situación se destacan el envejecimiento de las plantaciones, un manejo agronómico inadecuado, la degradación de los suelos, los insectos plaga y las enfermedades. Se estima que de 30 a 40 % de la producción se pierde por factores bióticos, y que las enfermedades ocasionan más pérdidas que los insectos plaga (Jaimes Suárez et al., 2021). A continuación, se detallan los principales problemas sanitarios del cacao en el departamento de Boyacá y las recomendaciones para su manejo.

Monilia

En Colombia, la monilia se considera la principal limitante fitosanitaria del cultivo de cacao. Esta enfermedad es causada por *Moniliophthora roreri*, un hongo hemibiotrófico especializado en atacar frutos que bajo condiciones ambientales predisponentes y un manejo inadecuado de la plantación ocasiona pérdidas considerables, que oscilan entre 40 y 100 % de la producción de cacao. Durante un ciclo de fructificación del cacao en condiciones ambientales favorables al desarrollo de la enfermedad y con material genético susceptible, se pueden presentar más de tres ciclos de la enfermedad, lo cual la hace de difícil control comparada con

la escoba de bruja (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).

Síntomas y signos

Los frutos de cacao pueden ser atacados por *M. roreri* en cualquier etapa de desarrollo. Los primeros síntomas que presentan los frutos enfermos varían de acuerdo con la edad en que reciben el ataque. En frutos de 0 a 2 meses, el patógeno deforma el tejido vegetal y da lugar a una protuberancia conocida por los productores como "giba" (figura 38a). En frutos mayores de 2 meses, el primer síntoma externo son unos puntos aceitosos (figura 38b) distribuidos de manera dispersa o concentrada, aunque la aparición de este síntoma puede depender del material vegetal. En el tejido interno de los frutos con pigmentos aceitosos se presentan puntos necróticos (figura 38c) (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).

Otro posible síntoma en los frutos es madurez prematura con islas verdes (figura 38d) o islas amarillas (figura 38e). Conforme avanza la enfermedad, el tejido enfermo se necrosa, lo que se evidencia con una mancha de color chocolate o castaño oscuro (figura 38f) dispersa de manera irregular sobre el tejido (figura 38g). En el tejido interno de los frutos con enfermedad avanzada se observa una pudrición acuosa (figura 38l), de consistencia gelatinosa, con una desorganización de los granos que hace difícil su remoción. De 3 a 7 días después de la aparición de la mancha se forma sobre ella un micelio blanco o color crema denso (figura 38h) que al igual que la mancha llega a cubrir todo el fruto (figura 38i) y que posteriormente se da lugar a la formación de las esporas, caracterizadas por una tonalidad ceniza que luego se torna café (figura 38j). En condiciones óptimas y materiales susceptibles se presenta una esporulación total del fruto (figura 38k) (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 38.

Síntomas y signos de la monilia en frutos de cacao. a. Giba; b. Puntos aceitosos en fruto verde; c. Puntos aceitosos en fruto rojo; d. Puntos necróticos en tejido interno; e. Islas verdes; f. Isla amarilla; g. Mancha chocolate; h. Macha chocolate con inicio de micelio; i. Micelio blanco sobre mancha chocolate; j. Esporulación color ceniza y café; k. Fruto totalmente esporulado; l. Pudrición acuosa.

Fotos: Donald Adrián Galvis Neira y Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Ciclo de la enfermedad

La duración del ciclo de la monilia depende de las condiciones ambientales, la susceptibilidad del material vegetal y el aislamiento de *M. roreri* (Jaimes et al., 2016; Jaimes et al., 2019). El ciclo de la enfermedad inicia con la liberación de las esporas bajo condiciones de baja humedad relativa, lo que les permite dispersarse con el viento y depositarse sobre la superficie de frutos sanos. El inicio de la infección requiere condiciones de alta

humedad relativa, que generalmente se dan durante las primeras horas del día con la formación del rocío en periodos de altas precipitaciones, que son los que favorecen el desarrollo de la enfermedad. La distribución bimodal de las lluvias a lo largo del año genera condiciones favorables para *M. roreri* (Jaimes et al., 2019).

Los primeros síntomas aparecen en promedio 30 días después de la infección, momento en el cual se evidencian las gibas y los puntos aceitosos. Transcurrido un promedio de 60 días después del inicio de la infección se presenta la macha por necrosis del tejido. La mancha se dispersa sobre la superficie del fruto y cinco días después aparece el micelio blanco o cenizo denso, el cual coloniza rápidamente el tejido externo necrosado. En condiciones de precipitación bimodal, el ciclo de la monilia tiene una duración promedio de 60 días (figura 39) (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al. 2021), duración que puede variar según las condiciones arriba descritas.

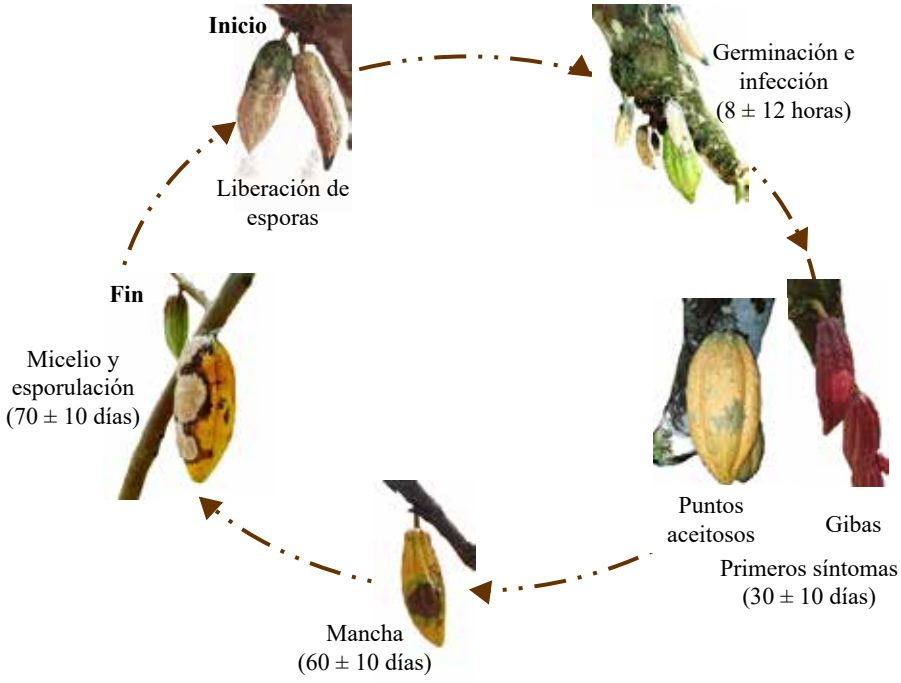


Figura 39.

Ciclo de la monilia.

Fuente: Jaimes Suárez et al. (2021)

Fotos: Donald Adrián Galvis Neira

Control de la monilia

El manejo de la monilia se basa principalmente en la implementación de prácticas agronómicas como remoción de frutos enfermos, podas de mantenimiento de los árboles con regulación de la altura para que no sobrepase los 3,5 m, establecimiento de materiales de *T. cacao* con resistencia a *M. roreri* (especialmente en áreas bajo condiciones ambientales altamente predisponentes para la enfermedad), y un adecuado manejo agronómico de la plantación (Jaimes et al., 2019; Jaimes Suárez et al., 2021). A continuación, se detalla cada práctica:

- En las plantaciones nuevas se debe tener en cuenta el grado de resistencia del material vegetal de cacao y de las especies acompañantes en el sistema agroforestal. Se deben seleccionar especies arbóreas de porte alto y distribuirlas de manera homogénea en la plantación, para lo cual se debe considerar el arreglo agroforestal descrito en el capítulo VII. En lotes con humedad relativa alta (>80 %) se recomienda sembrar materiales resistentes a la monilia como ICS 95, TCS 06, FEC 2, o tolerantes a ella como TCS 19. Sin embargo, para su siembra se debe considerar la matriz de compatibilidad con otros materiales para garantizar la productividad de la nueva plantación (tablas 6 y 7).
- Una adecuada arquitectura de los doseles de los árboles de cacao y de sombrío es fundamental para el manejo de las enfermedades del cacao, incluida la monilia. Doseles densos con ramas entrecruzadas generan condiciones de baja infiltración de luz y humedad relativa alta, y en estos casos tanto árboles de sombrío como de cacao requieren una poda principal y una poda de mantenimiento al año. La programación de las podas se debe definir con base en el régimen de precipitaciones de la región. En condiciones de precipitación bimodal, la primera poda o poda principal debe realizarse entre el final del periodo seco y el inicio del periodo lluvioso del primer semestre del año, mientras que la poda de mantenimiento debe practicarse entre finales del periodo seco y el inicio del periodo de precipitaciones del segundo semestre.
- Las podas en las plantaciones adultas se practican para que las plantas de cacao no superen los 3,5 m de altura. Esto permite un adecuado manejo de las enfermedades puesto que facilita la identificación del material vegetal enfermo que se debe remover.

- Después de practicadas las podas y de iniciados los periodos de lluvia se debe fertilizar la plantación de acuerdo con los nutrientes disponibles en el suelo y los requerimientos del cultivo de cacao.
- La frecuencia de remoción de frutos enfermos depende de la fructificación de los árboles de cacao. En periodos de mayor cuajamiento la remoción de frutos enfermos se practica semanalmente. En épocas de baja fructificación la remoción se lleva a cabo con una frecuencia quincenal. Para que esta práctica sea eficiente, los frutos enfermos se deben retirar cuando presenten los primeros síntomas o cuando aparezca la mancha (figuras 38a-38g). Es importante evitar que los frutos enfermos esporulen (figuras 38h-38j), puesto que las esporas que liberan son las que aseguran otro ciclo de la enfermedad (figura 39).
- Se recomienda remover los frutos enfermos en las primeras horas de la mañana, sobre todo si se van a retirar frutos esporulados, ya que las condiciones de alta humedad relativa reducen la velocidad de dispersión de las esporas.
- Los frutos esporulados se deben tapar con hojarasca para favorecer su rápida descomposición.
- Cuando en plantaciones hibridas se presenta una incidencia alta de monilia y de difícil control, se debe proceder a la rehabilitación de la plantación.

Escoba de bruja

La escoba de bruja es una enfermedad del cacao causada por el hongo hemibiotrófico *Moniliophthora perniciosa*. Al igual que con su especie hermana *M. roreri*, bajo un deficiente manejo agronómico y en condiciones de ambiente predisponentes puede llegar a causar pérdidas de 30 a 100 % (Jaimes et al, 2022). A diferencia de la monilia, el ciclo de la escoba de bruja se sincroniza con el de fructificación, de modo que la enfermedad solo experimenta un ciclo por periodo productivo. Esto hace más fácil su control que el de la monilia mediante podas y una oportuna remoción de material vegetal enfermo (Jaimes Suárez et al., 2021). Sin embargo, no se debe subestimar la incidencia de esta enfermedad, ya que un inadecuado manejo de la plantación puede reducir la capacidad productiva de los árboles de cacao. *M. perniciosa* puede influir en la distribución de nutrientes

y con ello debilitar las plantas, de ahí que se considere un parásito de capacidad devastadora (Sousa Filho et al., 2021).

Síntomas y signos

M. perniciosa ataca los tejidos meristemáticos de las plantas de cacao y de esta manera causa desórdenes hormonales en brotes vegetativos y cojines florales que se manifiestan como superbrotaciones e hinchazones (Carvajal-Rivera et al., 2021). En ramas y brotes se puede observar el síntoma característico de una hinchazón del tejido vegetal (la escoba de bruja), acompañada de brotaciones pequeñas próximas unas de otras, con hojas alargadas, curvadas y retorcidas (figuras 40). Las escobas pueden duplicar o triplicar el tamaño del tejido sano. En los cojines florales, los síntomas de la escoba son superbrotación e hinchazón del tejido (figura 41c) (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010, Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 40.

Síntoma de escoba de bruja: tejido vegetal necrosado en ramas terminales y laterales del dosel del árbol de cacao.

Foto: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Además de cojines florales y yemas apicales y axilares, *M. perniciosa* ataca los frutos de cacao en cualquier etapa de desarrollo. Los frutos menores de un mes atacados por este patógeno detienen su crecimiento y adoptan la apariencia de frutos chirimoya o frutos zanahoria, es decir, frutos partenocárpicos sin formación de semillas (figuras 41a y 41b) que finalmente se necrosan. En frutos de 1 a 2 meses, el patógeno deforma e hincha el tejido e induce la maduración prematura mientras que en frutos de 2 a 3 meses, ocasiona lesiones que posteriormente se necrosan y se tornan de color marrón brillante (más oscuras que las manchas de *M. roreri*) con bordes más o menos circulares (Jaimes Suárez et a., 2021).



Figura 41.

Síntomas de *M. perniciosa* en cacao. a. Frutos chirimoya; b. Frutos sin formación de semillas (partenocárpicos); c. Escoba de bruja en cojín floral con flores deformadas y frutos zanahoria.

Fotos: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Ciclo de la enfermedad

El ciclo de la escoba de bruja inicia con la formación de basidiocarpos cuando empieza la formación de lanzamientos foliares, de 8 a 12 semanas después de iniciado un periodo lluvioso (figura 42) con alternancia de días secos.

La liberación de las basidiosporas, únicos propágulos infectivos, se da en horas de la noche bajo condiciones de humedad relativa alta y temperatura baja. La infección del tejido vegetal ocurre cuando las basidiosporas y la hifa germinan y penetran los estomas o directamente el tejido. Los primeros síntomas se conocen como escobas verdes y aparecen de 5 a 12 semanas después de la infección. La necrosis del tejido enfermo sucede 6 meses promedio después de la infección. La producción de los basidiocarpos (figura 43) puede prolongarse de 4 a 66 semanas dado que el patógeno tiene un periodo de latencia en la escoba seca, periodo que finaliza una vez se presenta la condición de días lluviosos con alternancia de días secos, que es la necesaria para el inicio de un nuevo ciclo de la enfermedad (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).

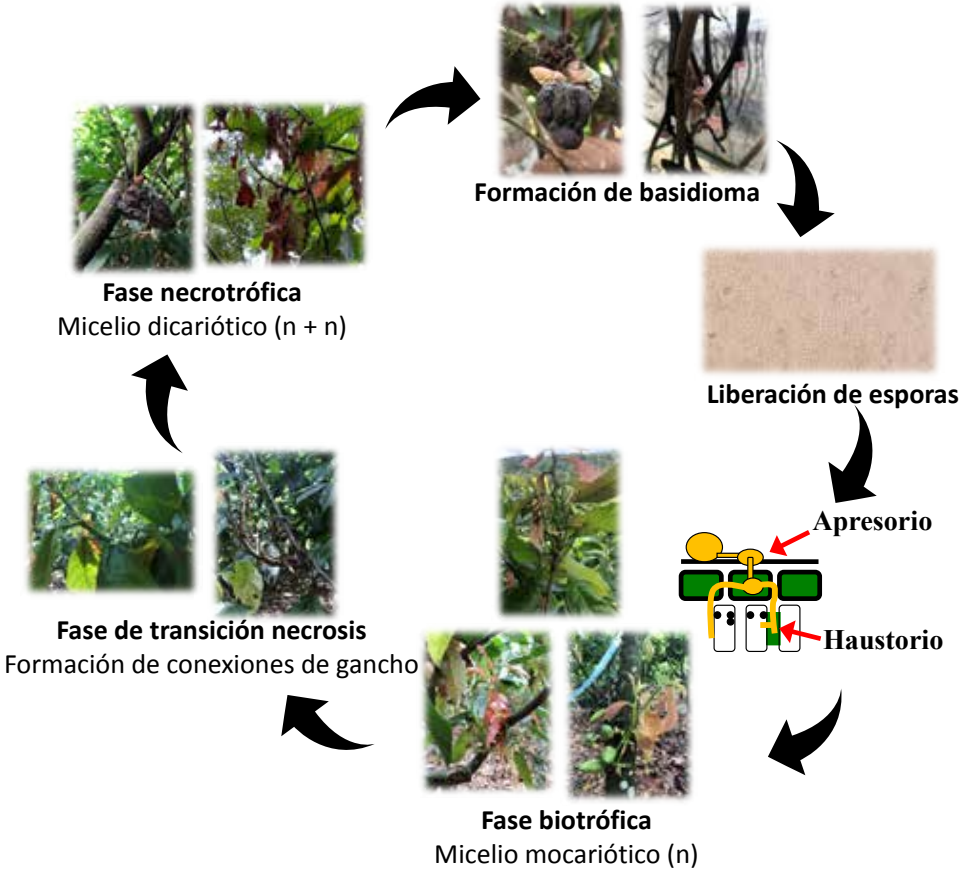


Figura 42.

Ciclo de la escoba de bruja.

Fuente: Jaimes Suárez y Aranzazu Hernández (2010)



Figura 43.

Basidiocarpos de *M. perniciosa* sobre tejido enfermo necrosado de planta de cacao.

