

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA MONILIASIS Y LA MANCHA NEGRA
EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO ANTE ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO**

TESIS

**Que como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

ANTONIO FIDEL SANTOS HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión de: Dr. Conrado Márquez Rosano



Chapingo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2025.

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA MONILIASIS Y LA MANCHA NEGRA EN
SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO ANTE ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO

Tesis realizada por **ANTONIO FIDEL SANTOS HERNÁNDEZ** bajo la supervisión
del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR: _____

DR. CONRADO MÁRQUEZ ROSANO

ASESOR: _____

DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR: _____

DR. CARLOS FREDY ORTIZ GARCÍA

LECTOR EXTERNO: _____

DR. ARTEMIO CRUZ LEÓN

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE APÉNDICES	xii
DEDICATORIA	xiii
AGRADECIMIENTOS	xiv
DATOS BIBLIOGRÁFICOS	xv
RESUMEN GENERAL	xvi
GENERAL ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Problema de investigación.....	5
1.4. Preguntas de investigación.....	5
1.5. Objetivos.....	6
1.6. Hipótesis	8
1.7. Contenido temático	9
1.8. Literatura citada	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. Enfermedad	14
2.2. Nicho ecológico	15
2.3. Clima y cambio climático	17
2.5. Literatura citada	17
CAPÍTULO 3. LIMITANTES CLIMÁTICAS, PARASITOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS DEL CULTIVO DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.) EN MÉXICO. FASE I: SISTEMATIZACIÓN	19
3.1. Resumen	19
3.2. Summary	20
3.3. Introducción	20
3.3. Materiales y métodos.....	23
3.3.1. Análisis del comportamiento de la producción de cacao a nivel internacional y nacional	23

3.3.2. Especificaciones de las búsquedas.....	23
3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión	23
3.3.4. Sistematización de la información	24
3.4. Resultados y discusión	25
3.4.1. Producción de cacao.....	25
3.4.2. Clasificación de los estudios	37
3.6. Conclusiones	43
3.7. Literatura citada	44
CAPÍTULO 4. LIMITANTES CLIMÁTICAS, PARASITOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS DEL CULTIVO DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.) EN MÉXICO. FASE II: REVISIÓN	50
4.1. Resumen	50
4.2. Abstract.....	51
4.3. Introducción	52
4.4. Materiales y métodos.....	55
4.5. Resultados y discusión	56
4.5.1. Cambio climático	56
4.5.2. Factores socioeconómicos de importancia	61
4.5.3. Factores parasitológicos: Plagas.....	73
4.5.3. Factores parasitológicos: Enfermedades	78
4.6. Conclusión	84
4.7. Literatura citada	86
CAPÍTULO 5. DIAGNÓSTICO AGRARIO Y MULTIFUNCIONALIDAD DE UNIDADES PRODUCTIVAS QUE INCLUYEN CACAO EN EL SOCONUSCO, CHIAPAS, MÉXICO	102
5.1. Resumen	102
5.2. Abstract.....	102
5.3. Introducción	103
5.4. Materiales y métodos.....	107
5.4.1. Área de estudio	107
5.4.2. Enfoque metodológico.....	108
5.5. Resultados y discusión	110
5.5.1. Historia agrícola	110

5.5.2. Regionalización agrícola	115
5.5.3. Sistemas agroforestales que incluyen cacao en el Soconusco	116
5.5.4. Multifuncionalidad de las unidades productivas con cacao en el Soconusco	122
5.5.4. Conclusiones	129
5.7. Literatura citada	131
CAPÍTULO 6. DIAGNÓSTICO AGRARIO DE UNIDADES PRODUCTIVAS QUE INCLUYEN CACAO EN LA CHONTALPA, TABASCO Y SU CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	135
6.1. Resumen	135
6.2. Abstract.....	135
6.3. Introducción	136
6.4. Materiales y Métodos.....	137
6.4.1. Área de estudio	137
6.4.2. Métodos	138
6.5. Resultados y discusión	141
6.5.1. Historia agrícola regional.....	141
6.5.2. Regionalización agrícola	143
6.5.3. El sistema agroforestal cacao	145
6.5.4. Datos generales de los productores.....	151
6.5.5. Políticas públicas.....	154
6.5.6. Rentabilidad de los sistemas productivos	156
6.5.7. Capacidad de adaptación al cambio climático	157
6.5.8. Limitantes estructurales	161
6.6. Conclusiones	162
6.7. Literatura citada	164
CAPÍTULO 7. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL CACAO Y DOS DE SUS ENFERMEDADES PRINCIPALES EN UNA AMÉRICA TROPICAL MÁS CÁLIDA CON ÉNFASIS EN MÉXICO	169
7.1. Resumen	169
7.2. Abstract.....	170
7.3. Introducción	170
7.4. Materiales y Métodos.....	179

7.4.1. Especies.....	179
7.4.2. Modelado del nicho ecológico	183
7.5. Resultados y discusión	197
7.5.1. Resultados generales del modelado del nicho ecológico.....	197
7.5.2. Análisis de la distribución potencial	202
7.5.3. Discusión de aspectos teóricos y prácticos.....	225
7.6. Conclusiones	229
7.7. Literatura citada	231
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES	244
APÉNDICES.....	250

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Componentes del triángulo de la enfermedad.	15
Cuadro 2. Estadísticas del rubro cacao del Programa Producción para el Bienestar por estado durante 2021.	34
Cuadro 3. Fuentes y gestión de los documentos de la revisión de literatura.	37
Cuadro 4. Nuevos clones de cacao mexicanos con mejoramiento genético reportados en la literatura.....	68
Cuadro 5. Ingresos anuales por unidad familiar (pesos mexicanos, MXN)	126
Cuadro 6. Registros geográficos de cada especie según su fuente y fase de procesamiento.....	185
Cuadro 7. Resumen de los modelos de Maxent seleccionados	197
Cuadro 8. Extensión de la distribución potencial actual para entidades federativas de México.....	204

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de la enfermedad.....	14
Figura 2. Diagrama BAM: interacciones entre factores abióticos, bióticos y movilidad.	16
Figura 3. Estadísticas de la producción de cacao a nivel mundial en 2020.	25
Figura 4. Estadísticas históricas de la producción de cacao en México.....	27
Figura 5. Estadísticas del cultivo de cacao en México por estado, de 2003 a 2021..	29
Figura 6. Distribución municipal de la producción de cacao en México durante 2020 y retrospectiva hasta 2003.	31
Figura 7. Resumen a nivel de estado de las estadísticas sobre los beneficiarios del Programa producción para el Bienestar de la SADER en 2021 por el cultivo de cacao.	35
Figura 8. Palabras de los títulos de las 249 publicaciones seleccionadas.	38
Figura 9. Frecuencia de las publicaciones por año y temática.	38
Figura 10. Frecuencia de temas principales por temática investigada.	41
Figura 11. Frecuencia de temas secundarios (que describen de forma alternativa o complementaria al tema principal) por temática investigada.	42
Figura 12. Repercusiones del cambio global y del cambio climático en el patosistema del cacao (<i>Theobroma cacao</i>).....	60
Figura 13. Principales alternativas del manejo integrado del cultivo de cacao con propuestas propias.....	63
Figura 14. Distribución regional de plagas y enfermedades relevantes del cacao a nivel mundial.....	74
Figura 15. Principales organismos asociados a plagas y enfermedades del cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) en México.	77
Figura 16. Comparación de la superficie sembrada de los ocho cultivos más sembrados en cuatro municipios del Soconusco, Chiapas (2003 y 2019).	113
Figura 17. Regionalización agrícola en el área de estudio, en Soconusco, Chiapas.	116

Figura 18. Diagramas de los sistemas agroforestales (en estado maduro) que incluyen cacao en el Soconusco.	117
Figura 19. Sistemas agroforestales con cacao en el Soconusco, Chiapas.	118
Figura 20. Ingreso agrícola por unidad productiva en el Soconusco, Chiapas, México.	124
Figura 21. Resultado del análisis de decisión multicriterio por suma ponderada para seleccionar la unidad familiar más multifuncional.....	125
Figura 22. Gráficos de radar de los indicadores de las unidades familiares.	127
Figura 23. Pasos principales del diagnóstico agrario.	139
Figura 24. Síntesis histórica en torno al cacao en la Chontalpa.....	141
Figura 25. Regionalización agrícola en el área de estudio.....	144
Figura 26. Imagen satelital en falso color (SWIR, NIR y verde) del área de estudio en 2011.....	145
Figura 27. El sistema agroforestal cacao en la Chontalpa (Huimango, 2ª sección, Cunduacán).....	147
Figura 28. Etapas y arreglos espaciales del sistema agroforestal cacao en la región de la Chontalpa, Tabasco.....	148
Figura 29. Perfiles del sistema agroforestal cacao en la Chontalpa, Tabasco.....	150
Figura 30. Proceso de poscosecha del cacao en la Chontalpa, Tabasco.....	153
Figura 31. Ingreso anual de los productores de cacao con diferentes sistemas productivos en la Chontalpa, Tabasco.....	157
Figura 32. Gráficos de radar de la capacidad de adaptación al cambio climático de los productores de cacao entrevistados de la Chontalpa, Tabasco.	159
Figura 33. Altitud del área de estudio. A) América tropical. B) Sureste de México. .	184
Figura 34. Registros geográficos de <i>Theobroma cacao</i>	186
Figura 35. Registros geográficos de <i>Moniliophthora roreri</i>	187
Figura 36. Registros geográficos de <i>Phytophthora capsici/tropicalis</i>	188
Figura 37. Correlación de los valores de 1000 puntos tomados al azar dentro del área M (América tropical) de las 19 variables bioclimáticas del escenario actual.	192

Figura 38. Ubicación de los 1000 puntos referidos anteriormente y la bio 1 (temperatura media anual).....	193
Figura 39. Contribución de las variables bioclimáticas a los modelos de Maxent de cada especie.	199
Figura 40. Curvas de respuesta marginal de las cuatro variables bioclimáticas con mayor contribución en los modelos de <i>Maxent</i> de cada especie estudiada.	200
Figura 41. Histograma y valores relativos acumulados de la idoneidad climática en el escenario actual de los registros geográficos de <i>Theobroma cacao</i> usados en la modelación.	201
Figura 42. Idoneidad climática actual en valores discretos para Centro y Sudamérica.	202
Figura 43. Modelos de distribución de las tres especies estudiadas y mapa conjunto de su distribución potencial en México (idoneidad climática > 0.3).	203
Figura 44. Mapa de la idoneidad climática en dos escenarios (primer imagen: escenario actual, segunda imagen: el más pesimista) de <i>Theobroma cacao</i> en Tabasco y Chiapas.	206
Figura 45. Cambios proyectados en la distribución potencial de <i>Theobroma cacao</i> con el escenario GFDL-ESM 4.1 SSP3-7.0 2041-2060.	207
Figura 46. Cambios proyectados en la distribución potencial de <i>Theobroma cacao</i> con el escenario HADGEM-CG31-LL SSP5-8.5 2041-2060.	209
Figura 47. Consensos de los dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de <i>Theobroma cacao</i> en México a (A) mediano y (B) largo plazo. .	211
Figura 48. Consensos de dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de <i>Moniliophthora roreri</i> en México a mediano (A) y largo plazo (B).	214
Figura 49. Consensos de dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de <i>Phytophthora capsici/tropicalis</i> para México a mediano (A) y largo plazo (B).	215

Figura 50. Distribución potencial para las especies en estudio en el escenario actual y ante los dos escenarios de cambio climático a mediano plazo (2041-2060) en Centro y Sudamérica.	219
Figura 51. Coexistencia de la distribución potencial futura de las especies en estudio en México ante los escenarios de cambio climático.....	221
Figura 52. Coexistencia de la distribución potencial de las especies en estudio en las subregiones de la Chontalpa, Tabasco y Norte de Chiapas en el escenario actual y dos escenarios de CC en el horizonte 2081-2100.	223
Figura 53. Coexistencia de la distribución potencial de las especies en estudio en el Soconusco, Chiapas en el escenario actual y dos escenarios de CC en el horizonte 2081-2100.....	224

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Plagas y enfermedades del cacao reportadas en la literatura para México	250
Apéndice 2. A manera de reflexión: el caso de la mal-adaptación al cambio climático a causa de la roya del cafeto en los sistemas agroforestales de café en Chiapas.....	261
Apéndice 3. Historia agrícola en torno al Soconusco hasta 1991.	267
Apéndice 4. Historia agrícola en torno al Soconusco después de 1991.....	268
Apéndice 5. Indicadores de la capacidad de adaptación de los productores de cacao en la Chontalpa	269
Apéndice 6. Registros y cálculos de la rentabilidad de las unidades productivas en la Chontalpa.....	271
Apéndice 7. Lista de innovaciones agrícolas reportadas por los productores de cacao en la Chontalpa	274
Apéndice 8. Historia agrícola regional del cacao en la Chontalpa, Tabasco	276
Apéndice 9. Mapa de los conglomerados del INFyS 2004-2020.....	285
Apéndice 10. Análisis ecológico de los sitios del INFyS con presencia de <i>T. cacao</i>	286

DEDICATORIA

A la sociedad mexicana que da soporte a instituciones que hacen posible el obtener posgrados como lo son la Universidad Autónoma Chapingo y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI).