Foto: Donald Adrián Galvis Neira

Control de la escoba de bruja

La principal práctica de manejo de la escoba de bruja es la poda, que debe emplearse con una frecuencia de dos veces al año. Con la poda, además de regular la densidad del dosel del árbol, se remueven los tejidos enfermos de cojines florales, ramas y frutos afectados. El material se puede incorporar a la hojarasca si se desea acelerar la descomposición de los tejidos enfermos. Es importante asegurar un adecuado manejo agronómico de la plantación, lo cual incluye, como se indicó arriba, mantener los árboles de cacao a una altura máxima de 3,5 m, regular la sombra y realizar las fertilizaciones que garantizan una buena productividad. Bajo condiciones predisponentes a una epidemia de *M. perniciosa*, se recomienda la siembra de materiales resistentes a la enfermedad. En plantaciones con alta incidencia de escoba de bruja, se deben rehabilitar las copas de los árboles de cacao más susceptibles (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).

Mazorca negra

Las especies del género *Phytophthora* son responsables de las mayores pérdidas de cacao a nivel mundial. La enfermedad, comúnmente conocida como "mazorca negra" o "mazorca parda", causa pudrición acuosa del fruto y cánceres en tallos y ramos. Se estima que *Phytophthora* sp. es responsable de la muerte de alrededor de 10 % de árboles en el mundo (Ploetz, 2016). Dentro de las especies asociadas a la mazorca negra, está *Phytophthora palmivora*, que es la que ataca los cacaotales en Colombia, aunque su distribución es cosmopolita. Dado que este patógeno no se considera un hongo verdadero, es clave no usar fungicidas que inhiban la formación de ergosterol, ya que este compuesto no se encuentra en la composición de su membrana celular. Otro aspecto para tener presente en la selección de productos químicos destinados al manejo de las especies de *Phytophthora* es su pared celular, que está compuesta por β-glucano, celulosa, hidroxiprolina y no tiene quitina (Jaimes Suárez et al., 2021).

Aunque comparada con la monilia o la escoba de bruja, la mazorca negra no se consideraba de importancia económica en plantaciones híbridas de cacao, la modernización de plantaciones y la transición de áreas cafeteras a cacaoteras han hecho que la enfermedad se convierta en un problema para plantaciones establecidas con materiales susceptibles como CCN 51 y algunos de la serie ICS (Jaimes Suárez et al., 2021).

Síntomas y signos

Si bien este patógeno afecta diferentes tejidos de la planta de cacao, las principales pérdidas se derivan del ataque a los frutos. *Phytophthora* sp. puede atacar frutos de cacao en cualquier etapa de desarrollo. Los frutos enfermos presentan una mancha color pardo de borde definido que se dispersa rápidamente y que, en un lapso de 10 a 15 días, dependiendo de las condiciones climáticas, alcanza toda la superficie del fruto (figura 44a). Entre los signos observables del patógeno se encuentra un micelio blanquecino pulverulento o poco denso (figura 44b) que en pocos días recubre la mancha color pardo o castaño oscuro. Al igual que en la superficie del fruto, en la parte interna se forma una pudrición café que afecta los granos de cacao. Si bien es posible desprender estos granos, mezclarlos con granos sanos afecta la calidad organoléptica y sensorial

de estos últimos. Por ende, la cosecha de frutos y granos enfermos se considera inadecuada o una mala práctica (Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 44.

Síntomas y signos de mazorca negra en fruto de cacao. a. Mancha parda con borde definido; b. Fruto con micelio poco denso o pulverulento.

Fotos: Donald Adrián Galvis Neira

Los cánceres causados por *Phytophthora* sp. aparecen sobre la corteza del tronco y de las ramas de los árboles. En el tejido afectado se pueden observar lesiones necróticas oscuras, sobre las cuales frecuentemente se presentan exudaciones (figura 45a). En el tejido interno de ramas o troncos afectados se observan lesiones color salmón o púrpura (figura 45b).



Figura 45.

Síntomas de cánceres ocasionados por *Phytophthora* sp. en tronco de árbol de cacao. a. Síntoma externo caracterizado por el oscurecimiento de la corteza; b. Síntoma interno con tejido color salmón.

Fotos: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Ciclo de la enfermedad

Las especies de *Phytophthora* tienen cuatro tipos de propágulos, que pueden infectar directa o indirectamente el tejido del cacao: zoosporangios, zoosporas, oosporas y clamidosporas. Estos últimos propágulos permiten al patógeno sobrevivir en el suelo por un tiempo prolongado. Temperaturas inferiores a 21 °C, humedades relativas altas (>85 %) y periodos lluviosos son condiciones predisponentes para el inicio de las epidemias de mazorca negra. El ciclo de la enfermedad es menor comparado con el de la monilia y la escoba de bruja. Una vez

se presentan las condiciones predisponentes, el patógeno infecta los tejidos del fruto y los primeros síntomas de la enfermedad aparecen a las 30 horas. El avance de la necrosis en el tejido del fruto de cacao se completa de 10 a 14 días después de la infección, y el micelio se empieza a formar de 3 a 4 días después de la aparición de los primeros signos de la mancha parda (Jaimes Suárez et al., 2021) (figura 46).

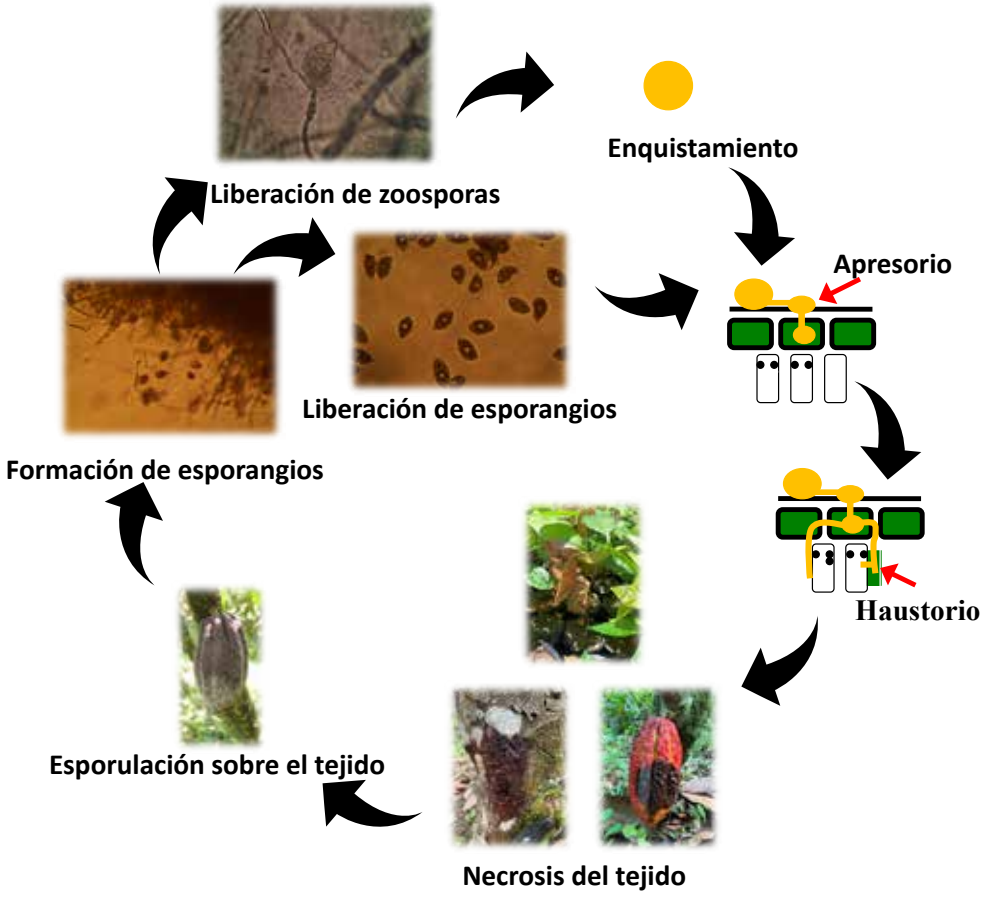


Figura 46.

Ciclo de la mazorca negra en frutos de cacao.

Fuente: Jaimes Suárez y Aranzazu Hernández (2010)

Control de la mazorca negra

Para tener un adecuado control de la mazorca negra, previo al establecimiento del cultivo de cacao se debe verificar el nivel freático

del suelo y seleccionar material vegetal con resistencia a la enfermedad. En lotes fácilmente inundables o con alto nivel freático se deben adecuar buenos drenajes. En épocas de alta precipitación estos últimos permiten drenar bien el suelo y disminuir la cantidad de inóculo del patógeno (Jaimes Suárez et al., 2021). Se recomienda usar como patronaje material tolerante el de los genotipos IMC 67, PA 46 y P 7, o en su defecto materiales del tipo amazónico con características fenotípicas similares a SCA 6 y SCA 12 (Turnbull & Hadley, 2020). Para prevenir los cánceres en ramas y tronco, el injerto del patronaje se debe hacer a una altura del suelo no inferior a 50 cm (Jaimes Suárez et al., 2021).

Para el manejo de la mazorca en plantaciones ya establecidas los drenajes se adecúan de tal manera que no produzcan encharcamientos, y se regula la sombra mediante la poda de los árboles de sombrío y el autosombreamiento con la poda de los árboles de cacao. Con estas prácticas se reduce la probabilidad de generar condiciones predisponentes para la enfermedad. Durante las labores agrícolas se debe evitar hacer heridas en el tejido vegetal con las herramientas. Luego de la poda de los árboles, o en caso de herir a alguno, se debe cicatrizar el tejido con pasta bordelesa o vinilo tipo 1 y un fungicida protectante de suplemento (por ejemplo, oxicloruro de cobre) (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).

Durante las rondas sanitarias, los frutos enfermos removidos se deben disponer en un sitio retirado de la base de los árboles de cacao, con el fin de reducir la disponibilidad del inóculo y evitar que enferme el tejido sano de estos árboles. Una vez finalizado el ciclo de cosecha, se verifican tejidos leñosos de los árboles tales como cuello, tronco y ramas. En caso de que se observen cambios en el color del tejido (figuras 45a y 47a), este se debe remover con una navaja realizando un corte que no dañe el cámbium de la planta (figura 45b y 47b), y se debe tratar de cicatrizar los tejidos internos expuestos con una cobertura de vinilo tipo 1 suplementada con fungicidas sistémicos como metalaxil o fosetil-aluminio (figuras 47c y 47d). Este tratamiento debe llevarse a cabo tres veces con intervalos de 21 días y con rotación de productos químicos de diferente principio activo. Los árboles de cacao se deben eliminar y retirar del lote cuando la enfermedad se encuentra muy avanzada (Jaimes Suárez & Aranzazu Hernández, 2010; Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 47.

Procedimiento para el manejo de cánceres de *Phytophthora* sp. en árboles de cacao. a. Descubrimiento del tejido enfermo para su tratamiento; b. Eliminación del tejido enfermo; c. Cubrimiento del área afectada, una vez eliminado el tejido enfermo, con vinilo tipo 1 suplementado con producto químico; d. Tejido de cacao tratado para el control de cánceres.

Fuente: Jaimes Suárez et al. (2021).

Mal del machete

La enfermedad del mal del machete se refiere a la marchitez y muerte de los árboles de cacao ocasionadas por *Ceratocystis fimbriata*. Las malas prácticas en poda, limpias, deschuponado y cosecha son claves para la incidencia de la enfermedad, ya que los propágulos del patógeno se transportan en las láminas de las herramientas empleadas durante estas labores agrícolas. Una herramienta sin lavar ni desinfectar transporta

estructuras infestivas de los árboles enfermos a los sanos y de esta manera puede distribuir la enfermedad en la plantación. Durante los periodos de baja o alta precipitación, se pueden observar los síntomas de esta enfermedad, que también se encuentra asociada a insectos del género *Xyleborus*, los cuales son sus vectores (Sodré, 2017; Jaimes Suárez et al., 2021).

Síntomas y signos

El primer síntoma del mal del machete es una clorosis parcial o total en las hojas del dosel del árbol (figura 48a). Conforme la enfermedad progresa, las hojas pierden su turgencia hasta secarse y permanecen adheridas a las ramas en posición vertical durante varias semanas (figura 48c), incluso cuando el árbol ya ha muerto (figura 48b). Sobre el tejido leñoso afectado se forman cánceres (figura 48d) con lesiones necróticas deprimidas con cambio de coloración a un tono más oscuro y en ocasiones exudaciones rojizas. En el tejido interno enfermo se presenta cambio de coloración, la cual disminuye en dirección a los tejidos sanos, acompañado con frecuencia de estrías (figura 48d) (Sodré, 2017; Jaimes Suárez et al., 2021).

Por lo general estos síntomas se evidencian sobre los tejidos en los que se han causado heridas producto de las diferentes prácticas en las que se usan herramientas cortopunzantes, o en la zona donde se hizo la injertación de material vegetal clonado. Esta enfermedad también se asocia a insectos del género *Xyleborus*, y por ende su presencia suele ser de utilidad para el diagnóstico del mal del machete, lo mismo que la presencia de aserrín en el tejido. El aserrín es liberado al exterior por estos insectos cuando colonizan el tejido vegetal y construyen galerías (figuras 48e y 48f) (Sodré, 2017; Jaimes Suárez et al., 2021).



Figura 48.

Síntomas de clorosis ocasionada por el mal de machete. a. Clorosis; b. Marchitez; c. Hojas adheridas en ángulo de 90°; d. Cáncer; e. Aserrín; f. Insecto *Xyleborus ferrugineus*, asociado al mal del machete.

Fuente: Jaimes Suárez et al. (2021)

Ciclo de la enfermedad

La principal fuente de inóculo de *C. fimbriata* se encuentra en los tejidos de plantas de cacao enfermas o muertas tales como raíces, ramas, tronco, y en suelo contaminado con el aserrín que liberan los insectos vectores cuando construyen galerías. Su ciclo inicia con la diseminación del inóculo en la plantación, que se da a través de las herramientas empleadas durante las prácticas de manejo cultural y de los insectos barrenadores ya mencionados del género *Xyleborus*. Los insectos vectores son atraídos por volátiles producidos por el patógeno en las plantas enfermas. Las hembras vírgenes de *Xyleborus* sp. viajan hacia las plantas sanas y allí seleccionan los sitios de reproducción. Mediante la liberación de semioquímicos tales como hormonas sexuales o de agregación o incluso mediante volátiles de la planta hospedera, las hembras logran atraer a los machos a las plantas sanas. La infección del tejido sano se inicia en las heridas provocadas por las herramientas o en las que ocasiona *Xyleborus* sp. (figura 49) (Paladines-Rezabala et al., 2022).

C. fimbriata coloniza los tejidos vegetales de la planta a través de los vasos del xilema. La cantidad de tejido vegetal colonizado varía de acuerdo con la resistencia al mal del machete del material de cacao. En genotipos susceptibles como CCN 51 el progreso de la enfermedad es mayor comparado con el que puede darse en materiales resistentes como TSH 1188. Las plantas de cacao presentan el síntoma de marchitamiento cuando se obstruyen las células del parénquima. La muerte súbita del árbol se produce de 10 a 15 días después de estos primeros síntomas, y la colonización del tejido de la planta, de 15 a 18 meses después (Paladines-Rezabala et al., 2022).

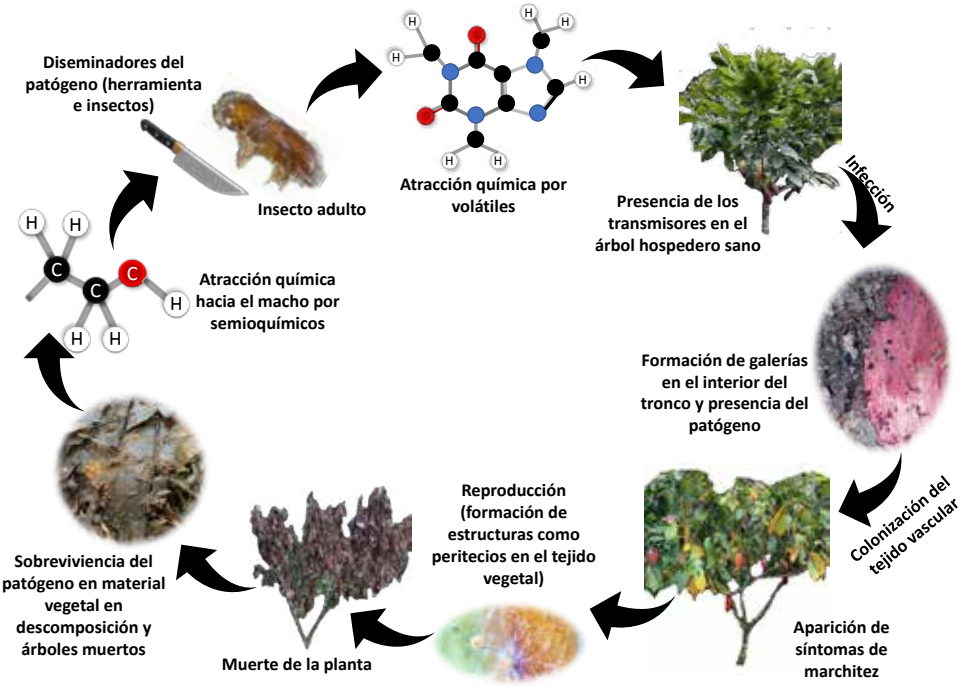


Figura 49.

Ciclo del mal del machete en árboles de *T. cacao*

Fuente: Paladines-Rezabala et al. (2022)

Fotos: Donald Adrian Galvis Neira, José Mauricio Montes, Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Control del mal del machete

El manejo consiste en implementar medidas preventivas desde antes del establecimiento de la plantación de cacao. Se recomienda seleccionar patronaje con resistencia a la enfermedad como IMC 67 o SCA 12 según disponibilidad (Turnbull & Hadley, 2020; Jaimes Suárez et al., 2021). Dado que las herramientas para poda, cosecha, remoción y corte de tejido vegetal son un vehículo potencial para la diseminación de la enfermedad, una buena práctica es lavarlas y desinfectarlas antes y después de utilizarlas. Las herramientas se deben lavar con detergente, el cual después se retira con abundante agua para eliminar residuos vegetales y otras partículas adheridas. En seguida, las herramientas se deben sumergir en una solución de formol o hipoclorito de sodio al 0,1 % durante cinco minutos (Jaimes Suárez et al., 2021).

Otras prácticas para implementar son la inspección regular de la plantación para identificar plantas enfermas, sobre todo después de las labores de poda, deschuponado, cosecha y desmalezado. Además, una vez finalizadas estas labores, se debe cicatrizar el tejido vegetal con pasta bordelesa o vinilo tipo 1 suplementado con un fungicida protectante (como oxicloruro de cobre) e insecticida. Los árboles enfermos que se identifiquen se deben asperjar con insecticida, incinerar y remover de la plantación (Jaimes Suárez et al., 2021).

Llaga estrellada

La enfermedad conocida como llaga estrellada es causada por *Rosellinia pepo*, y una vez que se presenta en una plantación es difícil de erradicar. El patógeno ataca varias especies, incluidas las de café, cítricos, aguacate, guamo, yuca, plátano y especies forestales (Zambolim, 2021). El patógeno se puede propagar mediante los residuos vegetales de estas especies si no se realiza una adecuada preparación del terreno y si los residuos no se disponen de manera correcta. Aunque las especies del género *Rosellinia* son habitantes naturales del suelo, se requieren condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad. Entre los factores predisponentes se puede mencionar la presencia de residuos de especies hospederas

en descomposición dentro de la plantación de cacao, y suelos ricos en materia orgánica, muy ácidos y pobres en fosfatos (Flood et al., 2016; Jaimes Suárez et al., 2021).

Síntomas y signos

Los árboles de cacao afectados por *R. pepo* presentan la misma sintomatología del mal del machete. Los primeros síntomas se observan en el dosel de los árboles atacados y consisten en una clorosis parcial o generalizada en las hojas del dosel (figura 50a), las cuales se secan y permanecen adheridas aun después de que el árbol ha muerto (figura 50b). En algunos árboles enfermos pueden aparecer brotes en el tronco con hojas amarillentas de menor tamaño. En los árboles enfermos, los frutos no tienen semillas, maduran prematuramente, y al igual que las hojas quedan adheridos al árbol. Finalmente, *Rosellinia* sp. causa la muerte del árbol de cacao cuando coloniza el tejido del cuello de la planta (figura 50c). Dado que la enfermedad se puede diseminar mediante el contacto de raíces de árboles enfermos con las de árboles sanos, su incidencia dentro de la plantación se presenta por medio de parches con un patrón circular (figura 50a) (Flood et al., 2016; Jaimes Suárez et al., 2021).

Las raíces son el principal órgano afectado por *Rosellinia pepo*. Las que son atacadas por el patógeno se sitúan inmediatamente debajo de la superficie del suelo (Zambolim, 2021) y toman una coloración negra con márgenes más claras por efecto de la necrosis del tejido. En el tejido interno de las raíces se forman cordones miceliares ramificados y blanquecinos en forma de estrella o abanicos (Sodré, 2017; Zambolim, 2021). Estos cordones se conocen con el nombre de "rizomorfos" y son agregaciones de líneas de hifas capaces de transportar nutrientes a largas distancias y propagar la enfermedad (figura 50c) (Flood et al., 2016; Jaimes Suárez et al., 2021). *R. pepo* puede crecer directamente sobre suelos muy húmedos adherido a las raíces de las plantas de cacao enfermas (Sodré, 2017).



Figura 50.

Síntomas y signos de la llaga estrellada en árboles de cacao. a. Árbol con síntomas de clorosis generalizada con un patrón de distribución en parches dentro de la plantación; b. Cuello color rojizo de planta de cacao muerta con estrías y raíces colonizadas con rizomorfos o abanicos de *R. pepo*; c. Árbol de cacao muerto con hojas adheridas.

Fotos: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

Ciclo de la enfermedad

R. pepo habita naturalmente en los suelos y sobrevive en restos de tejido vegetal como tronco y raíces. Estos residuos, cuando se dejan en descomposición dentro de la plantación, facilitan la propagación y disponibilidad del inóculo. Su dispersión ocurre cuando las raíces sanas

entran en contacto con el micelio que crece en las raíces enfermas o en el material vegetal en descomposición. El micelio coloniza inicialmente la superficie de las raíces y luego penetra las células y alcanza los vasos conductores y la médula. En los vasos conductores colonizados se forman rayas y puntos de micelio negro mientras que los rizomorfos aparecen sobre raíces y tocones en descomposición. La enfermedad tiene un progreso más rápido en árboles jóvenes, ocasiona la pudrición generalizada de las raíces, y en arboles viejos tiene un progreso lento (Sodré, 2017; Jaimes Suárez et al., 2021).

Control de la llaga estrellada

Al igual que en el mal del machete, las principales estrategias de control para la llaga estrellada son preventivas. Se debe hacer una adecuada preparación del terreno donde se va a establecer la nueva plantación. Esto implica eliminar residuos vegetales para evitar su descomposición dentro del terreno y disminuir la fuente de inóculo de *R. pepo*. Asimismo, se debe corregir el pH en suelos muy ácidos y en caso de contenidos bajos de fosfatos, hay que implementar planes de fertilización que compensen los requerimientos nutricionales de las plantas de cacao. También se recomienda usar patronaje con resistencia a la enfermedad, tal como el material vegetal IMC 67.

Los árboles enfermos que se identifiquen en la plantación se deben aislar mediante zanjas o trincheras de 30 a 40 cm de profundidad para evitar el contacto de sus raíces con las de los árboles sanos. Los árboles enfermos se deben erradicar y quemar, y en sus raíces se deben realizar cortes profundos e inyectar un herbicida para matar el tejido que quede en el suelo. El suelo de estas áreas donde se presenta la enfermedad debe recibir aplicaciones de cal viva para que aumente su pH y debe permanecer en reposo por un periodo no inferior a seis meses (Flood et al., 2016; Jaimes Suárez et al., 2021). Previo a la siembra de nuevas plantas de cacao, se deben sembrar plantas indicadoras que permitan identificar la recuperación del suelo del área afectada. Para este fin se pueden usar plantas de fríjol dado que son susceptibles a *R. pepo*, y en caso de que no mueran se puede proceder a sembrar el cacao. Si mueren las plantas indicadoras, el terreno debe continuar en reposo por un periodo más prolongado hasta que no mueran las plantas indicadoras (Jaimes Suárez et al., 2021).

Monalonion

El chinche del cacao, nombre común de los insectos plaga del género *Monalonion*, se considera una de las principales plagas del cultivo de cacao. Bajo condiciones predisponentes como humedad relativa alta, gradientes de temperatura mayores de 8 °C y plantaciones con sombrío reducido o en exceso, se puede presentar un ataque severo de la plaga, con daños en frutos, hojas y brotes. El daño en los frutos se compone de pústulas o vejigas formadas por las toxinas que secreta el insecto cuando se alimenta del tejido vegetal (figura 51a). En ataques severos a brotes y hojas, los síntomas se presentan en forma de quemaduras (Sodré, 2017; Jaimes Suárez et al., 2021).

Los adultos de *Monalonion dissimulatum* Dist. miden 7 mm de largo. La cabeza y el tórax de los machos son de color amarillo-anaranjado con manchas amarillas, con abdomen de color rojizo y antenas negras (figura 51b). Las ninfas tienen un tamaño que varía según el instar o estado de desarrollo y son de color anaranjado con franjas rojizas (figura 51a). Su longevidad promedio es de 17 a 21 días (Sodré, 2017), aunque puede ser superior en condiciones de montaña, donde el tiempo de vida puede ser de 35 a 50 días (Quispe Limachi et al., 2021).

Aunque su control se puede hacer mediante insecticidas con principios activos como malatión al 0,6 % o deltametrina al 0,2 % cada 21 días y alternando los principios activos, su uso solo se recomienda cuando ocurren ataques severos y de manera dirigida a los focos de infestación. La restricción en el uso de estos productos químicos se debe a que afectan las poblaciones de insectos polinizadores, y por ende la productividad del cultivo de cacao. En caso de que se presente incidencia de la plaga y cause daños severos, se deben implementar monitoreos con subdivisión de la parcela en cuadrantes definidos por sombrío, edad y condiciones de predisposición para el ataque del insecto plaga. Para iniciar estos monitoreos, se debe tomar como punto de partida la época de lanzamientos foliares de las plantas de cacao (Sodré, 2017).

En caso de que haya pocos focos con bajos niveles de infestación, el control del insecto plaga se puede realizar mediante el aplastamiento de adultos y ninfas. También, durante el periodo de lanzamientos foliares, se

pueden hacer raleos de la sombra y entresaque de ramas para aumentar la entrada de luz a la plantación. Una alternativa para altas infestaciones es el uso de hongos entomopatógenos tal como las aspersiones de *Beauveria bassiana* en concentraciones de 2,5 × 10^8 a 7,5 × 10^8 conidios/mL (Montealegre & Rodríguez, 1989).



Figura 51.

Insecto plaga del género *Monalonion* y daño que ocasiona. a. Pústulas en fruto de cacao y ninfa de *Monalonion* sp.; b. Adulto de *Monalonion* sp.

Fotos: Donald Adrián Galvis Neira

Carmenta negra

La carmenta negra es el nombre común del insecto plaga *Carmenta foraseminis*, lepidóptero de la familia Sesiidae descrito en 1995 por Eichlin. En áreas donde se encuentra la carmenta negra, como la región del occidente del departamento de Boyacá, ocasiona pérdidas considerables al agricultor. El adulto de *C. foraseminis* tiene un color negro predominante, alas traslúcidas con escamas entre marrón oscuro y negras. Su tórax es de color marrón oscuro a negro con dos franjas longitudinales amarillas (Carabalí Muñoz et al., 2018).

C. foraseminis tiene metamorfosis completa, con una duración de ciclo de vida de 82 ± 2 días. La duración promedio es de 8 días en huevo, 55 días en larva, 14 días en pupa y 4 días en imago. Su ciclo puede variar a 68,5 días promedio con temperatura de 28 °C y humedad relativa de 80 % (Luna Quispe, 2019).

Durante 36 días, las larvas de *C. foraseminis* pasan por nueve etapas de desarrollo (instares) en el interior del fruto de cacao, donde se alimentan de mucílago y placenta, construyen galerías y ocasionalmente también comen semillas. Cuando está próxima a pupar, la larva construye una galería en dirección a la epidermis del fruto, donde construye el capullo y empupa. La pupa es de color castaño claro con punteras redondas y hondas en el protono, pocas estrías transversales en el metanoto y escasas estrías en la parte anterior del tergo A1, que tiene apariencia lisa (figura 52d) (Luna Quispe, 2019).

Los adultos de *C. foraseminis* son diurnos, emergen y se aparean durante el día. Los ataques a los frutos empiezan cuando emerge la larva de primer instar, que inmediatamente ingresa al fruto. El control en los estados larvales es difícil puesto que en ellos el insecto permanece dentro del fruto, donde se alimenta de la placenta y el mesocarpio, y su ataque es imperceptible. El único síntoma que se presenta en los frutos atacados es el de la peca en el epicarpio (figura 52a), producto del sellamiento que hace la larva en el orificio de entrada. Hacia el final del ciclo de vida del insecto, cuando emerge del capullo, el adulto deja un orificio que puede ser colonizados por patógenos del cacao (Carabalí Muñoz et al., 2018).

Como consecuencia de la alimentación de la larva (figura 52c), el material placentario y las semillas se fermentan y descomponen (figura 52b). Estos procesos se ven favorecidos por la colonización de patógenos y otros insectos que ingresan por el orificio que deja el adulto después de emerger. El grado de daño del fruto depende de la susceptibilidad del material vegetal y la edad del fruto (Carabalí Muñoz et al., 2018). Los materiales trinitarios son más susceptibles a esta plaga comparados con los de origen amazónico, como IMC 67, PA 46, PA 150 y CCN 51 (Luna Quispe, 2019).



Figura 52.

Daño ocasionado por larva de *Carmenta foraseminis* en frutos de cacao. a. Síntoma de peca; b. Daño interno; c. Larva; d. Excretas y pupa sobre fruto.

Fotos: Yeirme Yaneth Jaimes Suárez

La base del control de *C. foraseminis* es el monitoreo para estimar las fluctuaciones de la plaga, la abundancia de individuos y su distribución en la plantación. Este monitoreo consiste en la detección de frutos con peca (figura 52a), excretas (figura 52d) o perforaciones en 20 plantas seleccionadas al azar. Para el manejo cultural de la plaga, se debe realizar la adecuación de sombrío y autosombrío mediante la poda de árboles forestales y árboles de cacao, de tal manera que se asegure la entrada de luz y aire a la plantación. Se recomienda solarizar los frutos atacados

por la plaga con el fin de destruir los insectos que puedan emerger. Para esto se recomienda cubrir por completo los frutos infestados y demás residuos de cosecha con plástico negro. Esto aumenta la temperatura, acelera la descomposición y disminuye las poblaciones de *C. foraseminis* en la plantación (Carabalí Muñoz et al., 2018).



Capítulo IX.

Modernización de plantaciones envejecidas

La baja productividad del cultivo de cacao en Colombia es uno de los problemas de mayor incidencia en la sostenibilidad de la cacaocultura. Esta situación se atribuye al envejecimiento de plantaciones, a cultivos híbridos con alta heterogeneidad genética, a la alta incidencia de enfermedades, al deficiente manejo agronómico y al desconocimiento de variedades promisorias por parte de los productores (Mejía Flórez et al., 2003; Quiroz & Amores, 2002). Lo anterior se traduce en rendimientos productivos por debajo de los 400 kg de grano seco/hectárea/año, lo cual representa bajos ingresos para una familia cacaotera. En el departamento de Boyacá aún existen plantaciones improductivas (figura 53) con materiales genéticos híbridos, desorganizadas y con baja densidad de siembra, deficiente manejo agronómico o con clones universales que presentan problemas sanitarios. Para mejorar estos sistemas de producción se deben realizar prácticas de rehabilitación, que incluyen cambio de copas mediante la inclusión de variedades con buen comportamiento agronómico para incrementar los rendimientos por hectárea y mejorar la calidad de vida de los productores.



Figura 53.

Parcelas improductivas.

Foto: Eliana Báez Daza

Renovación y rehabilitación de plantaciones

Estos dos términos han sido discutidos en la cadena de cacao en Colombia para definir el modo como se deben recuperar las plantaciones de cacao improductivas y mejorar la producción de cacao seco por hectárea. La *rehabilitación* se refiere a poner una plantación en buenas condiciones productivas y sanitarias, en tanto que la *renovación* implica reemplazar copas (figura 54) con nuevas variedades (Palencia Calderón et al., 2006). Estas dos condiciones o prácticas se deben llevar a cabo de manera simultánea para lograr que el cultivo se recupere de forma eficiente en el corto plazo. Las intervenciones se definen después de hacer un diagnóstico del cultivo para identificar el manejo más apropiado de las plantas. Quiroz y Amores (2002) definen la rehabilitación como la aplicación de una serie de prácticas de manejo como deschuponado, podas fitosanitarias, regulación de sombra y eliminación o cambio de árboles no productivos, todo lo cual permite renovar los tejidos

productivos, reducir la altura de las plantas, recuperar la capacidad productiva de las plantaciones y mantenerlas por más tiempo.



Figura 54.

Cambio de copas por nuevas variedades altamente productivas.

Foto: Fredy Forero Forero

Diagnóstico de la plantación

Una vez se define un cultivo como improductivo por tener producciones por debajo de 400 kg de cacao seco por hectárea, se procede a inventariar las plantas productivas, las improductivas, los espacios libres para resiembra, el tipo de sombrío y el estado en que se encuentra. Este diagnóstico consiste en una evaluación de observación directa, en la cual el productor pone en juego elementos de juicio sobre el estado de las plantas de cacao y el sombrío para la toma de decisiones (Palencia Calderón et al., 2011a). Cada planta se clasifica de acuerdo con la eficiencia productiva como excelente, buena, regular o improductiva (tabla 24). Las plantas clasificadas como buenas y excelentes son objeto de mejoramiento mediante podas de disminución de altura y adecuación de la arquitectura de la planta para rejuvenecer los tejidos, eliminar ramas improductivas, eliminar chupones y hacer control fitosanitario.