A los productores que dieron soporte y atendieron de forma atenta las entrevistas y los talleres, así como a las organizaciones implicadas.

A los doctores Conrado, Alejandro y Fredy por su grata paciencia y sabiduría en la orientación de la presente investigación. Así como a los mi familia, productores, profesores-investigadores y profesionistas que me formaron e inspiraron durante mis estudios de pregrado y posgrado.

A mis hijas y a la preciada memoria de mi bebé. A Claudia Ivette, Micaela e Isamar, personas determinantes en mi formación personal y académica.

Al profesor Mario Castelán, que me incentivó a continuar con la investigación tan ardua, aunque muy necesaria y pertinente, que representa el tema del cambio climático en la agricultura.

A mi familia y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (ahora Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI) por su soporte económico y académico, según corresponda, en la realización del doctorado y maestría.

A las personas enunciadas en las dedicatorias también se les agradece enérgicamente, especialmente a los profesores investigadores que guiaron la investigación

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Antonio Fidel Santos Hernández

Fecha de nacimiento: 15 de abril de 1996

Lugar de nacimiento: Huayacocotla, Veracruz

CURP: SAHA960415HVZNRN01

Profesión: Ingeniero Forestal

Cédula de licenciatura: 11945053

Cédula de maestría: 12871475



Antonio Fidel Santos Hernández estudió la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo del 2011 al 2014. Posteriormente ingresó al programa de Ingeniería Forestal de la División de Ciencias Forestales en dicha institución en el 2014 y en 2018 obtuvo su título por medio de tesis, misma que enfocó hacia temas micológicos. Entre los tiempos de sus estudios realizó trabajos de consultoría ambiental, en evaluación del impacto ambiental, tanto en gabinete como en campo.

A principios del 2019 inició sus estudios de maestría en el programa posgrado de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales en la misma institución, ahora enfocándose en temas de ecología y biogeografía para obtener con mención honorífica el grado de Maestro en Ciencias en febrero de 2021. A finales de ese mismo año fue galardonado con el premio “Arturo Fregoso Urbina” de la UACH por tal investigación.

En 2021 fue aceptado para formar parte del Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible del DEIS en Fitotecnia, en esta ocasión se enfocó en la realización del trabajo que se documenta en este documento de graduación: investigación en temas fitopatológicos, biogeográficos y socioeconómicos en torno a los sistemas agroforestales con cacao con enfoque en la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático.

RESUMEN GENERAL

DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE LA MONILIASIS Y LA MANCHA NEGRA EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CACAO ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO¹

El cacao (*Theobroma cacao* L.), que en México se cultiva en Sistemas Agroforestales (SAF), ha sido históricamente relevante en el país debido a sus múltiples funciones. Sin embargo, es fuertemente afectado por enfermedades como la moniliasis (causada por *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny), y la mancha negra (causada por *Phytophthora* spp.). Mismas que el cambio climático (CC) puede agravar, pero que se ven mediadas por cuestiones socioeconómicas y ambientales. Por ende, con el presente trabajo se buscó investigar los impactos de los principales agentes parasitológicos del cacao ante el contexto del CC y sus demás limitantes desde diferentes enfoques metodológicos. Ello con el fin de proponer estrategias de adaptación al CC y políticas públicas pertinentes. Se realizó un estado del arte sobre las limitantes parasitológicas, socioeconómicas y climáticas de cultivo de cacao en el país (capítulos 3 y 4), así como dos estudios diagnósticos razonados (uno en Soconusco, Chiapas y otro en la Chontalpa, Tabasco: capítulos 5 y 6, respectivamente) para conocer las condiciones actuales del sistema. Finalmente, se realizó la modelación del nicho ecológico del cacao, *Phytophthora capsici* Leonian y *M. roreri* en América tropical ante dos escenarios de CC (capítulo 7) para hacer proyecciones sobre sus distribuciones potenciales (DP). Se encontró que las limitantes, incluido el CC, impactan negativamente sobre los rendimientos, la fisiología y el patosistema del cacao. En la Chontalpa, los productores de cacao orgánico agremiados se caracterizaron por una mejor capacidad de adaptación al CC frente a los convencionales. En el Soconusco hubo mayor multifuncionalidad en un policultivo tradicional con manejo integrado (MIC) frente a SAF más simples o poco manejados. Por tanto, las estrategias de mejora, incluido el MIC, la asociatividad y el diálogo de saberes, resultan fundamentales para hacer más resiliente a este sistema al CC. Más aún, debido a que las proyecciones consensaron reducciones de la DP del cacao para 2081-2100 en las áreas donde actualmente se cultiva y la coexistencia de DP para *M. roreri* y *P. capsici* en las áreas inmediatas. Por ende, resulta necesario fortalecer las respuestas institucionales y las adaptativas de los productores, con énfasis en planes regionales de MIC desde un marco de la gestión patrimonial del cacao.

Palabras clave: agroecología; agroforestería; enfermedades del cacao; adaptación al cambio climático; manejo integrado del cacao; problemática del cacao.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Antonio Fidel Santos Hernández

Director de tesis: Dr. Conrado Márquez Rosano

GENERAL ABSTRACT

POTENTIAL DISTRIBUTION OF FROSTY POD ROT AND BLACK POD DISEASE IN CACAO AGROFORESTRY SYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS²

Cacao (*Theobroma cacao* L.), which in Mexico is cultivated within Agroforestry Systems (AFS), has been historically significant in the country due to its multiple functions. However, it is severely affected by diseases such as frosty pod rot (caused by *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny) and black pod disease (caused by *Phytophthora* spp.), which may be exacerbated by climate change (CC), while also being mediated by socioeconomic and environmental factors. Therefore, this study aimed to investigate the impacts of the main parasitological agents affecting cacao under the CC context and other limiting factors through different methodological approaches to propose adaptation strategies to CC and differentiated public policies. A state-of-the-art review was conducted on the parasitological, socioeconomic, and climatic limitations of cacao cultivation in Mexico (chapters 3 y 4), as well as two diagnostic studies (one in Soconusco, Chiapas, and another in Chontalpa, Tabasco: chapters 5 and 6, respectively) to understand the current system conditions. Finally, ecological niche modelling was performed for cacao, *Phytophthora capsici* Leonian, and *M. roreri* across tropical America under two CC scenarios (chapter 7) to project their potential distributions (PD). The results showed that the limitations, including CC, negatively affect cacao yields, physiology, and its pathosystem. In Chontalpa, organized organic cacao producers displayed greater adaptive capacity to CC compared to conventional producers. In Soconusco, greater multifunctionality was observed in traditional polycultures with integrated management (ICM) compared to simpler or poorly managed AFS. Therefore, improvement strategies (including ICM, associative organization, and diálogo de saberes) are essential to enhance the system resilience of this to CC. Moreover, projections indicated PD reductions for cacao for 2081–2100 in currently cultivated areas, alongside the coexistence of PDs for *M. roreri* and *P. capsici* in nearby areas. Hence, it is necessary to strengthen both institutional and producers' adaptive responses, emphasizing regional ICM plans within a framework of heritage-based cacao management.

Keywords:

Agroecology; agroforestry; cacao diseases; cacao integrated management; challenges of cacao production; climate change adaptation.

² Thesis of Doctor in Science in Multifunctional Agriculture for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Antonio Fidel Santos Hernández

Advisor: Dr. Conrado Márquez Rosano

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Antecedentes

El impacto del cambio climático sobre la biósfera ha sido estudiado desde hace tiempo, el cual se encuentra entrelazado con su salud y funcionalidad (Malhi *et al.*, 2020). Existe evidencia que fundamenta el proceso acelerado de calentamiento del planeta (Usher, 1989), el cual afecta a los ecosistemas marinos y terrestres debido al cambio en las condiciones de temperaturas medias anuales y en la variabilidad climática, al tiempo que tiene efectos sobre la acidificación del océano y en el aumento en el nivel del mar (IPCC, 2021). De igual modo, el cambio de estas condiciones, que en muchos casos pueden ser adversas, afectan a los sistemas de producción agrícola (Monterroso-Rivas *et al.*, 2015), incluidos los Sistemas Agroforestales (SAF) de cacao (*Theobroma cacao* L.) (de Sousa *et al.*, 2019; Delgado-Ospina *et al.*, 2021). Dichas afectaciones no solo giran en torno a la reducción de la producción por cambios en los ciclos de cultivo, al nivel fisiológico (Lahive *et al.*, 2019; Ríos-Bolívar *et al.*, 2022), sino que favorecen la incidencia de plagas y enfermedades (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2020; Marelli *et al.*, 2019). Aunado a que el cambio climático puede afectar la idoneidad climática de los árboles más comúnmente utilizados como sombra en SAF de cacao en Mesoamérica para 2050 (de Sousa *et al.*, 2019).

Los SAF proveen alimentos —por ejemplo, frutos, tanto locales como introducidos— que diversifican la dieta y fortalecen la resiliencia socioecológica (Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Nicholls *et al.*, 2013). Además, los SAF proveen protección contra plagas y enfermedades (Murillo-Cuevas *et al.*, 2020; Niether *et al.*, 2020). En este contexto, las estrategias de mitigación (reducción de impactos a nivel nacional e internacional) y adaptación (adecuación local o regional) al cambio climático han comenzado a tomar la merecida importancia durante los últimos años (Bunn *et al.*, 2019; Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Hebbar *et al.*, 2016).

La importancia de los SAF de cacao radica en que, debido a que se dan en esquemas de policultivo (Cruz González *et al.*, 2013), son una forma de agricultura multifuncional. Por lo que, al igual que las otras modalidades de esta, proveen de múltiples productos

y servicios, incluidos los servicios ecosistémicos (Casanova-Lugo *et al.*, 2016), que se reflejan en beneficios de carácter económico, social y ambiental (Niether *et al.*, 2020). Además, generan ingresos económicos, empleos y arraigo cultural al nivel de agricultura familiar (pues la mayoría de los SAF se encuentran en manos de pequeños productores, que en México poseen parcelas de 1.5 a 2 hectáreas en promedio). También proveen la protección del suelo y de la biodiversidad como externalidades hacia el conjunto de la sociedad (Niether *et al.*, 2020). Además, estos sistemas son pieza clave para avanzar hacia el desarrollo sostenible (FAO, 1999). Aunado a que, los SAF sirven como estrategia de mitigación al cambio climático, dado que capturan y fijan carbono (Trinidad *et al.*, 2016), conservan buena parte de la biodiversidad (en algunos casos en menor medida que en cuanto a bosques referente a especies nativas (Estrada *et al.*, 1997; Muñoz *et al.*, 2005), pero también en cuanto a la agrobiodiversidad) y termo-rregulan microclimas; a la vez que merman la presión por bienes materiales (leña, madera, frutos, etc.) sobre los bosques naturales (Castro-Nunez *et al.*, 2020).