Las plantas clasificadas como regulares e improductivas son objeto de cambio de copa mediante injertación lateral llamada "tipo malayo" (Palencia Calderón & Gómez Santos, 2007), cuya técnica es oferta tecnológica de AGROSAVIA.

Tabla 24. Clasificación para determinar la eficiencia productiva de la plantación en general y la intervención de cada árbol

Clasificación	Criterios de evaluación				Identificación
	General del cultivo	Cada árbol de forma individual			
	Rendimiento (kg/ha)	Número de frutos por año	Índice de grano	Índice de mazorca	
Excelente	>1.000	>70	>1.6	<14	Sin marca
Bueno	800-1.000	40-70	1,4-1,6	14-16	Cinta blanca
Regular	400-800	20-30	1,2-1,4	16-20	Cinta amarilla
Improductivo	<400	<20	<1,2	>20	Cinta roja

Fuente: Elaboración propia a partir de Palencia Calderón y Gómez Santos (2007)

El diagnóstico de la plantación también debe incluir una clasificación de los árboles de sombrío permanente por especie, estado y utilidad. Aquellos que presenten edad avanzada o no tengan utilidad alguna se pueden marcar para ser eliminados previo permiso de las entidades que autorizan o las corporaciones autónomas regionales. A partir del diagnóstico se elabora un plano a mano alzada en el que se identifican las plantas para cambio de copa por injertación, las que son para eliminar por mal anclaje o daño radical, las buenas o excelentes para manejo agronómico, los espacios vacíos para resiembra y los sitos donde se ubican los forestales o sombríos permanentes (figura 55). A continuación, se relaciona el paso a paso para elaborar el diagnóstico:

1. Identificar área y límites de la parcela y estado sanitario del cultivo. Con GPS se efectúa la respectiva georreferenciación (para técnicos) y se determina la edad aproximada de la plantación.
2. Realizar un censo de las plantas según recomendaciones para determinar la eficiencia productiva y marcar con cintas de colores (tabla 24) a los candidatos a cambio de copa mediante injertación.

3. Identificar los árboles forestales o de sombrío permanente para definir su estado y utilidad con el fin de visualizar su aprovechamiento antes de intervenir las plantas de cacao.
4. Realizar un análisis de suelo completo que permita generar recomendaciones para incorporar correctivos de acidez y fertilización edáfica orgánica y/o química de acuerdo con los requerimientos del cultivo.
5. Determinar la distancia de siembra de las plantas de cacao y los espacios libres para resiembra.



Figura 55.

Plano del diagnóstico elaborado por un productor en el que representa el estado de su parcela para ser rehabilitada con los siguientes signos de identificación: X = árboles de cacao para rehabilitar, O = espacios libres para resiembra, Δ = árboles maderables y otros.

Fuente: Nelson Díaz Ariza.

Adecuación de la parcela que se va a intervenir

Una vez se elabore el diagnóstico de la plantación y se tenga claridad de las acciones y decisiones plasmadas en el plano, se debe reacomodar el sombrío existente mediante podas de realce y hacer aprovechamiento

forestal de los que no representan ninguna utilidad y provocan algún tipo de perjuicio previa autorización de las entidades competentes. Los residuos de esta práctica se deben repicar para facilitar la descomposición y se deben retirar del lote aquellos que representen alguna utilidad en la finca o externa. Es recomendable aplicar productos basados en picloram a las raíces de los árboles que se eliminan como medida preventiva contra la posible aparición de hongos radicales como *Rosellinia* sp. (Jaimes Suárez et al., 2021).

Los árboles identificados con cintas rojas y amarillas, catalogados como improductivos y regulares según clasificación de la tabla 24, se deben preparar previamente para los procesos de injertación. La preparación consiste en una poda fuerte (figura 56), practicada entre 15 y 30 días antes de la injertación en periodos en los que las precipitaciones son deficientes, y en eliminar troncos y nudos o protuberancias causadas por deformaciones o cojines florales y aplicar cicatrizante. De igual manera se debe verificar la existencia de árboles con troncos muy lignificados y deformados o con daños físicos, los cuales no son aptos para el proceso de injertación en tronco, pero cuentan con un sistema radical en buen estado, apto para inducir brotes de tipo ortotrópico o chupón basal para posterior injertado. Este método consiste en eliminar la planta para provocar la emisión de chupones, de estos seleccionar el más vigoroso y eliminar los restantes con el fin de maximizar el crecimiento del primero e injertar cuando tenga un desarrollo adecuado (Quiroz & Amores, 2002).

Los espacios libres identificados en el diagnóstico deben trazarse de acuerdo con las distancias de siembra de la plantación con el fin de homogenizar la densidad, abrir los hoyos y sembrar las plantas de cacao injertadas con las variedades priorizadas. También se pueden sembrar plantas de patronaje para luego injertarlas en campo con la variedad utilizada en la rehabilitación. Se sugiere sembrar colinos de plátano en sitios de resiembra muy amplios en los que se requiere sombrío temporal (figura 57) para las nuevas plantas (Jaimes Suárez et al., 2021). Adicionalmente, en estos espacios se pueden sembrar cultivos de cobertura como maíz y fríjol, que contribuyen al mejoramiento de la economía familiar, o sembrar especies forestales como el abarco si se necesita sombrío permanente de acuerdo con las líneas de los sombríos ya existentes en la plantación (Palencia Calderón et al., 2006).



Figura 56.

Poda fuerte para injertación.

Foto: Eduar Antolínez Sandoval



Figura 57.

Siembra de colinos de plátano como sombrío temporal.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

Manejo de las plantas clasificadas como excelentes y buenas

A las plantas de cacao clasificadas como excelentes o buenas en términos productivos y sanitarios se les hace manejo agronómico con podas para reducción de altura, inducción de nuevas ramas productivas y organización de la arquitectura de la planta, reactivación de cojines florales en la parte baja de las plantas y fertilización de acuerdo con los análisis de suelos y requerimientos del cultivo (Palencia Calderón & Gómez Santos, 2007). Los cortes de diámetro superior a 1 cm se deben cicatrizar para evitar la entrada de patógenos y plagas que deterioren la planta. Estas prácticas de manejo contribuyen al mejoramiento de la capacidad productiva, la disminución de las pérdidas causadas por problemas sanitarios y la ampliación del periodo productivo. Las plantas identificadas con cinta blanca deben surtir un periodo de evaluación con el fin de determinar si se continúa con su manejo o se destinan para el siguiente grupo de intervención.

Injertación de las plantas clasificadas como regulares e improductivas

Para la injertación de las plantas improductivas se deben considerar factores como la pendiente del terreno, puesto que en lotes inclinados el injerto se debe hacer por la parte superior del tallo con el fin de evitar futuros desgarres cuando la nueva copa inicie su producción. En terrenos planos la injertación se hace por el occidente del tronco para que el injerto reciba sombra y para que, una vez realizado el corte final de la planta improductiva, la nueva copa aproveche la luminosidad de la mañana para sus procesos fotosintéticos.

Estudios recientes de AGROSAVIA comparan métodos de injertación como el de aproximación y el lateral en tronco de tipo malayo para cambio de copa en plantaciones improductivas. Los resultados indican que en plantas cuyo diámetro de tronco es inferior a 10 cm, el injerto de aproximación presenta menor mortalidad (Vásquez Bettin et al., 2019), pero cuando los diámetros son de 10 a 20 cm, el método de injertación malayo tiene mayor prendimiento y eficiencia (figura 58).



Figura 58.

Injerto malayo.

Foto: Jiner Niño Solano

A continuación, se describen las recomendaciones y el paso a paso del proceso de elaboración del injerto lateral en tronco tipo malayo y del manejo posinjertación para cambio de copa en plantaciones improductivas de cacao en Boyacá (figura 59) (Palencia Calderón et al., 2011b):



Figura 59.

Diagrama del proceso de injertación lateral "injerto malayo" para cambio de copa en la rehabilitación de plantaciones improductivas.

Fuente: Elaboración propia a partir de Palencia Calderón et al. (2011a)

1. *Limpieza del tronco:* Es necesario limpiar el punto del árbol donde se hará la injertación de nudos, líquenes o lamas, plantas parásitas, con el fin de facilitar y optimizar el prendimiento.
2. *Corte en el tallo para la aplicación del injerto:* Practicar el primer corte de forma horizontal a una altura máxima de 40 cm.
3. *Ventana:* Se practica un nuevo corte en sentido vertical que inicie del centro del corte horizontal o se practican dos cortes paralelos entre sí, uno en cada extremo del horizontal. Se despega cuidadosamente la corteza de modo que quede una ventana mientras se prepara la vareta portayemas que se va a injertar (figura 60a).
4. *Preparación de la vareta portayemas que se va a injertar:* La vareta debe tener una madurez de 90 a 120 días ya que si es muy tierna puede afectar el prendimiento.
5. *Ubicación del injerto:* Entre la preparación de la yema y su ubicación en el tronco no deben pasar más de 20 segundos. Esto evita oxidaciones que dañan el injerto.
6. *Amarre del injerto:* Es importante que el amarre quede firme y se haga de manera cuidadosa pues de esto depende el éxito del prendimiento (figura 60b).



Figura 60.

Proceso de injertación. a. Apertura de ventana; b. Amarre del injerto.

Fotos: Eliana Báez Daza.

7. *Cubrir el injerto:* Es necesario impedir por todos los medios que el agua afecte al injerto para evitar hongos y bacterias y la pudrición de la yema. El injerto se debe cubrir con plástico trasparente tipo vinipel (figura 61) para darle soporte al injerto y evitar la entrada de agua.
8. *Ranura superior diagonal:* De ser necesario, se recomienda hacer un corte diagonal o en forma de V invertida en la parte superior del injerto para evitar el escurrimiento de agua directamente sobre el injerto.
9. *Desinfección de herramientas:* Se recomienda desinfectar las herramientas cuando se realiza el procedimiento árbol a árbol con el fin de evitar la proliferación de enfermedades como el mal del machete.



Figura 61.

Cubrir el injerto con vinipel.

Foto: Eliana Báez Daza

Manejo posinjertación de las copas rehabilitadas

1. *Destape del injerto:* El injerto se debe destapar de 30 a 35 días después de realizada la injertación según desarrollo, el cual se puede observar a través del plástico (figura 62a). Se recomienda destapar gradualmente

mediante la apertura de ventanas en el plástico para favorecer el crecimiento y un mes después quitar completamente el plástico (sin quitar el cordón de amarre). Se verifica si el injerto prendió (figura 62b) y se aplica fungicida o cicatrizante en donde quedó el corte.



Figura 62.

Injerto en leño grueso de *T. cacao*. a. Verificación del estado del injerto; b. Destape total de injerto.

Fotos: Eliana Báez Daza

Si el injerto no prende, se puede realizar de nuevo al lado y a la misma altura. Si el segundo intento tampoco prende, se procede a generar chupones (figuras 63a y 63b) y se erradica la planta a ras de suelo para luego cicatrizar y aplicar fertilizante. Posteriormente, se utiliza el chupón de más vigor o en su defecto se renueva la planta (siembra nueva).

2. *Manejo agronómico:* Si la injertación es efectiva, se continúa el manejo agronómico, que incluye aplicar fertilizantes, control de plagas y enfermedades y eliminar chupones salientes.



Figura 63.

Inducción para generar chupón. a. Corte a ras de suelo y cicatrización; b. Aplicación de abono orgánico.

Fotos: Eliana Báez Daza

3. *Crecimiento del injerto:* El óptimo crecimiento del injerto se evidencia por la aparición de hojas maduras. A medida que se desarrolla, se elimina de manera progresiva la parte aérea o el patrón intervenido. Este proceso dura de 90 a 120 días o hasta que las ramas alcancen una longitud de 40 a 50 cm y las hojas estén en capacidad de hacer fotosíntesis. En este momento se procede a la eliminación total de la copa (figura 64a) mediante un corte a ras del injerto en un ángulo diagonal de 60°. Se debe aplicar pasta cicatrizante para evitar pudriciones por entrada de agua o el ingreso de plagas y patógenos (figura 64b).



Figura 64.

Eliminación de copa de material vegetal de cacao rehabilitado. a. Corte en diagonal de la antigua copa. b. Aplicación de cicatrizante en el corte.

Fotos: Eliana Báez Daza

4. *Podas de formación de la nueva copa:* Las podas de formación se llevan a cabo a medida que crece el injerto y cuando alcanza un desarrollo óptimo. La función de estas podas es propiciar una adecuada arquitectura del árbol para que exista un equilibrio entre la zona de captación de luz y la zona de producción de frutos. Además, facilitan el control de enfermedades y la cosecha.

5. *La nueva copa:* Corresponde al árbol renovado, el cual inicia los primeros brotes de floración aproximadamente doce meses después y empieza a dar cosechas a partir de los 18 meses (AGROSAVIA TV, 2020). Con esta nueva copa en producción, finaliza la intervención para rehabilitación de plantaciones improductivas. Conseguido este punto, se continúa con un manejo agronómico eficiente y oportuno con el fin de mantener los rendimientos esperados.

Capítulo X.

Beneficio y poscosecha del grano de cacao

Colombia es reconocida por su producción de variedades de cacao de sabores y aromas finos catalogados como especiales en las evaluaciones sensoriales, con notas florales y frutales y de nueces, que las diferencian de otros materiales producidos en el mundo. Es importante atender con cuidado las etapas de producción, cosecha y poscosecha pues de estas depende que sobresalgan los sabores específicos y se puedan usar en la industria para comercialización (Jaimes Suárez et al., 2021).

La etapa de beneficio y poscosecha es clave para lograr el resultado final exitoso producto de la suma de factores edafoclimáticos, potencial genético del material vegetal de cacao y agronómicos que dependen del paquete tecnológico implementado. Se debe tener el mayor cuidado tanto en la cosecha del fruto como en el secado del grano.

Tipos de granos

De acuerdo con variables morfoagronómicas, el cacao está dividido en tres tipos (criollo, forastero y trinitario). En la tabla 25 se describe cada uno de estos materiales y el tiempo requerido para su adecuada fermentación.

Tabla 25. Principales tipos de cacao.

Tipo de cacao	Frutos	Característica
Criollo (nativo)	 Foto: Eliana Báez Daza	Mazorcas de color verde o rojo en estado inmaduro, forma generalmente alargada, surcos puntiagudos bien marcados, corteza delgada con versiones rugosas y lisas (tipo porcelana), granos de forma cilíndrica, almendras de color crema y matices blancos, crema y rosado. El grano se fermenta en un periodo de 2 a 4 días. Presenta bajo rendimiento y es susceptible a enfermedades y plagas. De 5 a 10 % de la producción mundial procede de estos materiales.
Forastero	 Foto: Jiner Niño Solano	De origen amazónico, mazorcas amelonadas, surcos poco profundos de corteza gruesa, granos semiplanos de color púrpura intenso. Fermenta en un periodo de 6 a 8 días; aproximadamente 80 % de la producción mundial proviene de estos materiales.
Trinitario	 Foto: Eliana Báez Daza	Frutos de tonalidades verdes o rojas en estado inmaduro. Como procede de la hibridación de los cacaos forastero y criollo, presenta cortezas rugosas, lisas o intermedias. Granos alargados, ligeramente cilíndricos, y cotiledón de violeta a rosa pálido. Se fermenta en un periodo de 4 a 6 días. De 10 a 15 % de la producción mundial corresponde a estos materiales.

Fuente: Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios (UGRA, 2018), Graziani de Fariñas et al. (2002)

El grano de cacao

Es indispensable conocer las partes del grano de cacao (figura 65) para tenerlas en cuenta al momento de practicar cortes. Estos cortes son indispensables a partir del día cuatro de fermentación para verificar si el grano se encuentra en óptimo estado de fermentación y debe pasar a secado.

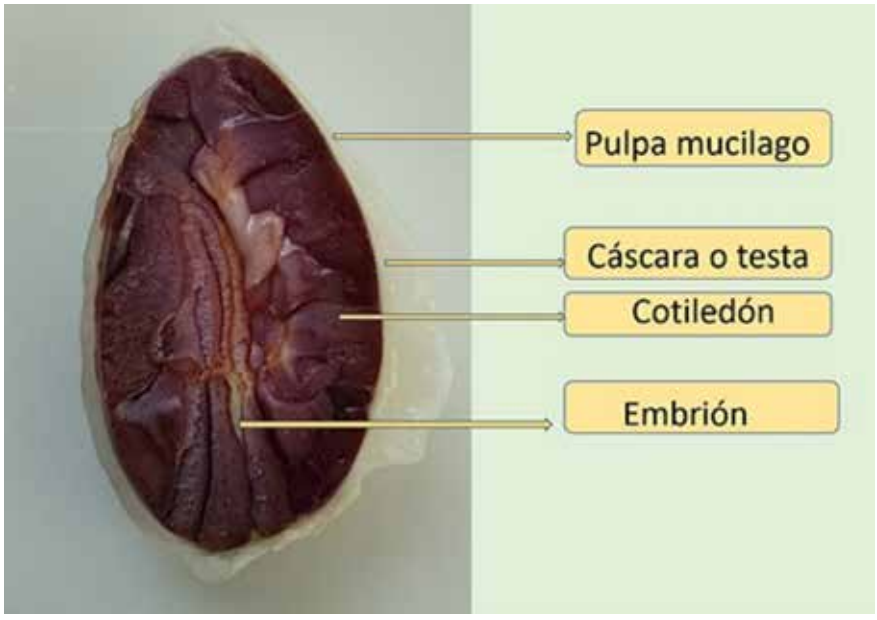


Figura 65.

Esquema de las partes del grano de cacao húmedo.

Fuente: Adaptado de Alcocer y Sandy (2015)

La fermentación dura de 2 a 7 días según las condiciones agroclimáticas de la región y el tipo de cacao. En orden de menor a mayor tiempo de fermentación se ubican el criollo, el trinitario y el forastero (Cubillos et al., 2008).

Indicadores de madurez del fruto

- Pérdida de brillo con respecto al fruto inmaduro.
- Manchas y líquenes en la parte externa de la corteza.
- El peso de la mazorca disminuye con respecto al fruto inmaduro.
- Se produce un ruido seco y vacío al golpear la mazorca con los nudillos.

- Se percibe movimiento de los granos al mover la mazorca.
- Los granos de la mazorca inmadura son compactos y de apariencia algodonosa mientras que los de la mazorca madura tienen un mucílago menos viscoso, con grano y placenta diferenciados (Cubillos et al., 2008).
- El color del fruto maduro cambia con respecto al del fruto inmaduro (figura 66).
- La corteza del fruto maduro se rompe o quiebra con facilidad si se golpea con un mazo o un instrumento sin filo.



Figura 66.

Cambio en la coloración que indica madurez óptima.

Foto: Eliana Báez Daza

Cosecha de mazorcas

En un proceso adecuado de beneficio se debe programar la cosecha para recolectar las mazorcas por lote y por genotipo o variedad (figuras 67a y 67b).



Figura 67.

Mazorcas maduras aptas para cosecha. a. Mazorcas listas para desengrullado en campo; b. Cosecha de mazorca en cultivo multiclonal (diferentes clones).

Fotos: Andrés Agudelo Castañeda y Eliana Báez Daza

Los frutos bajos se cortan con tijeras y los situados a mayor altura con horquilla. En cualquier caso, el corte se practica por la parte del pedúnculo más cercana al fruto para evitar daños en los cojines florales (Jaimes Suárez et al., 2021) (figura 68).

Es importante recolectar mazorcas con el grado de madurez adecuado. Las mazorcas exageradamente maduras (sobremaduras) o pintonas (falta de madurez) pueden afectar las cualidades organolépticas del grano (figuras 69a, 69b, 69c) (Red Cacaotera, 2020a). Las mazorcas sobremaduras contribuyen a la proliferación de hongos contaminantes y tienen mayor probabilidad de dar granos germinados. En pico de producción se sugiere cosechar con una periodicidad semanal o de máximo quince días (Cubillos et al 2008). Los frutos maduros de cacao tienen de 14 a 20° Brix de sólidos solubles y pH de 3 a 3,5 (Alcocer & Sandy, 2015).



Figura 68.

Cosecha de cacao con tijeras de mano.

Foto: Andrés Agudelo Castañeda



Figura 69.

Mazorca de cacao con diferentes grados de madurez. a. Madura; b. Sobremadura; c. Pintona.

Fotos: Fredy Forero y Éver Delgado

Extracción del grano (desengrulle)

El desengrulle o extracción de granos de cacao se lleva a cabo en un lugar donde la persona pueda estar adecuadamente sentada (figura 70).



Figura 70.

Desengrulle de frutos de cacao cosechados en campo.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

La labor se puede hacer directamente en el lote con las mazorcas dispuestas en un lugar limpio y seco. Se debe evitar el uso de anillos, cremas, perfumes y en lo posible la actividad se debe llevar a cabo con guantes de polietileno y con las manos bien lavadas, con el fin de que el grano no se contamine (Murrieta Medina & Palma Moscoso, 2018). Es importante que las mazorcas se partan con un mazo de madera o con un elemento sin filo (figura 71).

El corte se practica de tal forma que permita ver todos los granos, los cuales están adheridos a la placenta (figura 72a). Luego se retira el grano con la mano, se coloca en un contenedor plástico o en un costal limpio y se lleva al cajón fermentador (CNCH, 2019) (figura 72b).



Figura 71.

Método para partir las mazorcas con mazo de madera.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda



Figura 72.

Etapas del proceso de desengrulle de frutos de cacao. a. Corte practicado a la mazorca; b. Extracción de granos.

Fotos: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

La cáscara y placenta se disponen en montones para elaborar abono orgánico (figura 73a), y los lixiviados se recogen para preparar bebidas, vinagre o vino (figura 73b) (Balladares, 2016). De esta manera se evita la gestión de altos volúmenes de lixiviados, cortezas y placentas en un lugar diferente al de cosecha y se puede esparcir o amontonar la biomasa sólida para que se descomponga y atraiga polinizadores. Los residuos

también se pueden utilizar para alimentación de lombrices en caso de que la finca cuente con lombricompost (Vargas & Merchán, 1994).



Figura 73.

Manejo de residuos sólidos y lixiviados de la recolección de granos de cacao. a. Cáscara de mazorca utilizada como abono orgánico; b. Recolección de lixiviados.

Fotos: Eliana Báez Daza y Fredy Forero Forero

El grano se deposita en recipientes limpios y secos (figura 74a) y se lleva a los cajones de fermentación (figura 74b). Los cajones solo deben utilizarse para fermentación con el fin de evitar contaminación por otros usos.



Figura 74.

Fermentación de granos de cacao. a. Granos de cacao en contenedores de fermentación; b. Disposición de masa de cacao en los cajones.

Fotos: Genaro Andrés Agudelo Castañeda y Fredy Forero Forero

La fermentación

La fermentación se divide en dos etapas. La primera, llamada "fase anaerobia", dura cerca de 48 horas y en ella se produce una reacción bioquímica que reduce la astringencia y el amargo, libera los precursores del aroma y convierte los azúcares del mucílago en alcoholes. Se lleva a cabo así un proceso de descomposición en el que se libera CO_2 y agua, y la temperatura aumenta a 45 °C. Se pasa luego a una segunda etapa, llamada "fase aerobia" u "oxidativa", en la que disminuye la humedad y el alcohol se convierte en ácido acético, el cual permite continuar con la formación de precursores y completar los procesos de sabor y aroma (Jaimes Suárez et al., 2021). Durante este proceso se realizan volteos para permitir la entrada de oxígeno (aireación de la masa) y a favorecer el crecimiento de los microorganismos que se necesitan para completar las fases de fermentación (Red Cacaotera, 2020b).

En la fermentación los microrganismos interactúan con el grano de cacao cubierto de mucílago. En condiciones anaerobias o de aerobiosis y según la etapa de fermentación, estos microorganismos generan cambios bioquímicos favorables para acentuar los atributos de aroma y sabor en la almendra de cacao. La elevación de la temperatura es un factor importante para mantener la acción microbiológica durante las más de 144 horas que dura el proceso. Por todo esto es importante que la totalidad de la masa se fermente al mismo tiempo y para ello se recomienda llevar a cabo la apertura de mazorcas y el desengrulle en un tiempo de máximo 24 horas.

A las 48 horas de iniciada la fermentación la masa debe alcanzar una temperatura superior a 40 °C. Durante este proceso el cacao debe hincharse y producir la muerte del embrión, y se practican cortes longitudinales para verificar el proceso y la tonalidad interna café oscuro (Fedecacao, 2018). Es importante colocar sacos de fique u hojas de plátano que permitan aumentar la temperatura de la masa (figura 75).



Figura 75.

Método para tapar la masa de forma adecuada.

Foto: Fredy Forero Forero

Instrumentos para la fermentación

La fermentación del grano de cacao por lo general se lleva a cabo en cajones de madera individuales, lineales, en escalera o semiescalera, o en fermentadores rotatorios. Es importante tener en cuenta que la madera de los cajones fermentadores debe ser de colores claros. Se privilegian las maderas duras y resistentes a la humedad. A excepción del pino, las maderas oscuras y con presencia de resinas pueden interferir en la calidad del grano y generar olores extraños (Benito et al., 2008). Las maderas con taninos también pueden manchar el grano.

Los cajones de madera tienen ventajas comparativas con respecto a los contenedores de plástico ya que permiten mayor maniobrabilidad y favorecen la expresión de las características químicas del grano (Contreras et al., 2004)

Las dimensiones y la cantidad de cajones fermentadores dependen del potencial productivo de la finca o del beneficiadero comunitario que

decida manejar la asociación. Estos fermentadores deben permitir realizar fácilmente las labores de llenado, volteo y recuperación de la masa de grano, así como la limpieza. El Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) ofrece tres opciones, cuyas características se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Dimensiones de los cajones fermentadores individuales

Opción	Dimensiones (m)			Capacidad: peso (kg)	
	Largo	Ancho	Alto	Grano fresco	Grano seco
1	1,0	0,4	0,6	378	141
2	1,5	0,8	0,6	648	246
3	2,0	0,8	0,6	756	288

Fuente: Elaboración propia a partir de Arvelo Sánchez et al. (2017)

Cajón fermentador lineal

Se construye de tres secciones individuales separadas por tablas deslizables que permiten pasar el grano de una sección a otra, según los requerimientos de las etapas de fermentación (figura 76).



Figura 76.

Cajón lineal de fermentación de granos de cacao.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

Cajón fermentador en escalera

Se construye de tres secciones ubicadas de forma escalonada. La masa de cacao se deja en el cajón superior durante las primeras 48 horas y luego se traslada al segundo cajón mediante volteo, donde debe permanecer 24 horas. Finalmente, la masa se voltea en el tercer cajón, donde culmina su proceso de fermentación (figura 77).



Figura 77.

Cajón de fermentación de granos de cacao tipo escalera.

Fuente: Eliana Báez Daza

Cajón fermentador semiescalera

Reúne las opciones del cajón lineal y el de escalera (figura 78). Cuenta con un cajón más elevado y dos secciones bajas situadas en el mismo nivel, y el funcionamiento del cajón superior es similar al de escalera. Su diseño es modular y cada sección tiene su respectiva tapa, que contribuye a mantener la temperatura.

En el cajón superior se desarrolla la fase anaeróbica durante las primeras 48 horas bajo las condiciones expuestas anteriormente y sin manipular la masa de grano de cacao. Viene después la fase aeróbica, en la que se realizan volteos cada 24 horas, después de trasladar la masa del cajón 1 al cajón 2 con una pala de madera limpia y libre de contaminantes. Se realizan movimientos de rotación a la masa mediante los volteos, de manera que los granos que estaban en la parte superior quedan en la inferior, lo que promueve una fermentación homogénea. Los volteos cada 24 horas se hacen del cajón 2 al 3 y viceversa hasta que se complete la fermentación. Este proceso se realiza hasta terminar la fermentación (AGROSAVIA, 2022b).



Figura 78.

Tipos de cajones en madera para la fermentación de granos de cacao. a. Cajón fermentador modular en semiescalera; b. Cajón elaborado en madera con tapa para evitar contaminación.

Fotos: Fredy Forero y Lucero Rodríguez Silva

Fermentador rotatorio

El fermentador rotatorio (figura 79) es una opción que facilita el beneficio del grano dado que da mayor rapidez a las remociones de la masa, disminuye el esfuerzo físico del operario, permite un mayor control de las pérdidas de calor y facilita el descargue de la masa fermentada. Con una capacidad aproximada de 250 kg, cuenta en su interior con unas palas que remueven el grano cuando se gira la masa. Es de fácil manejo y aumenta 14 % la calidad de la fermentación (Espinosa et al., 1998).



Figura 79.

Fermentador en la modalidad de tambor rotatorio.

Fuente: Lucero Rodríguez Silva

Indicaciones para tener en cuenta en el alistamiento de la masa de cacao

Las siguientes son algunas indicaciones que deben tenerse en cuenta al preparar la masa de cacao o cacao en baba:

- Separar los granos sanos de aquellos partidos o afectados por enfermedades o plagas.
- Evitar contaminar la masa con suelo, residuos vegetales, restos de placenta o trozos de cáscara de las mazorcas.
- Utilizar granos con la madurez adecuada, ojalá del mismo genotipo.
- En los genotipos que desprenden mayor cantidad de lixiviados (mucílago) (por ejemplo, CCN 51), se recomienda drenar por un tiempo la masa de cacao antes de iniciar el proceso de fermentación (Pérez & Contreras, 2017).
- Dejar un espacio de 10 cm entre el borde del cajón y la masa, tapar esta con hojas de plátano o nacuma y poner con cuidado la respectiva tapa.

Indicadores de una buena fermentación

- Elevación de la temperatura de la masa de cacao.
- Hinchamiento del grano.
- Muerte del embrión (Sodré, 2017).
- Disminución de los sólidos solubles.
- Cambio de color del grano, de blancuzco a pardo oscuro a medida que transcurre la fermentación.
- Durante el proceso de fermentación, al abrir el grano en dos mitades se observa que el color morado se irradia del centro hacia los bordes.
- Nibs del grano delimitados y arriñonados.
- Olor agradable (al finalizar el proceso).
- Ligera presencia de mucílago seco adherido a la testa del grano.
- Mínima presencia de moho en el grano fermentado.
- Forma arriñonada en las caras que quedan expuestas al hacer la prueba de corte en el grano que está en proceso de fermentación (figura 80).



Figura 80.

Corte de grano para verificar estado de la fermentación en material acriollado.

Foto: Fredy Forero Forero

Indicadores de una mala fermentación

- Olor desagradable de la masa de grano.
- Color oscuro de la testa del grano por sobrefermentación o claro por deficiente fermentación.
- Granos germinados.
- Masa que no incrementa la temperatura.
- Al abrir el grano no se observa degradación de los polifenoles del centro hacia los bordes.
- Presencia de moho en los granos.
- Colores morado-oscuros en el interior de la almendra fermentada.
- Granos pizarrosos.
- Granos con mucílago en la testa sin fermentar.
- Granos agrupados, pegados o fuertemente adheridos.

Secado

Según norma del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec, 2021), el grano fermentado debe entrar al proceso de secado con aproximadamente 50 a 60 % de humedad y durar de 6 a 7 días en deshidratación según condiciones climáticas hasta que la humedad llegue a 7 %. El grano debe empezar el proceso de secado con una capa de aproximadamente 10 cm de espesor, disminuir progresivamente a partir del tercer día hasta alcanzar los 2 cm y ser sometido a remociones periódicas (figura 81). El secado se lleva a cabo de manera pausada para que el proceso de fermentación pueda completarse y se eliminen la humedad y la acidez. Un proceso acelerado cambia la apariencia del grano y su calidad sensorial.



Figura 81.

Remociones periódicas para un secado adecuado.

Foto: Genaro Andrés Agudelo Castañeda

El secado al sol debe llevarse a cabo en lugares adecuados, protegidos de contaminantes externos (figura 82a), con paseras de madera (camas en listones de madera) o casas elba (estructura de madera con techo corredizo) en su interior (figura 82b) que permitan trabajar de manera más limpia.



Figura 82.

Tipos de secador. a. Paseras bajo cubierta de plástico; b. Pasera bajo cubierta de teja de policarbonato.

Fotos: a. Fredy Forero; b. Eliana Báez Daza

Se debe evitar secar en carreteras, patios de cemento o superficies a ras de suelo para evitar contaminación por microrganismos, tierra, excrementos, partículas metálicas, polvos pesticidas y demás contaminantes. El sitio de secado debe contener una cubierta con plástico trasparente (figura 83a) o teja plástica (figura 83b) para que no entre humedad por lluvia u otros factores que deterioren la calidad.



Figura 83.

Paseras de secado. a. Con cubierta de plástico; b. Con cubierta de teja plástica.

Fotos: Eliana Báez Daza y Andrés Agudelo Castañeda

Terminación del secado

Los granos de cacao terminan de secarse cuando la humedad disminuye hasta 7 o 7,5 % de acuerdo con la normativa vigente (Icontec, 2021). La humedad se mide con equipos portátiles y basta con evaluar una pequeña muestra del grano para conocer cuál es su porcentaje (figura 84a). Si no se tienen los equipos, el estado óptimo de secado se puede verificar de manera manual (figura 84b) mediante la observación de aspectos físicos como los siguientes:

- El grano seco desprende fácilmente la cascarilla.
- El choque entre granos emite un sonido de chasquido y cuando al grano se le aplica fuerza se parte fácilmente.



Figura 84.

Formas de verificar la humedad del grano de cacao. a. Prueba de humedad por sonido; b. Medidor portátil de humedad.

Fotos: Lucero Rodríguez y Eliana Báez Daza

Indicadores de un mal secado

- Granos aplanados.
- Granos con moho.
- Granos que no sueltan la cáscara.
- Granos con porcentaje de humedad superior a 7 %.
- Granos de olor desagradable.
- Colores indeseables en la superficie de la almendra.