Por otro lado, su función social es remarcable dado que, entre otras cosas, mejora el entorno en el que se desenvuelven los actores sociales pues, por ejemplo, fomenta su desarrollo territorial tras la dinamización productiva y la generación de empleos (IICA, 2019). Por ejemplo, derivado de una encuesta realizada a 109 productores de ocho municipios y 45 localidades en las dos principales regiones productoras de cacao en Chiapas (Soconusco y Norte), se identificó que poco más de la mitad de estos emplean mano de obra diferente a la familiar durante al menos una fase de la cadena productiva (Hernández-Gómez *et al.*, 2015), aunado al autoempleo de su propia familia. Además, estos fomentan el arraigo cultural, por ejemplo, el cacao fue cultivado por primera vez por culturas prehispánicas mesoamericanas: olmecas, luego mayas y aztecas (Motamayor *et al.*, 2002), precisamente gracias a ese arraigo sigue presente en muchas de las regiones donde previamente se cultivaba, a pesar de todas las dificultades que ha enfrentado (Hernández- Gómez *et al.*, 2015).

La reducción de la idoneidad climática para el cacao y una posible mayor incidencia de plagas por cambio climático amenazan la producción de cacao a nivel mundial (De

Sousa *et al.*, 2019; Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2020). La moniliasis (*Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny) y la mancha negra (*Phytophthora* spp.) constituyen las dos principales enfermedades fúngicas que amenazan la producción de cacao en México (Hernández-Gómez *et al.*, 2015) y, por ende, a la persistencia de los SAF cacao.

1.2. Justificación

En el contexto del déficit de producción de cacao en México (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, CEDRSSA, 2020; SIAP, 2021), la diversidad de problemas socioeconómicos que presenta el sistema productivo, que sumado a la vulnerabilidad al cambio climático (De Sousa *et al.*, 2019; Leandro-Muñoz y Cerda, 2021) e incidencia drástica de enfermedades que enfrentan estos SAF (Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Delgado-Ospina *et al.*, 2021), confieren aún mayor importancia a su estudio. Al mismo tiempo que se hace evidente la necesidad de dedicar mayor atención y recursos a su mejora. Más aún, ante el panorama previsto por cambio climático, dado que las enfermedades se ven influenciadas por el aumento de la temperatura y por los cambios en la precipitación, algunas veces en el beneficio de algunas zonas, pero muchas otras en su contra (Delgado-Ospina *et al.*, 2021). Lo anterior hace evidente la necesidad de abordar el problema de investigación desde la perspectiva de la vulnerabilidad al cambio climático, en el sentido de que se requieren estrategias de mitigación y adaptación (Bunn *et al.*, 2017; 2019). Para que las estrategias de manejo (incluidas las de adaptación al cambio climático) tengan mayor impacto potencial en la mejora de la capacidad adaptativa de los productores es necesario que respondan a sus propias necesidades, puesto que, por ejemplo, se ha dicho que los agentes de extensión no siempre comprenden la realidad y necesidades de estos (Somarriba *et al.*, 2021), y por ende fallan. En tanto que los estudios diagnósticos (que retoman aspectos productivos y socioeconómicos) sí informan estos aspectos. A la vez que estos actores pueden aportar alternativas de adaptación basadas en su propio conocimiento y experiencia.

Para la evaluación de la vulnerabilidad se deben considerar la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (IPCC, 2012). Por ende, con el presente trabajo

se buscó investigar los impactos de los principales agentes parasitológicos del cacao ante el contexto del cambio climático y sus demás limitantes desde diferentes enfoques metodológicos. Ello con el fin de proponer estrategias de adaptación al cambio climático y políticas públicas pertinentes.

En tanto que, el análisis sobre la exposición climática de los productores y los factores que determinan esa condición se investigó mediante estudios diagnósticos. La implementación de este enfoque implica verificar las condiciones en las que se encuentran los SAF como resultado del manejo por parte del productor.

Para la evaluación de la sensibilidad del sistema, se hizo evidente la necesidad de investigar las áreas de distribución potencial de las dos enfermedades más importantes del cacao en el país (causadas por *M. roreri* y *Phytophthora capsici* Leonian, aunque también otras especies de *Phytophthora* son relevantes, pero no han sido clarificadas taxonómicamente o estudiadas a detalle), así como de *T. cacao*. Dichas enfermedades ponen en riesgo la producción de cacao, no solo de México sino de toda América Tropical (Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Delgado-Ospina *et al.*, 2021). De igual modo, se hace evidente la necesidad de realizar el estudio con métodos robustos y proyectar los resultados a mediano y largo plazo, para poder así, tener acciones previstas de adaptación al cambio climático.

La forma en que se planteó este documento puede ayudar a que los productores enfrenten los riesgos susodichos (provocados por una mayor vulnerabilidad ambiental por cambio climático) al proyectar la intensidad del impacto del cambio climático (de forma espacial y temporal) y al realizar propuestas viables de adaptación basadas en conocimiento local y científico, las cuales quedarán sujetas a la implementación por las partes interesadas. Este trabajo también puede aportar elementos imprescindibles a los tomadores de decisiones para la mejora del sistema, no solo en el largo plazo, también en cuanto a su estado actual, pues se da una perspectiva exhaustiva a nivel nacional enmarcada en el contexto internacional. Con ello se buscó dar un panorama de las estrategias de adaptación al cambio climático que los tomadores de decisiones y los productores de cacao pueden incorporar para hacer frente a las adversidades del

cambio climático en el contexto actual y el futuro próximo, con la consideración del conocimiento científico, de la literatura y el local, de los productores de cacao.

1.3. Problema de investigación

El cultivo de cacao en México enfrenta limitantes multidimensionales de carácter climático, parasitológico y socioeconómico que se ven agravadas por el cambio climático (CC). Estas limitantes no solo reducen los rendimientos y comprometen la viabilidad económica del sistema, sino que también amenazan su multifuncionalidad y su rol como estrategia de adaptación y mitigación al CC. Además, existe un déficit nacional de producción de cerca del 50% (SIAP, 2021) y una vulnerabilidad climática de las unidades productivas en donde este se produce. En este contexto, surge la necesidad de responder al siguiente problema de investigación general: ¿Cuáles son las limitantes multidimensionales que afectan el cultivo de cacao en México y cómo interactúan actualmente entre sí y en el marco del CC? Además, ¿qué distribución potencial presentan actualmente el cacao, la moniliasis (causada por *M. roreri*) y la mancha negra (causada por *Phytophthora* spp., con énfasis en *P. capsici*) en el trópico americano y en México?, ¿cómo podría modificarse dicha distribución bajo escenarios futuros de CC?, ¿qué áreas resultan más vulnerables? y, finalmente, ¿qué estrategias de adaptación —tanto a nivel local como institucional— y políticas públicas son las más adecuadas para fortalecer la resiliencia del sistema cacaotero mexicano ante tal contexto?

1.4. Preguntas de investigación

Preguntas generales

¿Cuál es el estado actual de la producción del cacao en México?, ¿cuáles son los impactos del CC y de los principales agentes parasitológicos sobre el cultivo de cacao en México, considerando las demás limitantes socioeconómicas y ambientales que lo afectan? Y en particular, ¿qué distribución potencial presentan actualmente *T. cacao*, *M. roreri* y *P. capsici* en América tropical y en México?, ¿cómo podría cambiar dicha distribución bajo escenarios de CC?, ¿qué regiones resultan más vulnerables? y ¿qué estrategias de adaptación y políticas públicas son las más pertinentes para

incrementar la capacidad de adaptación de los productores y la sostenibilidad del sistema ante el CC?

Preguntas particulares

- **Estado del conocimiento** (capítulos 3 y 4): ¿Cuál es el estado actual de la producción del cacao en México?, ¿cuáles son las principales limitantes climáticas, parasitológicas y socioeconómicas que enfrenta el cultivo de cacao en México?, ¿cómo interactúan entre sí y ante el CC? y ¿qué estrategias de mejora agronómica, social e institucional pueden proponerse a partir de la evidencia científica disponible?
- **Objetivo 1** (capítulos 5 y 6): ¿Cómo han evolucionado los sistemas productivos que incluyen cacao en las dos principales regiones cacaoteras de México (Soconusco, Chiapas y Chontalpa, Tabasco)?, ¿cuál es su grado actual de capacidad de adaptación al CC y su multifuncionalidad?, ¿qué estrategias locales de adaptación al CC han desarrollado los productores? y ¿qué lecciones aportan para el diseño de políticas públicas contextualizadas?
- **Objetivo 2** (capítulo 7): ¿Cuál es la distribución potencial actual de *T. cacao*, *M. roreri* y *P. capsici* en América tropical y en México?, ¿cómo se proyecta su modificación ante dos escenarios de CC a mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100)? y ¿qué implicaciones tienen estos cambios para la vulnerabilidad fitosanitaria y la planificación de estrategias de adaptación al CC?

1.5. Objetivos

Objetivos generales

(1) Analizar el estado actual de la producción de cacao y de las limitantes multidimensionales del cultivo de cacao en México, (2) caracterizar la distribución potencial actual y futura de *T. cacao*, *M. roreri* y *P. capsici* ante escenarios de CC para identificar las regiones más vulnerables y proponer estrategias de adaptación y políticas públicas que fortalezcan la resiliencia, la multifuncionalidad y la gestión patrimonial de los SAF con cacao. Ello mediante la revisión de literatura (elaboración

del estado del arte o del conocimiento), herramientas de diagnóstico agrario y estadísticas relacionadas, así como modelos correlativos de nicho ecológico.

Particulares

- **Estado del conocimiento:** Realizar una sistematización (capítulo 3) y una revisión exhaustiva (capítulo 4) de la literatura científica nacional e internacional para el análisis del estado actual de la producción del cacao, así como de las limitantes climáticas, parasitológicas y socioeconómicas del cultivo de cacao en México, la identificación de las interacciones de tales limitantes y ante el CC, de los vacíos de investigación existentes y de las principales alternativas prácticas de mejora (de tipo agronómico, social e institucional; esta última en cuanto a políticas públicas).
- **Objetivo 1:** Caracterizar, mediante diagnósticos agrarios razonados, el estado actual, la evolución histórica y la sostenibilidad de los sistemas productivos que incluyen cacao en el Soconusco (Chiapas, capítulo 5) y la Chontalpa (Tabasco, capítulo 6) para proponer estrategias de mejora (estrategias de adaptación al CC), incluidas recomendaciones de política pública diferenciada y contextualizada. Para el caso de la Chontalpa y debido a diferencias sustanciales en los resultados del manejo agronómico, también se buscó evaluar la capacidad de adaptación al CC de distintos tipos de productores seleccionados (orgánicos y agremiados respecto a convencionales sin asociatividad) para identificar estrategias locales de adaptación al CC. Y para el caso del Soconusco, se buscó caracterizar la multifuncionalidad de las unidades productivas que incluían cacao (ante la presencia de una diversidad mayor de tipos de SAF) usando el método de análisis multicriterio (MCDA) de suma ponderada e indicadores recabados en campo; ello para el entendimiento de esa realidad regional y la proposición de estrategias de mejora ante el CC.
- **Objetivo 2:** (capítulo 7): Estimar, mediante modelos correlativos de nicho ecológico (*Maxent*) basados en registros de presencia georreferenciados y variables bioclimáticas de combinaciones de temperatura y precipitación, la distribución potencial actual y futura de *T. cacao*, *M. roreri* y *P. capsici* en América

tropical, con énfasis en México, bajo dos escenarios de cambio climático (SSP5-8.5, representado por HadGEM3-GC31-LL, y SSP3-7.0, representado por GFDL-ESM4; siendo SSP5-8.5 el escenario más pesimista). El objetivo incluyó cuantificar los cambios proyectados en idoneidad climática y su superposición espacial para los horizontes temporales 2041-2060 y 2081-2100 para la identificación de las regiones más vulnerables desde el punto de vista fitosanitario y para la proposición de estrategias de adaptación al CC a mediano y largo plazo.

1.6. Hipótesis

General

El CC agravará las limitantes parasitológicas y socioeconómicas del cultivo de cacao en México, pero los SAF bien manejados —con alta diversidad biológica, manejo integrado y capital social fortalecido— poseerán mayor capacidad de amortiguar dichos impactos y de generar co-beneficios ambientales y sociales.