Si el grano está seco y se quiere evaluar la calidad se debe realizar un corte transversal con un elemento afilado a una porción elegida al azar, opcionalmente con una guillotina (figura 85). Así se puede observar si los nips estás separados y si el color es café claro o marrón (condiciones óptimas) o si por el contrario hay mohos y granos violetas o pizarrosos (condiciones defectuosas), casos en los cuales se debe mejorar la calidad del grano.



Figura 85.

Cortes de granos de cacao con guillotina.

Fotos: Lucero Rodríguez Silva

Un ejemplo de un grano bien fermentado se muestra en la figura 86, el cual debe tener una coloración café o marrón, una cáscara que se desprende, unos alveolos de forma arriñonada y un agradable olor a chocolate (CNCH, 2020).



Figura 86.

Grano de cacao bien fermentado.

Foto: Eliana Báez Daza

Almacenamiento

En lo posible el agricultor no debe mantener el grano beneficiado en su finca dado que normalmente no cuenta con las condiciones adecuadas de almacenamiento. El grano de cacao es higroscópico, es decir, tiende a retomar la humedad del ambiente, lo que propicia la aparición de moho o la contaminación por plagas que perforan el grano. Adicionalmente, si no se dispone de bodegas separadas, el grano puede adquirir olores no adecuados para la comercialización.

El grano seco debe conservarse en costales nuevos de fique preferiblemente (figura 87a) para que permanezca aireado, en un lugar limpio y seco alejado de agentes de contaminación como productos para la fertilización, animales, olores fuertes y principalmente humedad. La figura 87b muestra una bodega especial para almacenarlo mientras se lleva a los lugares de acopio y venta.



Figura 87.

Almacenamiento de grano seco de cacao. a. Grano conservado en costales de fique; b. Bodega de almacenamiento.

Fotos: Eliana Báez Daza

El departamento de Boyacá cuenta con centros de acopio donde tienen una tabla de descuento en el pago del kilogramo de grano por contenido de humedad. Esto ha hecho que los agricultores se motiven más para

mejorar la calidad del grano y de esta manera puedan comercializar mayores volúmenes con estándares de calidad propios de la región (figura 88).

ASOCACABO
Asociación Campesina de Cultivadores Agropecuarios de San Pablo de Borbur

TABLA DE DESCUENTO % HUMEDAD EN PESO

HUMEDAD %	DESCUENTO EN GRAMOS	
	KILOGRAMO	@ - ARROBA
71---7,5	10	130
7,6---8	20	250
8,1---8,5	28	360
8,6---9	38	475
9,1---9,5	48	600
9,6---10	54	680
10,1---10,5	61	770
10,6---11	68	840
11,1---11,5	71	890
11,6---12	76	950
12,1---12,5	80	1000

Figura 88.

Descuento por humedad del grano seco en centro de acopio en San Pablo de Borbur (Boyacá).

Foto: Elkin Yesid Montero Poveda

Gracias al compromiso de los productores, el departamento de Boyacá ha participado en varios concursos internacionales y su grano seco ha sido catalogado como el mejor de Colombia (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario [Finagro], 2021). En virtud de producciones como la de Boyacá, Colombia se ha venido posicionado como productor de un cacao fino de sabor y aroma que se exporta a Europa y a otros mercados internacionales. Boyacá produce chocolates de mesa (figuras 89d y 89e) y chocolatería (figura 89a, 89b y 89c) con una marca propia que incluye mano de obra regional, capacitación e inclusión de la comunidad.



Figura 89.

Productos de agricultores y transformadores de cacao de Pauna y Borbur (Boyacá).

Fotos: Nicolas Tabera y Rosa Padilla Forero

Requisitos para la comercialización de grano nacional

La norma 1252 (Icontec, 2021) establece los requisitos físicos y químicos del grano en el país (tablas 27 y 28). Según esta normativa, el grano de cacao común destinado a comercialización se divide en premio, corriente

y pasilla, mientras que el cacao catalogado como especial se divide en premio y corriente. Los granos se evalúan según tamaño del lote en sacos, lo cual requiere tomar muestras parciales escogidas aleatoriamente de 100 granos en promedio (Icontec, 2021).

Tabla 27. Clasificación del grano de cacao para comercialización nacional

Requisitos	Clasificación del grano de cacao		
	Premio/ Especial	Estándar	Corriente
Granos bien fermentados, en % mínimo.	70	65	55
Granos insuficientemente fermentados y violetas, en % máximo.	30	35	45
Masa (peso) en gramos de 100 granos	>120	95-120	<95
Contenido de humedad, en % máximo de fracción de masa.	7,0	7,5	7,5

Fuente: Adaptado de Icontec (2021)

Tabla 28. Tolerancias para el grano de cacao

Requisitos	Premio/ Especial	Estándar	Corriente
Contenido de impurezas o materias extrañas, en % máximo de fracción de masa.	0	0,3	0,5
Grano con moho interno, número máximo de granos/100 granos.	1	3	5
Grano dañado por insectos, germinados o ambos, número máximo de granos/100 granos.	1	2	3
Contenido de granos partidos, número máximo de granos/100 granos.	1	2	5
Contenido de almendra, en % mínimo de fracción de masa.	No aplica	No aplica	40-60
Granos sin fermentar (pizarrosos), en % máximo.	1	3	5

Fuente: Adaptado de Icontec (2021)

Los conceptos descritos arriba deben ser comprendidos y desarrollados por los agricultores con el fin de mejorar la calidad del grano seco, aumentar las posibilidades de incrementar los precios y garantizar una comercialización óptima y con buenos estándares de calidad.



Capítulo XI.

Costos de producción

El sistema de producción de cacao se compone de diferentes costos, entre los cuales se destacan los de establecimiento de vivero y de producción de material vegetal clonado, así como los de establecimiento del cultivo y mantenimiento a lo largo del tiempo. Para las siguientes estimaciones se proyectó un cultivo a 20 años y se incluyó una inversión en rehabilitación para los años 11, 12 y 13.

Costos de establecimiento de vivero y producción de material vegetal clonado de cacao

La construcción y dotación de un vivero de cacao con capacidad de producción de 15.000 plántulas tiene un costo aproximado de COP 19,27 millones. El costo de producir una plántula es de COP 1.285 aproximadamente, pero esto depende del valor de los insumos y de la mano de obra en la región (tabla 29).

Tabla 29. Costos de construcción y dotación de vivero y de producción de plántulas de cacao a precios de 2020

Rubro	Valor
Insumo	$9.513.140
Mano de obra	$5.520.000
Herramienta	$107.000
Infraestructura	$1.840.000
Arriendo de espacio	$600.000
Pérdidas (10 %)	$1.629.014
Total	$19.278.154

Fuente: Elaboración propia

Costos de establecimiento del cultivo de cacao bajo arreglo agroforestal y de mantenimiento de 20 años

De acuerdo con datos recopilados en campo, el establecimiento de un sistema agroforestal de cacao demanda en el primer año la mayor inversión. Los costos en este primer año son de aproximadamente COP 9,48 millones por concepto de mano de obra y de COP 9,8 millones por materiales, suministros y unidad de beneficio, para un total aproximado de COP 19 millones, valor que incluye la adecuación del terreno, el establecimiento de sombríos (temporales y permanentes), la siembra de plántulas de cacao y las labores de mantenimiento de la parcela. A partir del quinto año, el costo de mantenimiento del cultivo es de aproximadamente COP 9,5 millones/ha, ya que entonces no se requieren labores de deshoje de plátano (este se elimina), y el sombrío permanente disminuye las labores de desyerbe y control de malezas.

En la elaboración del flujo de caja del establecimiento de una hectárea de cacao con sistemas agroforestales, se incluye el costo de rehabilitación amortizado en los años 11, 12 y 13, periodo en el cual el cultivo de cacao entra a un proceso de baja producción. Rehabilitar una hectárea tiene un costo aproximado de COP 6 millones, y los costos que se presentan en la tabla 30 están sujetos a variaciones como valor del jornal (que en este caso se estimó en COP 40.000), tipo de unidad de beneficio establecida en la finca, precios del material vegetal y uso de mano de obra familiar, la cual permite reducir en gran medida los costos de producción.

Tabla 30. Flujo de caja para el establecimiento de una hectárea de cacao bajo arreglo agroforestal a precios de 2020

Rubros	Año de establecimiento	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8-20
Material vegetal	$3.195.000							$1.370.000
Mano de obra	$9.480.000	$6.320.000	$6.360.000	$6.601.680	$6.601.680	$6.601.680	$6.601.680	$88.111.840
Insumos	$2.296.753	$2.336.553	$2.761.553	$2.866.492	$2.866.492	$2.866.492	$2.866.492	$39.118.396
Herramientas	$392.000	$39.900	$39.000	$40.482	$40.482	$40.482	$40.482	$526.266
Unidad de beneficio	$4.000.000							
Costos totales	$19.363.753	$8.695.553	$9.160.553	$9.508.654	$9.508.654	$9.508.654	$9.508.654	$129.126.502
Producción de cacao (kg) por año	0	0	140	420	840	1.804	2.064	28.598
Producción de plátano (kg) por año	9.450	9.720	6.750					
Ingresos por cacao	0	0	$1.088.749	$3.266.248	$6.532.495	$14.030.368	$16.050.915	$222.404.120
Ingresos por cultivo transitorio	$7.560.000	$7.776.000	$5.400.000	$0	$0	$0	$0	$0
Ingreso por venta forestal								$417.208.725
Total de ingresos	$7.560.000	$7.776.00	$6.488.749	$3.266.248	$6.532.495	$14.030.368	$16.050.915	$639.612.845
Utilidad	-$11.803.753	-$919.553	-$2.671.804	-$6.242.406	-$2.976.159	$4.521.714	$6.542.261	$510.486.343

Nota: Los precios del cacao y plátano se mantuvieron constantes en la proyección a 20 años. El jornal se estimó en $40.000, pero este costo puede variar según las regiones.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la información anterior se puede realizar una estimación de indicadores financieros del sistema de producción que además tenga en cuenta la tasa social de descuento de 9 % que el Departamento Nacional de Planeación (DNP) establece para la evaluación social de proyectos (Piraquive et al., 2018). La estimación de indicadores sirve para evaluar la rentabilidad de una hectárea de cacao y con ella se obtuvo un valor presente de COP 98 millones; una tasa interna de retorno (TIR) de 24 %, mayor que la tasa de descuento, y una relación costo-beneficio de COP 1,93/peso invertido. Lo anterior evidencia que el modelo productivo para el cultivo de cacao de AGROSAVIA es viable y rentable desde el punto de vista técnico y económico, debido a que los ingresos superan los egresos. Para mejorar los indicadores, se pueden establecer dos hectáreas, con las cuales los costos no variarán mucho y en cambio la producción se duplicará, lo que se traduce en mejores ingresos. Asimismo, la estimación incluye los ingresos adicionales que se pueden obtener a partir del año 20 con la venta de los árboles maderables, cuyo valor total aproximado es de COP 417 millones si se siembran 300 árboles de abarco, aunque este valor puede cambiar según la especie forestal que se utilice como sombrío permanente.

Referencias

Abarca Monge S., & Aguilar Vargas R. (2002). *Producción de sustratos para viveros*. República de China; Organismo Internacional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). https://studylib.es/doc/4735787/producci%C3%B3n-de-sustratos-para-viveros

AGROSAVIA TV. (2020). *Recomendación de uso de la técnica injerto malayo como práctica de renovación de plantaciones* [Video]. https://www.youtube.com/watch?v=NL1JxU3pz_Q&t=7s

Agudelo Castañeda, G. A., Palencia Calderón, G. E., Antolinez Sandoval, E. Y., & Báez Daza, E. Y. (2017). *Nuevas variedades de cacao TCS (Theobroma Corpoica La Suiza) 13 y 19*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/11536

Agudelo-Castañeda, G. A., Cadena-Torres, J., Almanza-Merchán, P. J., & Pinzón-Sandoval, E. H. (2018). Desempeño fisiológico de nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo la sombra de tres especies forestales en Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 12*(1), 223-232. http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7341

Agudelo Castañeda, G. A., Cañar Serna, D. Y., Pabón Morales, M. A., Bello Gáfaro, M., & Hernández Nopsa, J. F. (2021*). Manual técnico para la producción de semilla de cacao en vivero para los Santanderes y Boyacá.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. https://doi.org/10.21930/agrosavia. manual.7404586

Alcocer, E., & Sandy, X. (2015). *Manual de control de calidad en laboratorio y centro de acopio*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Alianza en Energía y Ambiente con la Región Andina (AEA); Ministerio de Relaciones Exteriores de Finlandia.

Alfonso, L. (2020). *Evaluación del comportamiento de los cultivos transitorios maíz duro* (Zea mays *L.*) *y frijol caupi* (Vigna unguiculata *L.*) *en un sistema de agricultura familiar bajo arreglos agroforestales con cacaos especiales y maderas finas, en el municipio de Páez, Boyacá* [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].

Almeida, A. F., & Valle, R. R. (2007). Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology, 19*(4), 425-448. https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011

Álvarez-Carrillo, F., Rojas-Molina, J., & Suárez-Salazar, J. C. (2012). Simulación de arreglos agroforestales de cacao como una estrategia de diagnóstico y planificación para productores. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 13*(2), 145-150. http://revista.corpoica.org.co/index.php/revista/article/view/249/252

Alverson, W. S., Whitlock, B. A., Nyffeler, R., Bayer, C., & Baum, D. A. (1999). Phylogency of the core Malvales: evidence from ndhF sequence data. *American Journal of Botany, 86*(10), 1474-1486. https://doi.org/10.2307/2656928

Alvim, P. D. T. (1967). Eco-physiology of the cacao tree. In *Conférence internationale sur les recherches agronomiques cacaoyères, 15-20 nov. 1965, Abidjan (Côte d'Ivoire).*

Alvim, P. (1975). *Ecophysiology of cacao.* Symposium of Ecophysiology of Tropical Crops, Manaos, Brasil.

Alvim, P. (1987). Relaciones entre factores climáticos y producción de cacao. En *10th International Cocoa Research Conference, Santo Domingo, República Dominicana* (pp. 34-42). Cocoa Producers' Alliance.

Amores, F. (2008). Diferencias entre el cacao nacional y CCN-51 desde el punto de vista agronómico, físico, químico y organoléptico [Ponencia]. En *Seminario Internacional de cacao: avances de investigación, Floridablanca, Santander.*

Aranzazu Hernández, L. F. (2003). *Evaluación de híbridos y clones de cacao en rendimiento y calidad para la zona marginal baja cafetera bajo sistema agroforestal.* Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Luker. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/19272/ 4798_59753.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Arboleya, J. (Ed.). (2018). *Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura* [Serie técnica 245]. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA. http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/st-245-2018.pdf

Arévalo de Gauggel, G., & Castellano, M. (2009). *Manual fertilizantes y enmiendas*. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano, Honduras. https://www.se.gob.hn/media/files/media/Modulo_6_Manual_Fertilizantes_y_Enmiendas..pdf

Arvelo Sánchez, M. Á., González León, D., Maroto Arce, S., Delgado López, T., & Montoya López, P. (2017). *Manual técnico del cultivo de cacao: prácticas latinoamericanas*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi_87OcyY_3AhUuTDABHXBHDP4QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.iica.int%2Fbitstream%2F11324%2F6181%2F1%2FBVE17089191e.pdf&usg=AOvVaw1uqxzSnIjjkzyq5fosjpQG

Argüello, O., Mejía, L., Contreras, N., & Toloza, J. (1999). *Evaluación, introducción y multiplicación de árboles elite de cacao como estrategia de productividad para el nororiente colombiano*. http://hdl.handle.net/11348/4144

Báez Daza, E. Y. (2018). *Producción y aporte de nutrientes en la hojarasca de las especies abarco* (Cariniana pyriformis *M.*), *teca* (Tectona grandis *L. f.*) *y cacao* (Theobroma cacao *L.*) *en un sistema agroforestal en los municipios de Rionegro, Santander y Muzo, Boyacá* [Tesis de maestría, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Bogotá]. https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/1026/Producci%F3n%20y%20aporte%20de%20nutrientes%20en%20la%20hojarasca%20de%20las%20especies%20abarco,.pdf;jsessionid=D9B81D35E263964CDAFEEE5B8C9418AC?sequence=1

Balladares, C. A. (2016). *Caracterización físico-química de los desechos agrícolas del cacao y el café del litoral ecuatoriano y su potencial empleo como biocombustibles*. Universidad Las Palmas de Gran Canaria. https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/22931/4/0736428_00000_0000.pdf

Barbazán, M. (1998). *Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes*. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica, Montevideo, Uruguay. http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/publica/AnPlantas.pdf

Barragán Quijano, E., Caicedo, A. M., Jaramillo, C., García, J., Rojas, J., Ramírez, E. L., Galvis, I., Rivera, J. J., Sandoval, A., Toscano, Y., Correa, L., Guarnizo, J., Turriago, J., Reyes, W., Ramos, G., Gómez, A., Rivera, V., Castillo, M., & Gamboa, M. (2012). *Establecimiento de estrategias de manejo del agua de riego para la producción sostenible y competitiva de cacao en las zonas productoras del Tolima, Huila y Santander: informe final de proyecto de investigación ejecutado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica)*.