Particulares

- **Estado del conocimiento** (capítulos 3 y 4): No se formularon hipótesis formales, dado el carácter exploratorio y de síntesis de esta etapa.
- **Objetivo 1** (capítulos 5 y 6): Los sistemas productivos tenderán a la simplificación y homogeneización (monocultivos o sistemas con menor diversidad), lo que reducirá su sostenibilidad y multifuncionalidad; sin embargo, aquellos que mantengan o incrementen prácticas agroecológicas (incluidos principios del manejo integrado del cacao) y asociatividad mostrarán mayor resiliencia y capacidad de adaptación al CC.
- **Objetivo 2** (capítulo 7): La distribución potencial de *T. cacao* se reducirá de manera significativa en las regiones tradicionales de cultivo ante escenarios de CC, mientras que la de *M. roreri* y *P. capsici* se mantendrá o ampliará, incrementando la superposición de riesgo fitosanitario en las áreas remanentes, o bien, desplazando esas condiciones bioclimáticas idóneas hacia mayores altitudes.

Nota: la última hipótesis finalmente fue refutada en parte, pues se confirmaron pérdidas netas para el cacao y mantenimiento/ampliación para ambas especies de fitopatógenos (*M. royeri* y *P. capsici*) según el horizonte y el modelo considerado.

1.7. Contenido temático

A continuación se explica la forma en que se organizó el presente documento de graduación. Primeramente, para sentar los antecedentes de la investigación y algunas alternativas de mejora, se realizó un estado del arte sobre las limitantes parasitológicas, socioeconómicas y climáticas (con enfoque en CC) del cultivo de cacao en el país, desde una perspectiva internacional (capítulos 3 y 4: el primero sistematiza y clasifica los estudios y el segundo analiza los contenidos temáticos a profundidad). Luego, se realizaron dos estudios diagnósticos razonados (uno en Soconusco, Chiapas y otro en la Chontalpa, Tabasco: capítulos 5 y 6, respectivamente) para conocer las condiciones actuales del sistema. Los capítulos 3 y 4 también informaron sobre este aspecto, pero en lo referente a lo que se ha escrito a nivel científico y académico. En tanto que los estudios diagnósticos, que implican recabar información directamente de los productores y hacer una revisión histórica, informaron sobre la realidad que se vive en el campo, así como sobre la historia agrícola regional y la complementariedad de los sistemas productivos con cacao de una misma unidad productiva. Adicionalmente, los estudios diagnósticos fueron complementados con los siguientes análisis: en la Chontalpa se caracterizó la capacidad de adaptación al cambio climático en dos tipos de productor (cuatro productores de cacao orgánico agremiados y cuatro productores convencionales sin asociatividad). En el Soconusco, debido a una mayor diversidad de tipos de SAF se implementó un análisis de la multifuncionalidad a los niveles de unidad productiva y SAF usando el método de análisis multicriterio (MCDA) de suma ponderada e indicadores multidimensionales recabados durante las entrevistas. En ambos casos se destacó la vulnerabilidad climática regional desde una perspectiva histórica. Finalmente, se realizó la modelación del nicho ecológico del cacao, *P. capsici* y *M. royeri* en América tropical en el contexto de variables bioclimáticas actuales y ante dos escenarios de CC (capítulo 7), donde se hacen proyecciones sobre sus distribuciones potenciales actuales y

futuras, al tiempo que se proponen estrategias de mejora. Finalmente, las conclusiones generales (capítulo 8) reafirman los principales hallazgos del trabajo y establece pautas claras, tanto para futuras líneas de investigación como para la implementación práctica de las estrategias y políticas públicas propuestas.

1.8. Literatura citada

- Aime, M. C., & Phillips-Mora, W. (2005). The causal agents of witches' broom and frosty pod rot of cacao (*Theobroma cacao*) form a new lineage of Marasmiaceae. *Mycologia*, 97(5), 1012–1022. <https://doi.org/10.3852/mycologia.97.5.1012>
- Bunn, C., Läderach, P., Quaye, A., Muilerman, S., Noponen, M. R. A., & Lundy, M. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services*, 16, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123>
- Bunn, C., Talsma, T., Läderach, P., & Castro, F. (2017). *Climate change impacts on Indonesian cocoa areas*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parson, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A., & Díaz-Echeverría, V. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 269–284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.02.006>
- Castro-Núñez, A., Charry, C., Castro-Llanos, F., Sylvester, J., & Bax, V. (2020). Reducing deforestation through value chain interventions in countries emerging from conflict: The case of the Colombian cocoa sector. *Applied Geography*, 123, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102280>
- CEDRSSA. (2020). Industria del cacao en México. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. Cámara de Diputados. http://www.cedrssa.gob.mx/post_industria_del_-n-cacao_en_mn-xicon.html
- Cruz González, B., Jarquín Gálvez, R., & Ramírez Tobías, H. M. (2013). Viabilidad económica y ambiental de policultivos de hule, café y cacao. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(1), 49–61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i1.415>
- De Sousa, K., Van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*, 9, 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>
- Delgado-Ospina, J., Molina-Hernández, J. B., Chaves-López, C., Romanazzi, G., & Paparella, A. (2021). The role of fungi in the cocoa production chain and the challenge of climate change. *Journal of Fungi*, 7(3), 202. <https://doi.org/10.3390/jof7030202>
- Estrada, A., Coates-Estrada, R., & Meritt, D. (1997). Non-flying mammals and landscape modifications in the tropical rainforest of Los Tuxtlas, Mexico. En W. F. Laurence & R. O. Bierregaard (Eds.), *Tropical forest remnants: Ecology*,

- management, and conservation of fragmented communities* (pp. 99–115). University of Chicago Press.
- FAO. (1999). *El carácter multifuncional de la agricultura y la tierra*. Documento preparado para la Conferencia FAO/Países Bajos sobre el Carácter Multifuncional de la Agricultura y la Tierra. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/3/x7655s/x7655s00.htm>
- Hebbar, K. B., Chaturvedi, S., Nagaraja, A., & Ananda, K. S. (2016). Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *Science of the Total Environment*, 569-570, 1369–1381. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119>
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillen, G., Garrido-Ramírez, E. R., Romero-Nápoles, J., & Nava-Díaz, C. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao (*Theobroma cacao*) en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 232–246.
- IICA. (2019). Programa de desarrollo rural y agricultura familiar. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- IPCC. (2012). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. A special report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jung, J. M., Byeon, D. hyeon, Kim, S. H., Sunghoon-Jung, & Lee, W. H. (2020). Estimating economic damage to cocoa bean production with changes in the spatial distribution of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in response to climate change. *Journal of Stored Products Research*, 89, 101681. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101681>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Leandro-Muñoz, M. E., & Cerda, R. (2021). Guía para el manejo integrado de enfermedades en el cultivo de cacao. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: Threats, opportunities, and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Marelli, J.-P., Guest, D. I., Bailey, B. A., Evans, H. C., Brown, J. K., Junaid, M., Barreto, R. W., Lisboa, D. O., & Puig, A. S. (2019). Chocolate under threat from old and

- new cacao diseases. *Phytopathology*, 109(8), 1333–1343. <https://doi.org/10.1094/PHTO-12-18-0477-RVW>
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez Díaz, J. D., Lunch-Cota, S., Sáenz, R., Pérez, E., Salvadero, C., Lunch-Cota, D., Saldivar-Lucio, R., Ponce Díaz, G., Martínez, C., Ramírez-García, G., & Baca-del Moral, J. (2015). *Sistemas de producción de alimentos y seguridad alimentaria*. En Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo II: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. UNAM.
- Motamayor, J. C., Risterucci, A. M., Lopez, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., & Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: The origin of the cacao (*Theobroma cacao*) cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89(5), 380–386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>
- Muñoz, D., Estrada, A., & Naranjo, E. (2005). Foraging ecology of howler monkeys (*Alouatta palliata*) in relation to the accessibility of food sources in a cacao plantation with forest fragments in southern Mexico. *International Journal of Primatology*, 26(6), 1351–1372. <https://doi.org/10.1007/s10764-005-8856-1>
- Murillo-Cuevas, F. D., Adame-García, J., Cabrera-Mireles, H., Villegas-Narváez, J., & Rivera-Meza, A. E. (2020). Fauna edáfica e insectos asociados a las arvenses en limón persa, monocultivo y policultivo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), e2508. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2508>
- Nicholls, C. I., Altieri, M. A., & Vazquez, L. (2013). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(3), 571–585. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W.J., Andres, C. and Armengot, L., 2020. Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15, 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Ríos-Bolívar, F. M., Garruña, R., Rivera-Hernández, B., Herrera, A., & Tezara, W. (2022). Effect of high concentrations of CO₂ and high temperatures on the physiology of Mexican cocoa. *Plant Stress*, 6, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100114>
- SIAP. (2021). Datos abiertos: Estadística de la producción agrícola del 2020. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.infosiap.siap.gob.mx>
- Somarriba, E., Peguero, F., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., López-Sampson, A., Leandro-Muñoz, M. E., Jagoret, P., & Sinclair, F. L. (2021). Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9>
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, A., & Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 2(1), 53–71.

Usher, P. (1989). World Conference on the Changing Atmosphere: Implications for Global Security. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 31(1), 25–27. <https://doi.org/10.1080/00139157.1989.9929931>

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo, que trata sobre el marco teórico-conceptual del documento de graduación, son desarrollados los conceptos teóricos que guiaron la investigación, entre ellos se encuentran: enfermedad, nicho ecológico, clima y cambio climático.

En este capítulo no se incluyeron los marcos de referencia y metodológico debido a que cada capítulo (en forma de artículo) incluye tanto los antecedentes como las metodologías empleadas de forma amplia en cada caso.

2.1. Enfermedad

La teoría germinal de la enfermedad, propuesta por Louis Pasteur en la segunda mitad del siglo XIX, revolucionó la comprensión de las patologías al demostrar que microorganismos específicos (bacterias, hongos, virus, protistas, priones) son la causa directa de muchas enfermedades infecciosas, reemplazando paradigmas previos como la teoría miasmática o de los humores (Madigan *et al.*, 2006). Tales agentes, denominados patógenos, invaden hospedantes (ya sean humanos, animales o plantas), se reproducen y desencadenan respuestas patológicas (Madigan *et al.*, 2006).

En fitopatología, se indica que la enfermedad no depende únicamente del patógeno, sino de un conjunto de componentes que son representados por el marco analítico del triángulo de la enfermedad (Figura 1). El cual se utiliza para entender y explicar la ocurrencia y dinámica de las enfermedades en plantas (Bailey & Meinhardt, 2016).

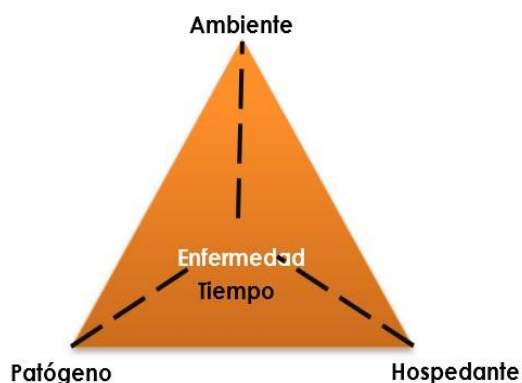


Figura 1. Triángulo de la enfermedad.

Fuente: elaboración propia con base en Bailey & Meinhardt (2016).

Tales componentes del marco se muestran y ejemplifican en el Cuadro 1. Además, factores secundarios como genética del hospedante, estado nutricional, sistema inmunológico vegetal y condiciones higiénicas modulan la severidad de la infección (Evans *et al.*, 2008).

Por su parte, un agente causal puede ser biológico, químico, físico o nutricional (Madigan *et al.*, 2006). En sistemas agrícolas complejos, se habla de patosistemas múltiples, donde múltiples agentes fitopatógenos y plagas interactúan con diversos hospedantes en un mismo sistema agrícola (Jeger & Pautasso, 2008). Estos autores indican que los patosistemas se pueden ver modificados por el cambio climático: ampliarse o agravar la severidad e incidencia de los patógenos sobre el hospedante.

Cuadro 1. Componentes del triángulo de la enfermedad.

Componente	Descripción
Patógeno	Agente causal (ej. <i>Moniliophthora roreri</i> (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny, <i>Phytophthora</i> spp.)
Hospedante	Planta susceptible (ej. <i>Theobroma cacao</i> L. en condición de estrés o con poca resistencia a los patógenos anteriores)
Ambiente	Condiciones favorables (humedad, temperatura, luz, etc.): por ejemplo, <i>Phytophthora</i> se ve beneficiado por lluvias abundantes
Tiempo	Duración de la interacción, desde la infección hasta la expresión de síntomas o signos

Fuente: elaboración propia con base en Bailey & Meinhardt (2016).

2.2. Nicho ecológico

El nicho ecológico describe el rol funcional y las condiciones ambientales que una especie requiere para persistir. Según Hutchinson (1957), el nicho fundamental es el hipervolumen n-dimensional de variables ambientales (pudiendo ser estas variables bioclimáticas o edáficas) donde una especie puede mantener poblaciones viables sin interacciones bióticas negativas. El nicho potencial es la porción de este nicho que existe en un momento y lugar dado. El nicho realizado, por su parte, es más restringido: competencia, depredación, mutualismo, dispersión y colonización son los factores determinantes (Jackson & Overpeck, 2000).

Soberón y Nakamura (2009) proponen una dualidad en el marco del modelado de nichos ecológicos. La perspectiva ambiental (E, de *Environmental*): un subconjunto de

variables que la especie necesita; y una perspectiva geográfica (G): aquellas áreas o espacio geográfico donde esas condiciones ambientales ocurren.

Al respecto, el diagrama BAM (Figura 2) integra tres factores para explicar tal dualidad y entender los marcos teóricos en los que se fundamentan los modelos de la distribución de las especies (Soberón *et al.*, 2017):

- A (Abiotic): Condiciones abióticas favorables (físico-químicas, climáticas, edáficas, etc.)
- B (Biotic): Interacciones con otras especies
- M (Movement): Accesibilidad geográfica (dispersión). Esto es, aquella área que le es accesible a una especie, dadas sus capacidades de dispersión. Puede tratarse de barreras físicas: ambientales (como límites térmico-pluviales) o geográficas (como cañadas o montañas).

La intersección $A \cap B \cap M$ define el nicho ocupado, real o actual (poblaciones fuente). Áreas en A pero fuera de M son G_I (condiciones favorables, pero inaccesibles). Poblaciones en $B \cap M$ pero fuera de A son sumideros. Con sumideros se refiere a una zona donde una especie está presente (es decir, hay registros o individuos), pero las condiciones ambientales no son óptimas para su persistencia a largo plazo (Soberón & Peterson, 2005; Soberón *et al.*, 2017).

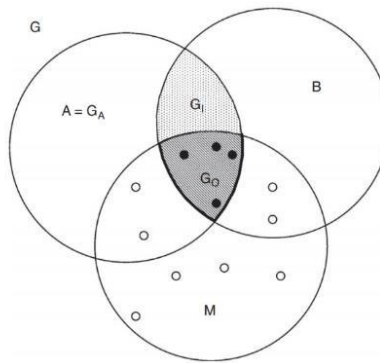


Figura 2. Diagrama BAM: interacciones entre factores abióticos, bióticos y movilidad.
Fuente: Soberón *et al.* (2017)

Este trabajo adoptó la visión grinnelliana del nicho ecológico. La cual es definida en el espacio ambiental (E), que se proyecta geográficamente como un modelo de

distribución de las especies en el espacio geográfico, G (Soberón, 2007). Posteriormente, las salidas espaciales del modelo se expresan en una escala logística de idoneidad climática (valores continuos entre 0 y 1), que posteriormente se reclasifican en áreas de distribución potencial mediante la aplicación de un umbral con significado ecológico. Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de modelado de nicho ecológico, ya que permite vincular condiciones ambientales con patrones espaciales de ocurrencia. Lo que facilita la interpretación biogeográfica y la toma de decisiones en contextos de conservación biológica, manejo fitosanitario y proyecciones ante escenarios de cambio climático (Soberón *et al.* 2017).

2.3. Clima y cambio climático

La definición de clima que aquí se usará es la siguiente: es el conjunto de condiciones atmosféricas promedio (precipitación, temperatura, humedad, viento) en un lugar determinado durante 30 años (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2014). El cambio climático es cualquier alteración sostenida (durante décadas o más) en el sistema climático global (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera, biosfera), mismo que implica modificaciones en los promedios anuales, en la variabilidad interanual y en eventos extremos en tales aspectos (IPCC, 2013). Entre las causas del cambio climático se ubican las siguientes (IPCC, 2014). Naturales: variabilidad orbital, actividad solar, erupciones volcánicas y deriva continental. Entre las de tipo antropogénico se encuentran: emisiones de gases de efecto invernadero (GEI: dióxido de carbono, metano y dióxido de nitrógeno), deforestación y urbanización.

2.5. Literatura citada

- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (Eds.). (2016). *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P., & Fitt, B. D. L. (2008). Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(25), 525–531. <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1136>
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, 415-427. <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

- on *Climate Change*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jackson, S. T., & Overpeck, J. T. (2000). Responses of plant populations and communities to environmental changes of the late Quaternary. *Paleobiology* 26(S4), 194-220. <https://doi.org/10.1017/S0094837300026932>
- Jeger, M. J., & Pautasso, M. (2008). Plant disease and global change-the importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177(1), 8-11. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02312.x>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2006). *Brock Biology of Microorganisms (11th ed.)*. Pearson Prentice Hall.
- Soberón, J. (2007). Grinnellian and Eltonian niches and geographic distributions of species. *Ecology Letters*, 10(12), 1115–1123. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x>
- Soberón, J., & Nakamura, M. (2009). Niches and distributional areas: Concepts, methods, and assumptions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(Supplement 2), 19644-19650. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901637106>
- Soberón, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437-441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>

CAPÍTULO 3. LIMITANTES CLIMÁTICAS, PARASITOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS DEL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN MÉXICO. FASE I: SISTEMATIZACIÓN³

3.1. Resumen

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), que ha estado vinculado a varias culturas mesoamericanas asentadas en lo que hoy es México, enfrenta limitantes climáticas, parasitológicas y socioeconómicas que restringen su producción. Esta revisión buscó analizar el estado actual de la producción a nivel nacional e internacional y sistematizar el estado actual del conocimiento sobre estas limitantes en el país, contrastándolas internacionalmente. Ello mediante el análisis de los indicadores de la producción y la búsqueda y sistematización de documentos de Scielo, Scopus, Redalyc, Dialnet y recomendaciones de expertos. Tras su depuración, quedaron un total de 249 registros, los cuales fueron clasificados por tipo de limitante y brevemente discutidos (para posteriormente ser discutidos a profundidad en el siguiente capítulo). El 55.4% de los estudios se centraron en aspectos agronómicos y parasitológicos, mientras que solo 23 abordaron explícitamente el CC o aspectos climáticos. La dimensión socioeconómica estuvo representada en aproximadamente el doble de casos, aunque también apareció en el grupo “temática integrada”. La producción nacional de cacao muestra un debilitamiento en cuanto a todos los indicadores de producción, excepto en el precio medio rural y el valor total de la producción. En concordancia con el contexto internacional, las enfermedades y el ámbito organizativo-institucional donde se cultiva el cacao, han sido sus principales limitantes parasitológica y social, de manera respectiva. Se encontró un incremento sustancial en la frecuencia de publicaciones desde 2005, lo que indudablemente se relacionó con la entrada de la moniliasis (causada por *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny) a México. Que si bien merma la producción del cacao, dicha enfermedad de origen sudamericano fue la razón por la cual se le otorgó mayor atención a este cultivo en el ámbito científico y gubernamental. Por otro lado, en cuanto a los aspectos más investigados referentes a CC-clima se tiene: captura de carbono (mitigación del CC), proyecciones ante escenarios de CC, y respuestas fisiológicas y ecofisiológicas del cacao al microclima (y su modificación mediante manejo agroforestal) y al CC, así como los factores potenciales de resiliencia multidimensional del sistema al CC. En conjunto, estos hallazgos permiten delimitar vacíos temáticos y orientar futuras investigaciones hacia enfoques integrados, contextualizados y prospectivos, especialmente en torno a la resiliencia del sistema cacaotero frente al CC y sus dimensiones socioproductivas.

Palabras clave: agricultura multifuncional; cambio climático; parasitología del cacao; sistemas agroforestales.

³ Sometido a: Tropical and Subtropical Agroecosystems.
Estado: atendiendo sugerencias.

3.2. Summary

Cacao cultivation (*Theobroma cacao* L.), historically linked to several Mesoamerican cultures settled in what is now Mexico, faces climatic, parasitological, and socioeconomic limitations that constrain its production. This review aimed to analyze the current state of cacao production at both national and international levels, and to systematize the state of knowledge regarding these limitations within Mexico, contrasting them with global trends. The analysis was based on production indicators and a systematic review of documents retrieved from Scielo, Scopus, Redalyc, Dialnet, and expert recommendations. After filtering, 249 records were retained and classified by type of limitation. These were briefly discussed here and will be examined in greater depth in the following chapter. Of the reviewed studies, 55.4% focused on agronomic and parasitological aspects, while only 23 explicitly addressed climate change (CC) or climatic variables. The socioeconomic dimension appeared in approximately twice as many cases and was also present in the “integrated theme” category. Cacao production at country scale shows a decline across all indicators, except for the average rural price and total production value. In line with international findings, the main limitations identified were diseases (parasitological) and the organizational-institutional environment in which cacao is cultivated (social). A marked increase in publication frequency was observed after 2005, likely linked to the arrival of moniliasis in Mexico, caused by *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny. Although this South American disease negatively affects cacao yields, it also prompted greater attention to the crop in both scientific and governmental spheres. Regarding the most researched CC-related topics, the literature highlights carbon sequestration (as a CC mitigation strategy), projections under climate change scenarios, and the physiological and ecophysiological responses of cacao to microclimatic conditions—particularly those modified through agroforestry management. Additionally, studies explored potential factors contributing to the system’s multidimensional resilience to CC. Together, these findings help identify thematic gaps and guide future research toward integrated, contextualized, and forward-looking approaches, especially those focused on the resilience of cacao systems and their socio-productive dimensions.

Keywords: multifunctional agriculture; climate change; cacao parasitology; agroforestry systems.

3.3. Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) es un árbol perenne de importancia multidimensional a nivel mundial, de origen sudamericano (Motamayor *et al.*, 2002, 2008). De hecho, soporta una industria multibillonaria (ICCO, 2012). En México, es un cultivo agroforestal tradicional, que fue ampliamente cultivado por nuestras culturas originarias desde hace milenios, con simbolismo, usos y valores únicos desde entonces (Arias González, 2014). También, este cultivo puede contribuir con el cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) debido a su carácter

multifuncional y conservacionista, tanto del patrimonio biocultural como de la diversidad biológica (Moreno-Calles *et al.*, 2013; Ortega Andrade *et al.*, 2017). Además, con un manejo e incentivos adecuados (Espinosa-García *et al.*, 2015) puede ser rentable y contribuir a la seguridad alimentaria familiar (Hernández-Gómez *et al.*, 2017). Sin embargo, actualmente se encuentra bajo una serie de limitantes de diferente índole, que varían de naturaleza e intensidad regionalmente (De la Cruz-Landero *et al.*, 2015; ICCO, 2012).