Batista, L. (2009). *El cultivo de cacao: guía técnica*. Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF).

Beer, J., Muschler, R., Kass, D. C. L., & Somarriba, E. J. (1998). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems, 38*(1-3), 139-164. http://dx.doi.org/10.1023/A:1005956528316

Benito J., Altamirano, E., Pinchi, N. (2008). *Cosecha y beneficio primario del cacao*. Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/766

Boyer, J. S. (1971). Nonstomatal inhibition of photosynthesis in sunflower at low leaf water potentials and high light intensities. *Plant Physiology, 48*(5), 532-536. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC396901/

Carabalí Muñoz, A., Senejoa Lizcano, C. E., & Montes Prado, M. (2018). *Reconocimiento, daño y opciones de manejo de* Carmenta foraseminis *Eichlin (Lepidoptera: Sesiidae), perforador del fruto y semilla de cacao* Theobroma cacao *L. (Malvaceae).* http://hdl.handle.net/20.500.12324/34398

Cardona Velásquez, L., Rodríguez-Sandoval, E., C., & Cadena Chamorro, E. M. (2016). Diagnóstico de las prácticas de beneficio del cacao en el departamento de Arauca. *Revista Lasallista de Investigación, 1*3(1). http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-44492016000100009

Carvajal-Rivera, A. S., Jaimes-Suárez, Y. Y., Guzmán-Plazola, R. A., Ortiz-García, C. F., & Sandoval-Islas, J. S. (2021). Temporal dynamics of witches' broom disease (*Moniliophthora perniciosa*) in six cocoa clones with and without shading. *Journal of Plant Pathology, 104*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s42161-021-00963-6

Castilla, C. E., Leon Moreno, C. E., Rojas Molina, J., & Gutiérrez, A. (2011). *Evaluación del potencial y el estado nutricional de los suelos cacaoteros de Colombia* [Ponencia]. Seminario Nacional de fertilización de suelos cacaoteros y remediación por contaminación, Bucaramanga, Santander.

Chepote, R. E., Sodre, G. A., Reis, E. L., Pacheco, R. G., Marrocos P. C. L., & Valle, R. R. (2013). Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacaueiro no sul da Bahia [Boletim tecnico n.º 203]. Ministerio da Agricultura, Pecuaria e Abastecimento; Comissao Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Cepec); Centro de Pesquisas do Cacau (Ceplac). https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/boletins-tecnicos-bahia/bt-203.pdf

Compañía Nacional de Chocolates [CNCH]. (2019). *Cosecha, beneficio y calidad del grano de cacao* (Theobroma cacao *L.*). https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/Cartilla-Cosecha-Benef-Calidad-SEP-2019.pdf

Compañía Nacional de Chocolates [CNCH]. (2020). *El grano de cacao y su calidad*. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2020/06/El-grano-de-cacao-y-sucalidad_compre.pdf

Compañía Nacional de Chocolates [CNCH]. (2021). *Características clones de cacao CNCH 12 y CNCH 13*. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2021/03/PDF-CLONES-12-Y-13-copia.pdf

Compañía Nacional de Chocolates [CNCH], Interconexión Eléctrica S. A. E. S. P. [ISA] & Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2014). *Guía para el cultivo de cacao*. https://issuu.com/pnudcol/docs/cartilla-final

Contreras, C., Ortiz de Bertorelli, L., Graziani de Fariñas, L., & Parra, P. (2004). Fermentadores para cacao usados por los productores de la localidad de Cumboto, Venezuela. Agronomía Tropical, 54(2), 219-232. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2004000200006&lng=es&tlng=es

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Corpoica]. (2015). *Clon de cacao TCS 06: Theobroma Corpoica La Suiza 06*. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/34651

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2022a). *Modelo agroforestal de cacao con maderas finas tropicales*. https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnologica/0031-establecimiento-y-manejo-de-arreglos-agroforestales-con-cacao

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. (2022b). *Indicaciones de uso de una unidad modular de fermentación y secado de grano de cacao.* http://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/download/234/218/1461-1?inline=1

Cuatrecasas, J. (1964). Cacao and its allies, a taxonomic revision of the genus *Theobroma.* In *Systematic plant studies* (pp. 379-614). Smithsonian Institution Press. https://repository.si.edu/handle/10088/27110

Cubillos G., Merizalde G. J., & Correa, E. (2008). *Manual de beneficio del cacao*. Secretaría de Agricultura de Antioquia; Compañía Nacional de Chocolates; Corporación para Investigaciones Biológicas (CIB); Grupo GIEM Universidad de Antioquia. https://chocolates.com.co/wp-content/uploads/2018/05/manual_beneficio_cacao.pdf

Duarte, E. M. (2021). *Análisis de la producción y el mercado del sector cacaotero en el occidente del departamento Boyacá en el periodo 2015 al 2019*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40386

Dueñas-C, A., Betancur, J., & Galindo-T, R. (2007). Estructura y composición florística de un bosque húmedo tropical del parque nacional Catatumbo Barí, Colombia. *Colombia Forestal, 10*(20), 26-39. https://www.redalyc.org/pdf/4239/423939610002.pdf

EcuRed, (2019). *Cacao*. https://www.ecured.cu/index.php?title=Cacao&oldid=3334679

Espinal G., C. F., Martínez Covaleda, H. J., & Ortiz Hermida, L. (2005). *La cadena del cacao en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica: 1991-2005* [Documento de trabajo n.º

58]. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR); Observatorio Agrocadenas Colombia. http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/5890/1/2005112145659_caracterizacion_cacao.pdf.

Espinosa, A., Perea Villamil, A., Villamizar, C., & Calle, L. M. (1998). *Fermente bien su cacao: el tambor rotatorio una buena opción*. Centro de investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (Cimpa); Universidad Industrial de Santander (UIS); Programa Nacional de Transformación de Tecnología Agropecuaria (Pronatta); Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4767/1/Fermentaci%C3%B2n%20de%20cacao%20a%20trav%C3%A9s%20de%20un%20tambor%20rotatorio.pdf

Espinosa, J., & Molina, E. (1999). *Acidez y encalado de los suelos*. International Plant Nutrition Institute (IPNI). http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/libros/Acidez%20y%20encalado%20de%20suelos,%20libro%20por%20%20J%20Espinosa%20y%20E%20Molina.pdf

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2008). *Guía técnica para el cultivo del cacao* (3ª edición).

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2012). *Paquete tecnológico del modelo productivo para el cultivo del cacao en el departamento de Santander*.

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2013). *Guía técnica para el cultivo del cacao*.

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2015). *Guía técnica para el cultivo del cacao* (6ª edición). https://es.scribd.com/document/401136726/FEDECACAO-GUIA-TECNICA-2015-BAJA-9-pdf

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2017). *Compra de cacao en grano*.

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2018). *Fichas cosecha fermentación y secado.*

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2019). *Matriz: compatibilidad sexual de los clones más utilizados por Fedecacao*.

Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao]. (2022). *Economía nacional*. https://www.fedecacao.com.co/economianacional

Figueroa Guevara, O. L. (2012). *Análisis de suelos y fertilización en el cultivo de cacao*. Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM); Agrobanco. https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-b-cacao.pdf

Flood, J., Hoopen, G. M., Krauss, U., & Akrofi, A. (2016). Root-infecting fungi attacking *Theobroma cacao*. In B. Bailey, L. Meinhardt (Eds), *Cacao diseases* (pp. 449-480). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_14

Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario [Finagro]. (2021). *Boyacá fue escogido como el mejor cacao de Colombia*. https://www.finagro.com.co/noticias/boyac%C3%A1-fue-escogido-como-el-mejor-cacao-de-colombia

García-Cáceres, R. G., Perdomo, A., Ortiz, Ó., Beltrán, P., & López, K. (2014). Characterization of the supply and value chains of Colombian cocoa. *Dyna, 81*(187), 30-40. http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v81n187/v81n187a03.pdf

García Lozano, J. (2009). *Guía técnica para el cultivo del cacao*. http://www.solucionespracticas.org.pe/cuales-son-los-requerimientos-climaticos-del-cultivo-del-cacao

García Lozano, J., & Moreno Fonseca, L. P. (2016). Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica, 65*(1), 44-50. https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.48161

García Lozano, J., Romero Carrascal, M., & Ortiz, L. A. (2007). *Evaluación edafoclimática de las tierras del trópico bajo colombiano para el cultivo de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/2189

Gobernación de Boyacá. (2012). *Localización y división política del departamento de Boyacá*. https://www.boyaca.gov.co/localizacion/

Gobernación de Boyacá. (2020). *Plan Departamental de Extensión Agropecuaria (PDEA): departamento de Boyacá 2020-2023*. Secretaría de Agricultura. https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/PublishingImages/Paginas/PDEA/Boyaca.pdf

Gómez Guzmán, I. D., Martínez Peláez, G., Cárdenas Contreras, M. A., Ordóñez Delgado, N., Urueña Gómez, M., Rey, D. I., Sánchez Acosta, M. C., Trujillo Moya, L., Álvarez Beltrán, R., Barriga, L., Siachoque, R., Mendivelso, D., Cárdenas, D., Díaz, H., Pulido, C., Pinzón, A., Forero, J., Salamanca Roa, C., Páez Guzmán, E. R., López Díaz, A., Vera López, E., & Castro Franco, H. (Eds.). (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá, Colombia* (Tomos I y II). Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE); Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Graziani de Fariñas, L., Ortiz de Bertorelli, L., Angulo, J., & Parra, P. (2002). Características físicas del fruto de cacao tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de Cumboto, Venezuela. *Agronomía tropical*, *52*(3), 343-362. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2002000300006

Gutiérrez Rojas, Y. L., Lozano Thola, H. L., & Jiménez Carvajal, D. A. (2015). Ventajas y desventajas de *Coffea arabica* L. y *Theobroma cacao* L. bajo sistemas agroforestales. *Ingenierías & Amazonia, 8*(1), 48-58. https://www.uniamazonia.edu.co/revistas/index.php/ingenierias-y-amazonia/article/view/1095/1352

Instituto Colombiano Agropecuario [ICA]. (1992). *Fertilización en diversos cultivos: quinta aproximación* [Manual de asistencia técnica n.º 25]. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/14124/27733_16902.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [Icontec]. (2021). *NTC 1252:2021. "Cacao en grano: especificaciones y requisitos de calidad"*. HTTPS://TIENDA.ICONTEC.ORG/GP-CACAO-EN-GRANO-ESPECIFICACIONES-Y-REQUISITOS-DE-CALIDAD-NTC1252-2021.HTML

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2020). *Datos abiertos cartografía y geografía*. https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC] & Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC]. (2005). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Boyacá (Tomos I y II). http://biblioteca.igac.gov.co/janium/Documentos/SUELOS%20DE%20BOYACA%202005.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [Ideam]. (s. f.). *Boyacá*. http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/boyaca_texto.pdf

Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [Intagri]. (2015). *Sinergismos y antagonismos entre nutrientes*. https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/sinergismos-y-antagonismos-entre-nutrientes

Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura [Intagri]. (2017). *Propiedades físicas del suelo y el crecimiento de las plantas* [Serie Suelos n.º 29]. https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas

International Cocoa Organization [ICCO]. (2022a, February). *Production of cocoa beans (thousand tonnes)*. https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-XLVIII-No.-1.pdf

International Cocoa Organization [ICCO]. (2022b, February). *Grindings of cocoa beans (thousand tonnes)*. https://www.icco.org/wp-content/uploads/Grindings_QBCS-XLVIII-No.-1.pdf

International Cocoa Organization [ICCO]. (2022c, February). *Statistics: cocoa daily prices*. https://www.icco.org/statistics/#

International Cocoa Organization [ICCO]. (2022d, February). *World cocoa bean production, grindings and stocks*. https://www.icco.org/wp-content/uploads/Supply-Demand_QBCS-XLVIII-No.-1.pdf

Irigoyen, J. N., & Cruz Vela, M. A. (2005). *Guía técnica de semilleros y vivero frutales*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador. http://repiica.iica.int/docs/B0507e/B0507e.pdf

Jaimes, Y. Y., González, C., Rojas, J., Cornejo, O. E., Mideros, M. F., Restrepo, S., Cilas, C., & Furtado, E. L. (2016). Geographic differentiation and population genetic structure of *Moniliophthora roreri* in the principal cocoa production areas in Colombia. *Plant Disease, 100*(8), 1548-1558. https://doi.org/10.1094/pdis-12-15-1498-re

Jaimes, Y. Y., Ribeyre, F., González, C., Rojas, J., Furtado, E. L., & Cilas, C. (2019). Factors affecting the dynamics of frosty pod rot in the main cocoa areas of Santander State, Colombia. *Plant disease, 103*(7), 1665-1673. https://doi.org/10.1094/PDIS-10-18-1761-RE

Jaimes, Y., González, C., Rojas, J., Rivera, J. J., Cilas, C., & Argout, X. (2022). Population structure of *Moniliophthora perniciosa* in the main cacao producing departments of Colombia. *Plant Disease*. https://doi.org/10.1094/PDIS-12-20-2679-RE

Jaimes Suárez, Y. Y., Agudelo Castañeda, G. A., Báez Daza, E. Y., Rengifo Estrada, G. A., & Rojas Molina, J. (2021). *Modelo productivo para el cultivo de cacao* (Theobroma cacao *L.*) *en el departamento de Santander*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36710/Ver_documento_36710.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jaimes Suárez, Y., & Aranzazu Hernández, F. (2010). *Manejo de las enfermedades del cacao (*Theobroma cacao *L.) en Colombia, con énfasis en monilia (*Moniliophthora roreri*)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/12699

Jaimez, R. E., Tezara, W., Coronel, I., & Urich, R. (2008). Ecofisiología del cacao (Theobroma cacao): su manejo en el sistema agroforestal: sugerencias para su mejoramiento en Venezuela. *Revista Forestal Venezolana, 52*(2), 253-258. https://www.academia.edu/47531785/Ecofisiolog%C3%ADa_del_cacao_Theobroma_cacao_su_manejo_en_el_sistema_agroforestal_Sugerencias_para_su_mejoramiento_en_Venezuela_Ecophysiology_of_cocoa_Theobroma_cacao_its_management_in_agro_forestry_system_Suggestions_for_improvement_in_Venezuela

Johnson, J. M., Bonilla, J. C., & Agüero Castillo, L. (2008). *Manual de manejo y producción del cacaotero*. https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENF01J71.pdf

Landaeta Tuay, L. L. (2016). *Potencialidades de la asociación de cacao en sistemas agroforestales para el piedemonte y la sabana inundable del municipio de Paz de Ariporo Casanare-Colombia*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/6412/7.364.039.pdf?sequence=1&isAllowed=y

León Moreno, C. E., Rojas Molina, J., & Castilla Campos, C. E. (2019). Physicochemical characteristics of cacao (*Theobroma cacao* L.) soils in Colombia: Are they adequate to improve productivity? *Agronomía Colombiana, 37*(1), 28. https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/70545/71351

Lizcano Toledo, R., Olivera Viciedo, D., Saavedra Mora, D., Machado Cuellar, L., Rolando Valencia, E., Moreno Pérez, M. F., & Flórez, M. F. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). https://www.researchgate.net/publication/323823646_Muestreo_de_Suelos_Tecnicas_de_Laboratorio_e_Interpretacion_de_Analisis_de_Suelos

López Báez, O., Ramírez González, S. I., Espinosa Zaragoza, S., Moreno Martínez, J. L., Ruiz Bello, C., Villarreal Fuentes, J. M., & Ruiz Rojas, J. L. (2015). *Manejo agroecológico de la nutrición en el cultivo del cacao*. Universidad Autónoma de Chiapas. https://espacioimasd.unach.mx/libro/num7/Manejo_agroecologico_de_la_nutricion_en_el_cultivo_del_cacao.pdf

Lora Silva, R. (2001). Factores que afectan la disponibilidad de nutrimentos para las plantas. En F. Silva Mojica (Ed.), *Fertilidad de suelos: diagnóstico y control* (pp. 29-57). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4922/1/216.1.pdf

Lozano García, L. & Fonseca Moreno, L. P. (2016). Respuestas fisiológicas de *Theobroma cacao* L. en etapa de vivero a la disponibilidad de agua en el suelo. *Acta Agronómica, 65*(1), 44-50. http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v65n1/v65n1a07.pdf

Luna Quispe, H. (2019). *Afectación de los mazorqueros Carmenta theobromae Busck y Carmenta foraseminis Eichlin en plantaciones de cacao en el Perú* [Trabajo de investigación, Universidad Católica Sedes Sapientiae, Huacho, Perú). http://repositorio.ucss.edu.pe/bitstream/handle/UCSS/650/Luna_Heber_trabajo_investigacion_FIA_2019.pdf?sequence=1

Martínez, P. F., & Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo: materiales, propiedades y manejo. En V. J. Flórez (Ed.), *Sustratos, manejo de clima, automatización y control en sistemas de cultivo*

sin suelo (pp. 38-78). Unibiblos. https://www.researchgate.net/profile/Dolors_Roca/publication/237100771_Sustratos_para_el_cultivo_sin_suelo_Materiales_propiedades_y_manejo/links/0deec51b8657d36d7e000000/Sustratos-para-el-cultivo-sinsuelo-Materiales-propiedades-y-manejo.pdf

Mejía, D. C., & Barón, M. F. (2019). *Evaluación de los aportes de los árboles de sombra a la avifauna asociada a cultivos de cacao en Santa María, Boyacá*. [Trabajo de grado de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. http://hdl.handle.net/11349/14963

Mejía Flórez, L. A., & Argüello Castellanos, O. (Comps.). (2000). *Tecnología para el mejoramiento del sistema de producción de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/3832/1/220.1.pdf

Mejía Flórez, L. A., Palencia Calderón, G. E. & Ramírez González, N. (2003). *Manual para la renovación y rehabilitación de plantaciones de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13433

Microfertisa. (2012). *Manual técnico de fertilización de cultivos*.