La importancia de este cultivo radica en que, debido a que es una forma de agricultura multifuncional, al igual que las otras modalidades de esta, provee de múltiples productos (como el grano de cacao y el chocolate) y servicios o externalidades positivas (incluidos los servicios ecosistémicos) que se reflejan en beneficios de carácter económico, social y ambiental (Casanova-Lugo *et al.*, 2016). En México, estos sistemas se encuentran ligados mayormente a la agricultura familiar (AF). Tan solo en Tabasco casi 33 mil productores, el 88% con menos de 6 ha, se dedican a esta actividad (Vázquez-Navarrete & Rahman, 2014). En el país, este cultivo se presenta de forma dominante en sistema agroforestal (SAF) de bajos insumos, de tipo silvoagrícola (al combinar principalmente, un componente agrícola y uno o más arbóreos), aunque, debido a la creciente demanda del mercado, a nivel mundial existen tendencias a su intensificación, conversión y expansión en monocultivo (Benjamin *et al.*, 2025; Niether *et al.*, 2020). De hecho, en el Soconusco, México, existen tendencias a la simplificación de la sombra del SAF para intentar reducir la incidencia de la moniliasis, sin que se hayan demostrado resultados satisfactorios (López-Cruz *et al.*, 2021). Lo que representaría una tendencia local análoga a lo mundial.

Estos SAF generan ingresos económicos, empleos y arraigo cultural. Y debido a sus características de diversidad biológica, belleza escénica e importancia biocultural, también tienen potencial para el turismo en diferentes modalidades, como son: agroturismo (Aguilar-González, 2018; Valenzuela-Córdova *et al.*, 2015) y turismo gastronómico (Camacho-Gómez & Mejía-Rocha, 2018; Pérez-Flores *et al.*, 2020).

Además, los SAF proveen las externalidades de protección del suelo y de la biodiversidad al conjunto de la sociedad entera y son piezas clave para avanzar hacia el desarrollo rural y el desarrollo sostenible (Barradas Miranda *et al.*, 2019; Krishnamurthy & Krishnamurthy, 2016; Notaro *et al.*, 2022). Sin dejar de lado que los SAF sirven como estrategia de mitigación al cambio climático (CC) al capturar y fijar carbono, especialmente en sus componentes arbóreos (Morán Villa, 2022). Además, estos sistemas reducen la presión sobre los bosques naturales, donde también pueden servir a modo de corredor biológico para mantener la conectividad paisajística (Castro-Nunez *et al.*, 2020; Estrada & Coates-Estrada, 2005). Y en lugares como Tabasco y el Soconusco, Chiapas, en donde los bosques tropicales (selvas altas y medianas) prácticamente ya no existen, los SAF desempeñan un papel igual de relevante, al actuar como sustitutos de tales ecosistemas, ofreciendo funciones ambientales o servicios ecosistémicos equiparables (Casanova-Lugo *et al.*, 2016) —como la captura de carbono—y bienes materiales como leña, madera y frutos (Salvador-Morales *et al.*, 2019; Sánchez-Díaz *et al.*, 2019). Por lo que en ese mismo sentido, dichos SAF son equiparables a relictos de la vegetación original (Salvador-Morales *et al.*, 2020; Morán-Villa *et al.*, 2022). También, los SAF pueden contribuir a la adaptación al CC debido al efecto amortiguador de temperaturas altas y minimización de temperaturas extremas (Hutchins *et al.*, 2015).

Sin embargo, este sistema presenta una serie de limitantes mutlidimensionales que hacen necesario su abordaje (Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Ramírez González, 2008). Además de que la producción nacional ha ido a la baja en las últimas décadas (SIAP, 2022).

Ante ello, se realizó el análisis de datos oficiales de producción (grano de cacao) y la sistematización de literatura científica relevante sobre las principales limitantes del cultivo de cacao en México. El análisis se centró en limitantes climáticas, parasitológicas y socioeconómicas, abordadas desde el marco de la agricultura multifuncional a nivel nacional, con una perspectiva internacional en las secciones pertinentes. Las limitaciones se clasificaron en temas principales y secundarios por documento. Asimismo, se realizaron síntesis temáticas de cada factor limitante (lo que

se integró al nivel de subsección), se identificaron vacíos de investigación, así como algunas oportunidades y alternativas prácticas de mejora. Sin embargo, la mayoría de estos apartados se desarrollarán con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

3.3. Materiales y métodos

3.3.1. Análisis del comportamiento de la producción de cacao a nivel internacional y nacional

Primero, se dio un panorama de la producción de cacao a nivel nacional e internacional con base en los datos provistos por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés), FAOSTAT (FAO, 2022), el SIAP (2022) y el Buscador de Beneficiarios del programa de Producción para el Bienestar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Agricultura, 2022a). Luego, se discutieron los temas más investigados por cada temática (según el objetivo de cada documento) con el fin de destacar los contenidos generales que más han sido abordados.

3.3.2. Especificaciones de las búsquedas

Se realizaron búsquedas desde julio de 2022 hasta junio de 2024 en Scopus (en título, abstract y palabras clave), Dialnet (en todos los campos), Redalyc (en todos los campos) y Scielo (en todos los campos) con la fórmula siguiente: ((cacao OR cocoa) AND (Mexic* OR Tabasco OR Chiapas OR Guerrero OR Oaxaca). Además, se incluyó en esta sección a artículos recomendados por expertos y a la lista de artículos anexados por Fisher-Ortíz *et al.* (2022), quienes emplearon una amplia cantidad de información científica (249 registros) en torno al cacao con el fin de destacar su resiliencia general y al CC en México. Cabe destacar que los 249 registros utilizados por Fisher-Ortíz *et al.* (2022) fueron distintos a los empleados en esta revisión, la cual incluyó un número mayor de documentos en la fase inicial.

3.3.3. Criterios de inclusión y exclusión

Se consideraron artículos escritos en inglés y español; tanto escritos originales como revisiones; se dio prioridad a los primeros, pero no se excluyeron del todo (sobre todo aquellos recomendados por expertos) a tesis, capítulos de libro y libros. Se seleccionaron escritos que informaran sobre el cultivo de cacao y de forma pareada:

CC, plagas, enfermedades y problemas socioeconómicos asociados. No hubo una delimitación por el año de publicación. En la base de datos se excluyeron a aquellos documentos enfocados al cultivo de cacao en otros países, en otros cultivos de México y aquellos estudios poco relevantes para nuestro objetivo (que abordaban otras temáticas). Sin embargo, algunos escritos relevantes del cacao en otros países sí se han retomado en el cuerpo del artículo debido a su relevancia en la contribución de la problemática analizada.

3.3.4. Sistematización de la información

La gestión de la base de datos de los artículos se realizó en Excel. Para la gestión de citas y referencias se empleó el software Mendeley. En la sistematización de la información de cada registro se emplearon las siguientes categorías temáticas: Agronómica (aspectos relacionados netamente al manejo), Socioeconómica, Parasitológica (plagas y enfermedades), Cambio climático-clima e Integrada (más de una temática dominante), según correspondiera la dominancia temática en cada caso. Asimismo, se categorizaron el tema o los temas específicos de cada documento, distinguiéndose entre tema principal o dominante y tema secundario. Este último se utilizó para describir de manera alterna o complementaria al tema principal, aunque no siempre fue posible asignarlo. Los temas variaron mucho entre temáticas (y no siempre fue clara su definición y delimitación); lo anterior, según el examen del registro (título, resumen y palabras clave; si era necesario, se recurría a revisar el documento en extenso). Finalmente, los registros depurados fueron sujetos a síntesis temática con apoyo de la categorización y la minería de textos (Silge & Robinson, 2017): nubes de palabras y su frecuencia. Esta técnica incluye el uso de varios paquetes de RStudio (R Core Team, 2024); sus procedimientos son bien conocidos (Silge & Robinson, 2017): se realizó la limpieza de datos (eliminación de caracteres especiales y números), filtro de palabras vacías (*stopwords*) e irrelevantes, tokenización (conversión del texto a unidades más pequeñas: palabras en este caso), normalización (conversión de letras mayúsculas a minúsculas) y vectorización (conversión del texto a unidades numéricas, procesables por las máquinas). El uso de tales técnicas asegura que no existan sesgos

de la información contenida en el texto con respecto a la que se representa en los diagramas.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Producción de cacao

México ha ocupado del décimo al decimocuarto lugar en la producción mundial de cacao desde la década de 1990 hasta la actualidad, con una producción anual que ha oscilado entre 25,000 y 30,000 toneladas, lo que representa aproximadamente el 0.5 % del volumen global (FAO, 2022). En 2020 produjo poco menos de 30 mil toneladas de grano seco (ver Figura 3), a la vez que el primer lugar lo ha ocupado Costa de Marfil. Dicho país ha liderado la producción mundial de cacao desde la década de 1980, con un volumen estimado de 2.2 millones de toneladas en 2020, equivalente al 38 % de la producción global. En segundo lugar se ubicó Ghana, con aproximadamente 800 mil toneladas, que representaron el 19 % del total mundial, según estimaciones de FAO (2022).

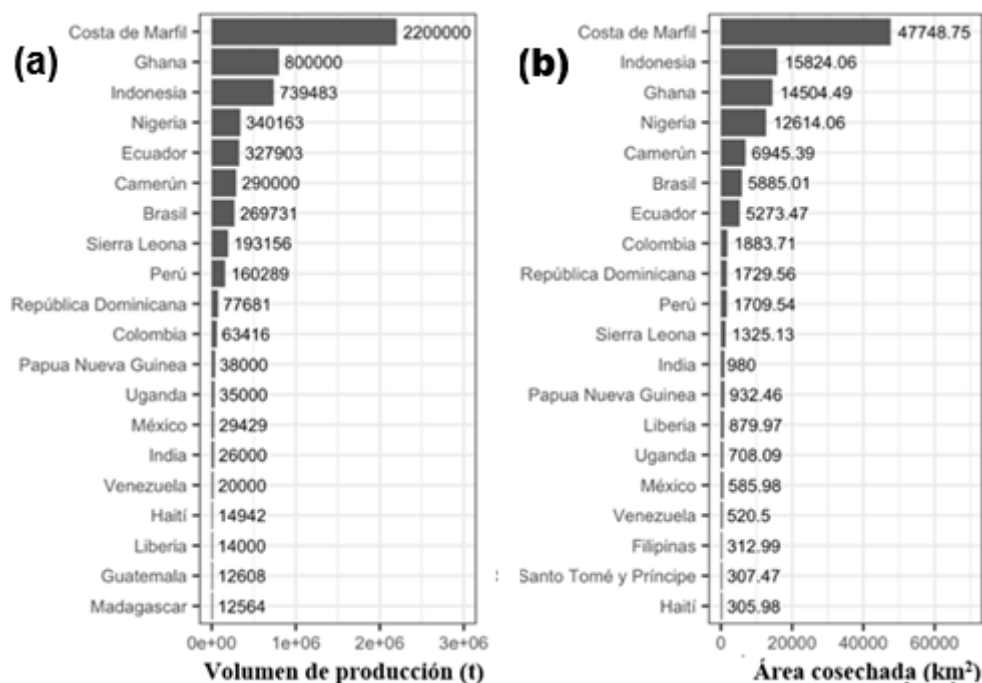


Figura 3. Estadísticas de la producción de cacao a nivel mundial en 2020.
(a) Los 20 principales países con mayor producción y (b) los países con mayor superficie sembrada a nivel mundial.

Fuente: elaboración propia con datos de FAO (2022).

Sin embargo, anteriormente Ghana era el líder mundial en la producción de cacao: la enfermedad del virus del hinchamiento de brote del cacao (*Cacao Swollen Shoot Virus*, CSSV, causada por un conjunto diverso de *Badnavirus*) favoreció ese relevo (Bailey & Meinhardt, 2016), en concordancia con la afirmación de que la distribución actual del cultivo ha sido moldeada por la cuestión parasitológica (Díaz-Valderrama *et al.*, 2020). El área que se cosecha tiene un comportamiento análogo al volumen de producción.

Continuando con los datos de producción, posteriormente se encuentra Nigeria con 340 000 toneladas producidas, fomentando con ello el gran bloque africano-occidental, a la vez que Indonesia (13% de la producción mundial) hace lo propio con el bloque del sudeste asiático, los cuales suplen a la mayor parte de la demanda del mercado (ICCO, 2012), principalmente con la variedad Amelonado (Motamayor *et al.*, 2002). Ecuador y Brasil son los países con mayores niveles productivos en América, y de estos, solo Ecuador tiene excesos de producción considerables, dado que Brasil consume gran parte de su producción, como sucede con su café; incluso Perú, República Dominicana y Colombia tienen una producción superior a la de México (FAO, 2022; ICCO, 2012).

A nivel mundial, se ha estimado que las pérdidas anuales de cacao por enfermedades ascienden a más de 40%, las cuales se concentran en los géneros *Rizoctonia* (*Oncobasidium* o *Ceratobasidium*), *Moniliophthora*, *Phytophthora* y *Badnavirus/Nepovirus* (Bailey & Meinhardt, 2016; Marelli *et al.*, 2019), los dos primeros son de tipo fúngicas, el tercero es un oomiceto (moho acuoso o pseudohongo) y la última, un virus (transmitido por cochinillas, familia Coccoidea). Por ello es relevante analizar los riesgos de las afectaciones de las enfermedades y plagas en el cacao frente a los escenarios del CC.

La producción de cacao en México durante 2021 se presenta en la Figura 4. Según datos del SIAP (2022), se registró un volumen de 28,105 toneladas de cacao seco, de las cuales el 92.8 % provino de cultivos con modalidad de temporal y el 7.2 % de riego. El rendimiento promedio nacional fue de 0.54 t ha⁻¹, con 0.52 t ha⁻¹ en temporal y 1.15 t ha⁻¹ en riego. La superficie cosechada total alcanzó las 51,952.8 hectáreas, distribuidas en 96.6 % bajo temporal y 3.4 % bajo riego; de esta última, 36 ha

correspondieron a Tabasco y 1,718.6 ha a Chiapas. En tanto que la superficie sembrada fue aproximadamente 2 % mayor que la cosechada y el precio medio rural se estimó en 41,870.7 pesos mexicanos por tonelada, con un valor bruto de producción nacional de 1,176.8 millones de pesos.

La superficie cosechada de cacao en México ha mostrado una tendencia fluctuante desde la década de 1970 (FAO, 2022; SIAP, 2022). Tras alcanzar su máximo histórico en 1995 con más de 90 mil hectáreas, comenzó un descenso gradual que se acentuó en 2005 (que cayó a cerca de 60 mil hectáreas), el cual se explica por la entrada de la moniliasis al país y el subsecuente recambio del cultivo (Hernández-Gómez *et al.*, 2015). Desde entonces, la superficie cosechada ha disminuido de forma sostenida y para 2021 se reportó la cifra más baja de la historia reciente, con poco más de 50 mil hectáreas.

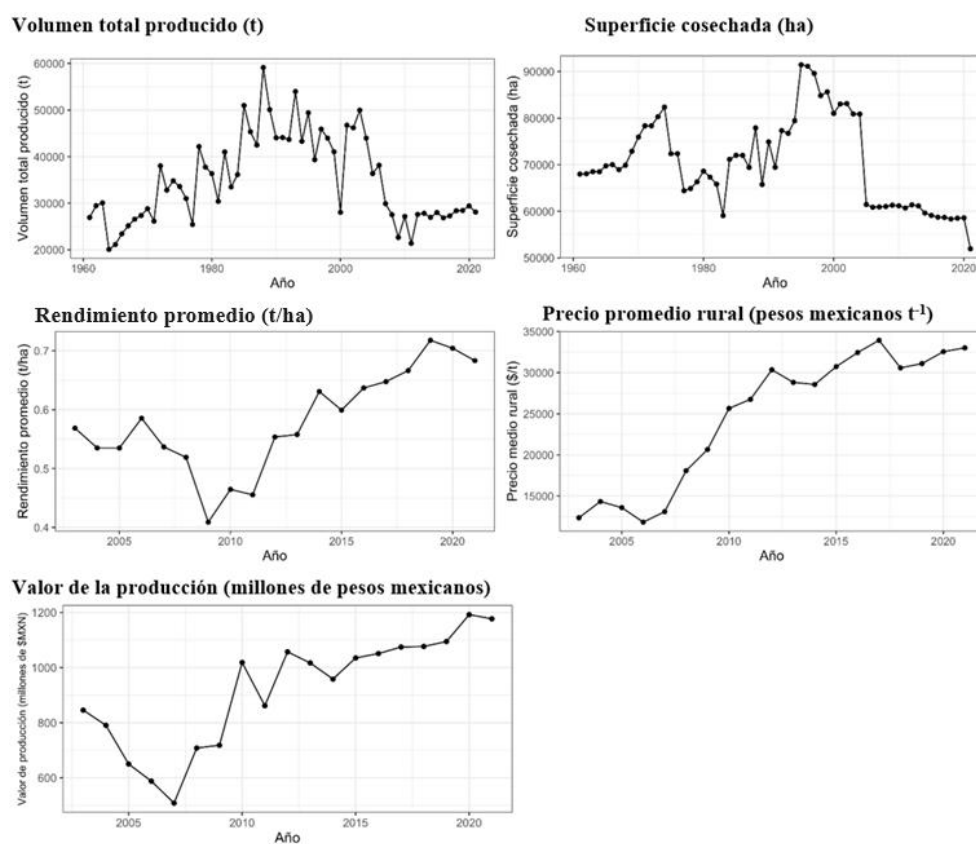


Figura 4. Estadísticas históricas de la producción de cacao en México.
Fuente: elaboración propia con datos de FAO (2022) y SIAP (2022).

El volumen de cacao producido en México ha seguido una trayectoria similar a la de la superficie cosechada, con fluctuaciones marcadas desde la década de 1960 (SIAP, 2022). Tras rondar las 30 mil toneladas a inicios de ese periodo, descendió a poco más de 20 mil en 1964, se recuperó gradualmente en los años siguientes y alcanzó su máximo histórico en 1987 con casi 60 mil toneladas. Desde entonces, ha mostrado variaciones significativas, con una caída sostenida desde 2003 (50 mil toneladas) hasta estabilizarse por debajo de las 30 mil toneladas a partir de 2007. Por su parte, el precio medio rural, el valor de la producción y el rendimiento también han experimentado caídas notables, seguidas de recuperaciones en distintos momentos, lo que evidencia la alta volatilidad del sector. No obstante, en términos relativos se ha incrementado el precio medio rural (excepto en 2018) y el valor de la producción.

En la Figura 5 se observa la evolución de los indicadores de la producción de cacao en México por estado. Se nota la dominancia en volumen y valor de la producción, así como en la producción y superficie cosechada en Tabasco (61.9% de producción y 65.8% de superficie en 2021) y Chiapas (37.0% de producción y 33.7% de superficie en 2021), aunado a la menor presencia de Guerrero y Oaxaca (este último sin registros después de 2007). Además, en otros estados existen árboles aislados y algunas plantaciones de dimensiones menores, como son: Nayarit, Veracruz y Yucatán, ya sea con fines experimentales, como relictos o en estado semi-silvestre (Aguilar-González, 2018; Ayala-Benítez, 2021; Bautista Morales *et al.*, 2021; Velasco Toro, 2003).

Se notan mejores rendimientos en Guerrero (1.2 t ha^{-1} en 2021), pero se observa un menor precio rural (\$11 840 en 2021). A la vez que, para Tabasco se notan menores variaciones en rendimiento y precio medio rural (en 2021 0.51 t ha^{-1} y \$17 409.92 respectivamente) que para Chiapas (en 2021 0.59 t ha^{-1} y \$37 158.85 respectivamente). Tabasco, aunque con mayor superficie y producción, es el estado que más ha reducido estos indicadores, tanto en cifras absolutas como en relativas.

Ciertamente las cifras de superficie reportadas por SIAP (2022), según el método empleado, podrían no corresponder con las obtenidas por otros estudios. Por lo que resulta necesario realizar investigaciones diversas (por ejemplo, de cambio de uso de suelo con insumos satelitales detallados) que no solo comprueben dichas variaciones,

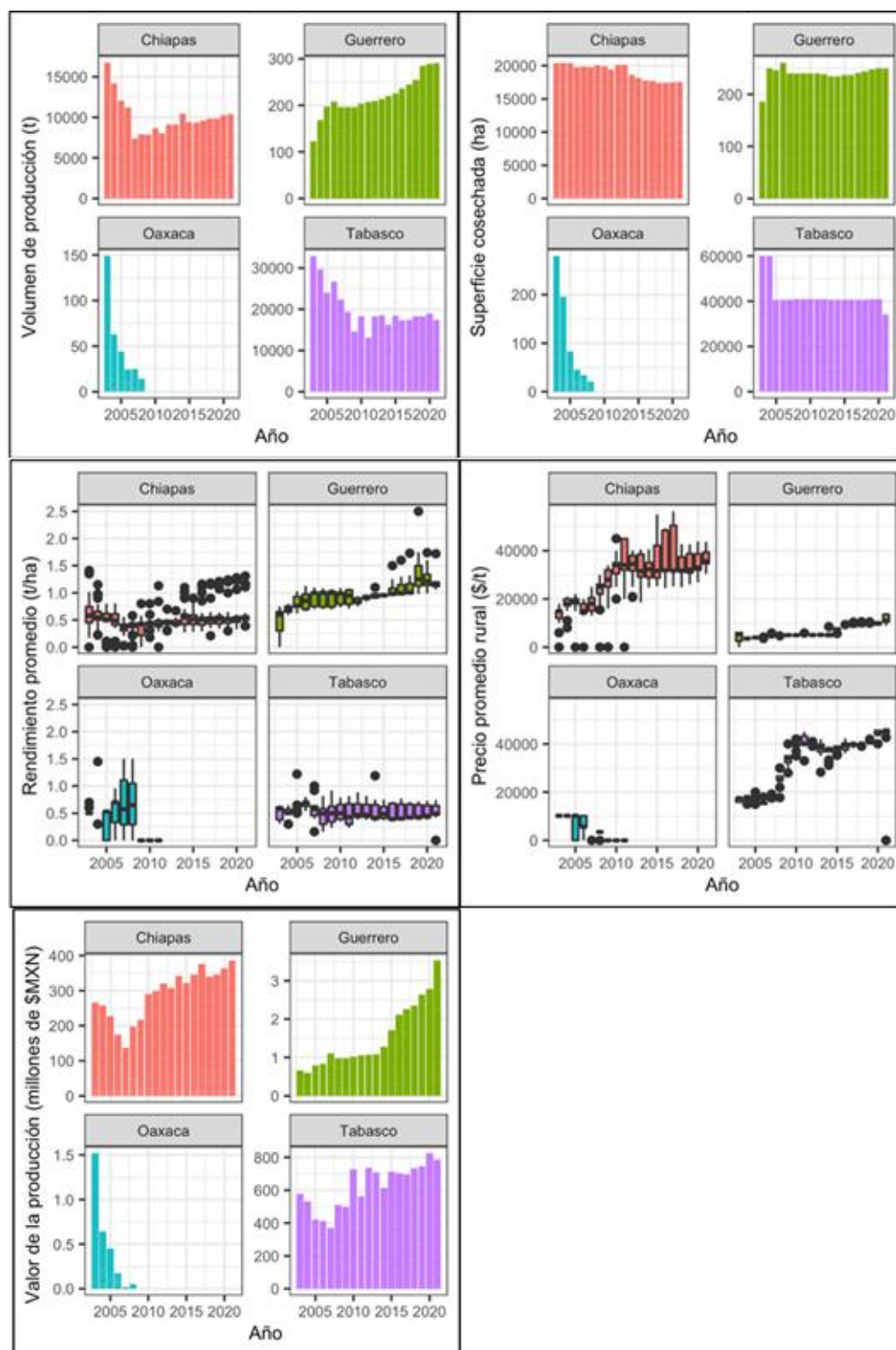


Figura 5. Estadísticas del cultivo de cacao en México por estado, de 2003 a 2021.
 Nota: Para la elaboración de los gráficos de rendimiento y precio promedio rural solo se consideró a las cifras de la modalidad hídrica de temporal y se filtró a las de riego.
 Fuente: elaboración propia con datos de SIAP (2022).

sino que también muestren las áreas donde ha sucedido el cambio, así como sus fuerzas motoras. Por ejemplo, para la región de la Chontalpa, Oporto-Peregrino *et al.* (2020) encontraron que de 2003 a 2016 esos cambios de uso de suelo (de SAF cacao por otros usos, principalmente para urbanización y pastizales para ganadería) mayormente se han producido en zonas de propiedad privada y en las zonas de mayor influencia de la expansión urbana.