Microfertisa. (2018). *Manual técnico Microfertisa*. https://1library.co/document/zgwxrxny-manual-tecnico-microfertisa.html

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2010). *Guía ambiental para el cultivo del cacao.* http://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Guia_ambiental.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2018). *Precio de referencia semanal de compra de cacao.* http://www.agronet.gov.co/Noticias/Documents/PrecioReferenciaCacao-Historico.xlsx?Web=1

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2021). *Cadena de cacao*. https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2022). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) 2007-2019*. Biblioteca Digital Agronet. https://www.agronet.gov.co/Lists/Boletin/Attachments/8689/EVAgr%C3%ADcola_SIPRA_AGRONET_2019.xlsx

Ministerio de Agricultura del Perú. (2004). *Manual del cultivo del cacao*. Programa para el Desarrollo de la Amazonia (Proamazonia). http://canacacao.org/wp-content/uploads/Cultivo-del-Cacao-Amazonas-Peru-2004.pdf

Montealegre, R., & Rodríguez, D. A. (1989). Patogenicidad del hongo *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuill. sobre la chinche *Monalion dissimulatu*m distant plaga del cacaotero *Theobroma cacao* L. *Acta Agronomica, 39*(1-2), 88-96. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/15391

Mortimer, R., Saj, S., & David, C. (2018). Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. *Agroforestry Systems, 92*(2), 1639-1657. https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-017-0113-6

Motamayor, J. C., & Lanaud, C. (2002). Molecular analysis of the origin and domestication of *Theobroma cacao* L. In J. M. M. Engels, V. Ramanatha Rao, A. H. D. Brown & M. T. Jackson (Eds.),

Managing plant genetic diversity: Proceedings of an international conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 12-16 June 2000 (pp. 77-87). http://dx.doi.org/10.1079/9780851995229.0077

Murrieta Medina, E., & Palma Moscoso, H. (2018). *Manual de buenas practicas de cosecha y poscosecha de cacao*. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID); Programa Alianza Cacao Perú. https://issuu.com/comunicacionesalianzacacaoperu/docs/manual_poscosecha_cacao

Navarro Blaya, S. Y., & Navarro García, G. (2000). *Manual de química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi Prensa Libros.

Niño Porras, L. D. (2012). *Encadenamiento productivo del cacao*. Gobernación de Boyacá, Secretaría de Fomento Agropecuario. https://www.boyaca.gov.co/secretariaagricultura/encadenamiento-productivo-del-cacao/

OCHA Services. (2022). *Departamento de Boyacá: mapa de trabajo PowerPoint*. https://www.humanitarianresponse.info/es/operations/colombia/document/departamento-de-boyac%C3%A1-mapa-de-trabajo-powerpoint

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Dirección de Producción y Protección Vegetal, Grupo de Cultivos Hortícolas. https://www.fao.org/3/s8630s/s8630s.pdf

Paladines-Rezabala, A., Moreira-Morrillo, A. A., Mieles, A. E., & Garcés-Fiallos, F. R. (2022). Avances en la comprensión de la interacción entre *Ceratocystis cacaofunesta* y *Xyleborus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en árboles de cacao. *Scientia Agropecuaria, 13*(1), 43-52. https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.004

Palencia Calderón, G. E. (2005). *Establecimiento y manejo de sistemas agroforestales con cacao: manual técnico*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica); Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/13532?show=full

Palencia Calderón, G. E., Arguello Angulo, A., Díaz Ariza, N., Agudelo Castañeda, G. A., Rengifo Estrada, G. A., López, J. G., Gómez Santos, R., Calle Hoyos, L. M., Mantilla, J., & Coronado Silva, R. (2011a). *Mejoramiento genético del cultivo de cacao mediante la selección varietal y propagación de genotipos sobresalientes, con participación comunitaria en fincas de agricultores en las principales regiones productoras de Colombia* [Informe técnico final 1438]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Palencia Calderón, G. E., & Gómez Santos, R. (2007). *Técnicas de rehabilitación de plantaciones improductivas de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/773

Palencia Calderón, G. E., Gómez Santos, R., Díaz Ariza, N. H., Contreras M., N., & Tolosa O., J. A. (2006). *Rehabilitación de plantaciones de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/20498

Palencia Calderón, G. E., Rengifo, G. A., Arguello, A., Gómez, R., Cadena, J., Díaz, N., Agudelo, G. A., López, J. G., Galvis, I., Jaimes, Y., & Jaramillo, C. (2011b). *Evaluación de clones de cacao regionales*

de alto rendimiento bajo nuevos arreglos forestales con maderas finas tropicales en zonas productoras de Colombia [Informe técnico final 1437]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).

Palencia C., G. E., Gómez Santos, R., Martín S., J. E., & Guiza Pérez, O. (2006). *Especies forestales para uso en sistemas agroforestales con cacao: una alternativa para el occidente de Boyacá*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/23663

Palencia C., G. E., Gómez S., R., & Mejía F., L. A. (2007). *Patrones para cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/2222/42973_48680.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pérez, M. A., & Contreras, J. D. (2017). *Guía de buenas prácticas de cosecha, fermentación y secado para la producción de cacaos especiales*. SwissContac. https://www.swisscontact.org/_Resources/Persistent/d/3/b/f/d3bfbb5a8d042f05cbf5533494e288f2c52800b8/Guia_de_buenas_practicas_de_poscosecha.pdf

Pérez Leal, F. (2017). *Fisiología vegetal: parte III nutrición mineral*. http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3201/000026082L.pdf

Pettersson, E. (2016). *Sustainability evaluations and development challenges of cacao farms: A minor field study in Huila, Colombia* [Bachelor thesis project, Örebro University]. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:954804/FULLTEXT01.pdf

Pineda Jaimes, A. L. (2018). *El cacao: una apuesta para la transformación del territorio en el occidente de Boyacá*. Universidad Externado de Colombia, Especialización en Estudios del Territorio. https://bdigital.uexternado.edu.co/bitstream/handle/001/681/DHA-spa-2018-El_cacao_una_apuesta_para_la_transformacion_del_territorio_en_el_occidente_de_Boyaca.pdf?sequence=1

Pinzón Useche, J. Ó., Rojas, F., Rojas Ardila, J., Ramírez, Ó. D., Moreno, F., & Castro, G. E. (2012). *Guía técnica para el cultivo del cacao* (5ª edición). Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao). http://hdl.handle.net/20.500.12324/11685

Piñuela, A., Guerra, A. J., & Pérez-Sánchez, E. (2013). *Guía para el establecimiento y manejo de viveros agroforestales*. Fundación Danac. https://www.researchgate.net/publication/278679789_GUIA_PARA_EL_ESTABLECIMIENTO_Y_MANEJO_DE_VIVEROS_AGROFORESTALES

Piraquive, G., Matamoros, M., Cespedes, E., & Rodríguez Chacón, J. (2018). *Actualización de la tasa de rendimiento del capital en Colombia bajo la metodología de Harberger* [Archivos de economía, Documento 487]. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios Econmicos/487.pdf

Ploetz, R. (2016). The impact of diseases on cacao production: A global overview. In B. A. Bailey, & L. W. Meinhardt (Eds.), *Cacao diseases* (pp. 33-59). Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-24789-2_2

PROAIN Tecnología Agrícola. (2022). *¿Cómo interpretar el resultado de pH del suelo?* https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/como-interpretar-el-resultado-de-ph-del-suelo

Puentes Páramo, Y. J., Menjivar Flores, J. C., Gómez Carabalí, A., & Aranzazu Hernández, F. (2014). Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica, 63*(2), 145-152. https://doi.org/10.15446/acag.v63n2.40041

Quintana Fuentes, L. F., García Jerez, A., & Moreno Martínez, E. (2018). Perfil sensorial de cuatro modelos de siembra de cacao en Colombia. *Entramado, 14*(2), 256-268. https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/4756/4075

Quiroz, V. J., & Amores, F. (2002). Rehabilitación de plantaciones tradicionales de cacao en Ecuador. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)* (63), 73-80. https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/6771

Quiroz V., J., & Mestanza V., S. (2012). *Injertación de cacao* [Boletín técnico n.º 148]. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (Iniap); Gobernación Nacional de la República del Ecuador; Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca; Cooperación Técnica Alemana (GIZ). http://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Injertacion_de_cacao.pdf

Quispe Limachi, H. I., Nova Pinedo, M. L., & Mamani Sánchez, B. (2021). Aplicación de hongos entomopatógenos y producto tecsil para el control del chinche de cacao (*Monaloniun dissimulatum* Dist.) en Alto Beni, La Paz. *Acta Nova, 10*(1), 3-21. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892021000100002&script=sci_arttext&tlng=es

Ramírez, L. E. (2006). *Manual técnico cacao: producción de clones de cacao de calidad para el departamento del Huila*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). http://hdl.handle.net/20.500.12324/13274

Red Cacaotera. (2020a). *Cosecha y beneficio de cacao*. https://issuu.com/redcacaotera/docs/cosecha

Red Cacaotera. (2020b). *Fermentación de cacao*. https://issuu.com/redcacaotera/docs/fermentacion

Ríos, F., Ruiz, A., Lecaro, J., & Rehpani, C. (2017). *Estrategias país para la oferta de cacaos especiales: políticas e iniciativas privadas exitosas en el Perú, Ecuador, Colombia y República Dominicana*. Swisscontact Colombia Foundation. https://issuu.com/bocetos3/docs/cacaosespeciales1

Rojas, F., & Sacristán, E. J. (2013). *Guía ambiental para el cultivo del cacao* (2ª edición). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao); Fondo Nacional del Cacao. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/11622

Rojas Ardila, J., Rojas, F., Ramírez, Ó. C., Moreno, F., Castro, G. A., & Pinzón Useche, J. Ó. (2012). *Guía técnica para el cultivo del cacao*. Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao). http://hdl.handle.net/20.500.12324/11685

Rosas-Patino, G., Puentes Paramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2019). Efecto del encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Amazonia colombiana. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 20*(1), 5-16. http://revistacta.agrosavia.co/index.php/revista/article/view/1247/558

Ruales Mora, J. L., Burbano Orjuela, H., & Ballesteros Possú, W. (2010). Efecto de la fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas, 28*(2), 81-94 https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5104094

Ruiz, D. (2021). *Caracterización de sistemas agroforestales con cacao* (Theobroma cacao *L.*) *en el oriente de Boyacá*. [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia].

Sáenz, B., & Cabezas, M. (2007). Un acercamiento a la ecofisiología del cacao. *Innovación y Cambio Tecnológico, 6*(6), 44-50. http://hdl.handle.net/20.500.12324/772

Saj, S., Durot, C., Sakouma, K. M., Gamo, K. T., & Avana-Tientcheu, M. L. (2017). Contribution of associated trees to long-term species conservation, carbon storage and sustainability: A functional analysis of tree communities in cacao plantations of central Cameroon. *International Journal of Agricultural Sustainability, 15*(3), 282-302. https://doi.org/10.1080/14735903.2017.1311764

Schweizer Lassaga, S. (2011). *Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/P33-9965.pdf

Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Memoria explicativa mapa de geomorfología de la plancha 149 departamentos de Boyacá, Antioquia y Santander*. Servicio Geológico Colombiano. http://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003010024652/documento/pdf/2105246521101000.pdf

Snoeck, D., Koko, L., Joffre, J., Bastide, P., & Jagoret, P. (2016). Cacao nutrition and fertilization. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable agriculture reviews* (pp. 155-202). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26777-7_4

Sodré, G. A. (Ed.). (2017). *Cultivo do cacaueiro no estado da Bahia*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/outras-publicacoes/cultivo-do-cacaueiro-no-estado-da-bahia.pdf

Sousa Filho, H. R., De Jesus, R. M., Bezerra, M. A., Santana, G. M., & De Santana, R. O. (2021). History, dissemination, and field control strategies of cocoa witches' broom. *Plant Pathology, 70*(9), 1971-1978.

Souza Junior, J. O., Sodre Andrade, G., & Lima Neves, J. C. (2018). Fertilidade do solo, correcao da acidez e recomendacao de adubacao para o cacaueiro. En J. O. Souza Junior (Ed.), *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação* (pp. 333-377).

Tomar, J. M. S., Ahmed, A., Bhat, J. A., Kaushal, R., Shukla, G., & Kumar, R. (2021). Potential and opportunities of agroforestry practices in combating land degradation. In G. Shukla, S. Chakravarty, P. Panwar & J. A. Bhat (Eds.), *Agroforestry small landholder's tool for climate change resiliency and mitigation*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.97843

Turnbull, C. J., & Hadley, P. (2020). *International Cocoa Germplasm Database [ICGD]*. ICE Futures Europe; CRA Ltda.; University of Reading. http://www.icgd.reading.ac.uk

Unidad de Gestión de Riesgos Agropecuarios [UGRA]. (2018). *Inteligencia de mercado: cacao*. Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario (Finagro). https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/ficha_cacao_version_ii.pdf

Vaast, P., & Somarriba, E. J. (2014). Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems, 88*(6), 947-956. http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x

Van Raij. B. (2011). *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI).

Vargas, A., & Merchán, V. (1994). *Uso de la lombriz roja en la transformación de residuos agrícolas*. https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/33160/26481_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vásquez Bettin, A. M., Grandett, L. M., Novoa Yáñez, R., & Agudelo Castañeda, G. A. (2019). *Validación de metodologías para la rehabilitación de plantaciones improductivas de cacao*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/35554

Vega, J. (2016). *Caracterización de la agrocadena de cacao en el Valle de Tenza Boyacá* (Trabajo de grado, Universidad de La Salle, Bogotá). https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1154&context=administracion_agronegocios

Vera Chang, J., Veliz Zamora, D., Jácome, G., Cabrera, R., Ramos, R., & Segovia, G. (2016). *Guía para el establecimiento y manejo de un vivero de cacao* (Theobroma cacao *L.*) (Vol. 2). Universidad Técnica Estatal de Quevedo de Ecuador. https://www.researchgate.net/publication/314283485_Guia_para_el_establecimiento_y_manejo_de_un_vivero_de_cacao_Theobroma_cacao_L/link/58bf80f892851cd83aa12d2b/download

Zambolim, L. (2021). Management of soil borne fungi on coffee. *International Journal of Research in Agronomy, 4*(1), 47-58. https://doi.org/10.33545/2618060X.2021.v4.i1a.63

Zhang, D., & Motilal, L. A. (2016). Origin, dispersal, and current global distribution of cacao genetic diversity. In B. A. Bailey & L. W. Meinhardt (Eds.), *Cacao diseases (pp. 3-31).* Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_1



Impresión y encuadernación:
DGP Editores S.A.S.

Terminó de imprimirse
en julio, Bogotá, D. C., Colombia

El departamento de Boyacá está surgiendo como productor de cacao a nivel de Colombia. Sin embargo, este sistema productivo tiene una baja productividad, la cual está determinada por una pobre adopción de tecnologías, así como por malas prácticas de manejo de las plantaciones que, en su gran mayoría, se establecieron a través de programas de fomento, especialmente en la provincia de Occidente. Entre los puntos críticos para mejorar están los materiales de cacao de baja productividad, las podas inadecuadas del árbol de cacao, la escaza fertilización del cultivo como actividad para aumentar los rendimientos, el desconocimiento del manejo de plagas y enfermedades limitantes (moniliasis y barrenador del fruto, entre otros), y el mal manejo del beneficio del cacao que es muy importante para un departamento que le apunta a comercializar cacao de calidad. Cabe señalar que hay productores destacados, que, de emprendimientos individuales, tienen mejores rendimientos y grano de calidad que ha llevado a que el cacao originario de Boyacá sobresalga. En este modelo productivo para el cultivo de cacao del departamento de Boyacá se presentan las principales ofertas tecnológicas, que al ser aplicadas de manera juiciosa permiten el mejoramiento de productividad del cacao y la calidad de vida de sus cacaocultores.

BAC
BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

CORREO: **bac@agrosavia.co**
TELÉFONO: **(57 1) 422 73 00** EXT. **1257 o 1274**
SKYPE: **biblioteca.agropecuaria**

www.agrosavia.co

ISBN: 978-958-740-558-3

Distribución gratuita
Prohibida su venta

AGROSAVIA
EDITORIAL