En la Figura 6 se muestra la distribución municipal de la producción de cacao en los estados de Tabasco y Chiapas, que como se dijo, son los mayores estados productores en el país. Se notan 3 regiones bien diferenciadas: en el norte, la Chontalpa y Norte de Chiapas (con la mayor producción), en el este, la zona selvática de Chiapas (con la menor producción) y el Soconusco (con una producción intermedia).

El cacao en México

Actualmente se aceptan al menos diez grupos genéticos de cacao (incluido el cacao criollo, que se distribuye desde México hasta el norte de Sudamérica) y se reconoce que se domesticó alrededor de Iquitos, entre Perú y Ecuador, en torno a hace 3,600 años; de hecho, anteriormente se había propuesto que se había domesticado en Mesoamérica (Motamayor *et al.*, 2008). Sin embargo, los vestigios de las plantaciones más antiguas, intencionadas y organizadas, que incluso usaron sistemas de riego, se encuentran en Soconusco, particularmente en Rosario Izapa (Cilas & Bastide, 2020; Kaufman & Justeson, 2007).

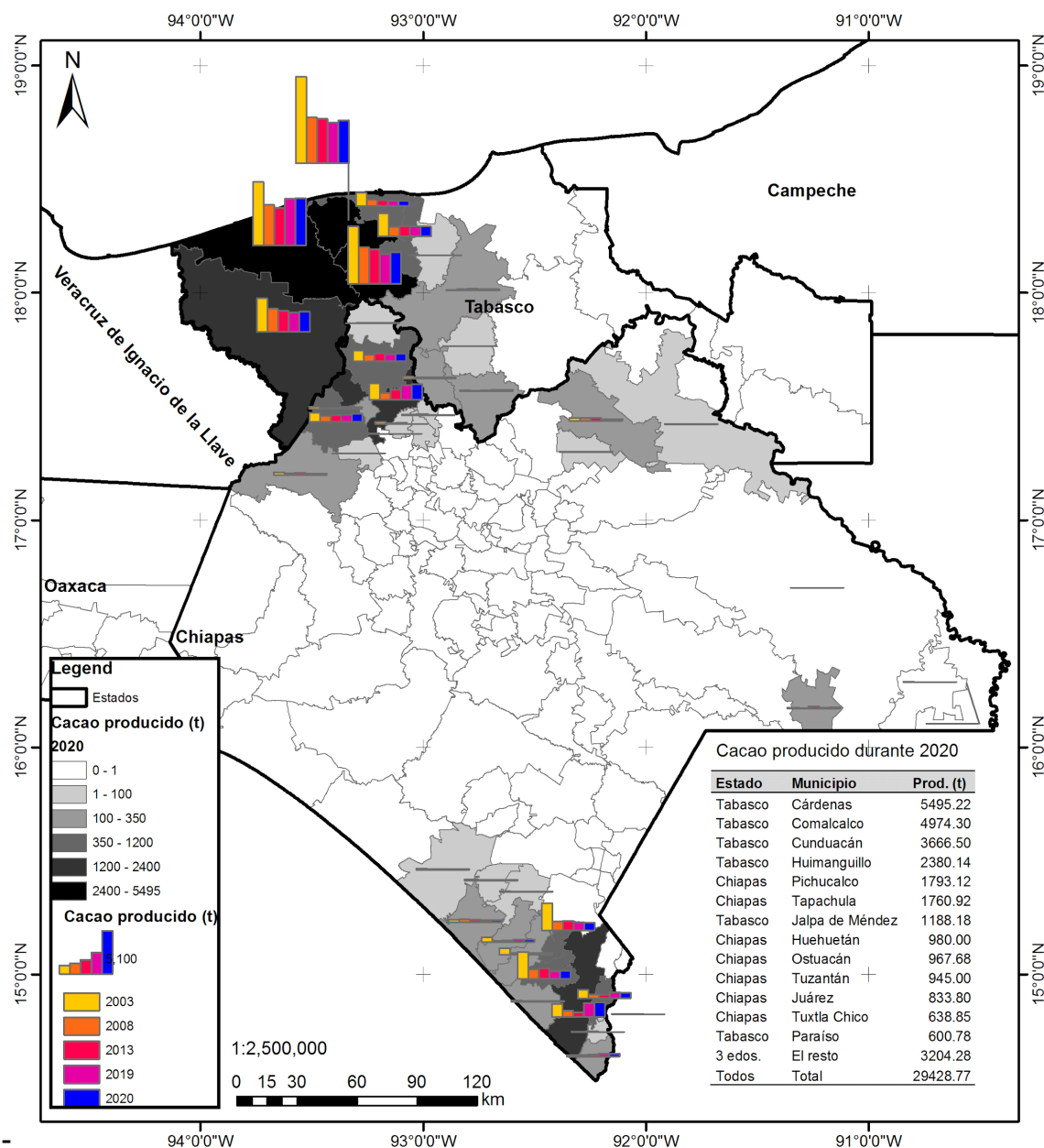


Figura 6. Distribución municipal de la producción de cacao en México durante 2020 y retrospectiva hasta 2003.

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2016) y SIAP (2022).

En Mesoamérica el cacao desempeñó múltiples papeles —monetario, medicinal, ritual y estimulante— desde tiempos remotos (con evidencias en algunos contextos costeros ya entre ca. 1900–1500 a.C., por los mokayas en Soconusco y los olmecas en sitios como Cerro Manatí, Veracruz respectivamente) hasta la época colonial; su consumo estuvo fuertemente ligado a las élites (nobles, comerciantes y sacerdotes), aunque también aparece en rituales y prácticas sociales que involucraron a otros grupos. Se

ingería de forma simple o combinado con ingredientes como maíz, vainilla, achiote o chile, en forma de bebida amarga y espumosa, conocida en fuentes históricas como “chocolatl” o “cacáuatl” (Attolini Lecón, 2011). Además, tal autora indica que “chocolate” podría derivar de un neologismo maya-náhuatl como “cikola:tl”: bebida de batidor (p. 7). Si bien el término “xocolatl” es comúnmente citado en la literatura popular como el nombre original de esta bebida, no parece ser el correcto. El uso y la importancia del cacao se transmitieron entre civilizaciones mesoamericanas, hasta los toltecas y mexicas, e incluso durante la colonia. Durante la época colonial, el cacao mesoamericano fue introducido en España y sus colonias, desde donde se difundió progresivamente al resto del mundo. Posteriormente (siglo XVII) Portugal promovió el cultivo y exportación del cacao brasileño, consolidando su presencia en sus dominios africanos y asiáticos (Dillinger *et al.*, 2000; Luis & Rojas, 1987; Nájera-Conrado, 2011; Powis *et al.*, 2008, 2011; Salas-Tornés & Hernández-Sánchez, 2015).

La calidad del cacao mexicano es alta, aunque no siempre valorada como tal. Según el contexto en que se producen y las variedades utilizadas se distinguen: el (neo)criollo, cacao convencional (grupos trinitarios y forasteros), fino de aroma (para mercados especializados) u orgánico (según su manejo). Incluso se ha dado la denominación de origen “cacao Grijalva” a la región respectiva (DOF, 2016), aunque con ciertas críticas si se considera la diversidad genética del cacao, dado que esa región no representa la mayor abundancia del cacao criollo; la cual más bien debería corresponder al Soconusco, pues en la primera predominan los tipos trinitarios, producto de la hibridación del cacao criollo y los forasteros (Tadeo-Sánchez, 2019; Tadeo-Sánchez & Tolentino-Martínez, 2020). Aun así, es de reconocerse dicha aportación a la parte legislativa, todo con el fin de incentivar la producción y consumo del grano. Además, el cacao y el chocolate forman parte de la identidad regional e incluso nacional de los mexicanos, y dependiendo de la región, siempre se encuentra en importancia a la par o por encima del maíz (Nájera-Conrado, 2011). A la vez que, tanto el grano como los productos que se elaboran de este, constituyen un invaluable patrimonio biocultural: en lo referente a la carga gastronómica, cultural e histórica que conllevan. Así, hablar de cacao es remontarnos a la propia historia de México y de sus

culturas progenitoras: desde la época precolombina hasta la actualidad; lo cual solo es atribuible a los cultivos tan arraigados a la cultura mexicana, como bien lo es el cacao.

Los dos programas del gobierno mexicano anterior (2018–2024), que han sido extendidos en el periodo actual y están dirigidos a los productores de cacao, son: Sembrando Vida (SV) que está adscrito a la Secretaría del Bienestar (DOF, 2021) y Producción para el Bienestar (PpB), adscrito a la Secretaría de Agricultura (DOF, 2022). SV se enfocó en el establecimiento y mantenimiento (durante 3 a 5 años) de cultivos agroforestales variados con enfoque agroecológico en zonas y estados prioritarios por su marginación y pobreza, ubicados principalmente en el Sur-Sureste de México; incluye asesoría técnica en Comunidades de Aprendizaje Campesino (CACs, grupos de 25 productores con 2.5 ha de terreno), la implementación de viveros y biofábricas, así como la entrega de apoyo económico por \$5 000 M.X.N. a mes vencido (DOF, 2021). Dentro del cual, también se han entregado plantas de cacao para el establecimiento y renovación de plantaciones.

En el marco del programa PpB, orientado a la entrega directa de subsidios a productores de cultivos estratégicos —como el maíz (*Zea mays* L.), el frijol (principalmente *Phaseolus vulgaris* L.), el trigo (*Triticum aestivum* L.), el café (*Coffea arabica* L.), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), el cacao (*T. cacao*), la miel de abeja (principalmente *Apis mellifera* L.), entre otros—, el Cuadro 2 y la Figura 7 presentan estadísticas correspondientes al rubro cacao por entidad federativa durante 2021. Se observa que se otorgaron un total de \$106 137.8 millones de pesos mexicanos (\$ M.X.N.) a productores de cacao. Lo que representó un 0.826% del total otorgado por PpB; en Tabasco se otorgaron 10 298 apoyos (60.2%) y en Chiapas 5 901 apoyos (34.5%). En tanto que, otros estados también figuraron, aunque en mucho menor medida, algunos pese a no tener registro oficial de producción de cacao en el SIAP (2022), a excepción de Oaxaca.

Cuadro 2. Estadísticas del rubro cacao del Programa Producción para el Bienestar por estado durante 2021.

Estado	n	Superficie apoyada (ha)			Monto (en millones de \$MXN)
		Media	Desviación estándar	Suma	
Chiapas	5 901	1.42	0.94	8 375.13	36 586.2
Guerrero	150	1.33	0.86	198.83	930.0
Jalisco	8	0.94	0.62	7.55	49.6
Oaxaca	753	1.10	0.74	829.67	4 668.6
Puebla	1	0.80	-	0.80	6.2
Tabasco	10 298	1.28	1.02	13 172.52	63 847.6
Veracruz	8	0.85	0.36	6.83	49.6
Total	17 119	1.32	0.98	22 591.33	106 137.8
(cacao)	(0.95%)			(0.392%)	(0.826%)
Total (PpB)	1 804 102			5 766 504.6	12 852 522.3

n: número de apoyos otorgados. Fuente: elaboración propia con datos de (Agricultura, 2022a).

El programa PpB busca incentivar la producción —preferentemente agroecológica— de los cultivos estratégicos mediante asesoría técnica especializada, a través de la Estrategia de Acompañamiento Técnico (EAT), la cual es coordinada, capacitada y financiada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). El apoyo consiste en una transferencia única anual de \$6,200 M.X.N., sin distinción por tamaño de parcela, con enfoque en pequeños y medianos productores. Cabe señalar que solo se permite un rubro por productor, y que el cacao y la miel de abeja fueron incorporados al programa hasta 2021, aunque este inició en 2019, en paralelo con el sexenio del presidente en turno de aquel entonces. Si bien es cierto que estos y otros programas sociales han inyectado capital y brindado asesoría en el campo mexicano, también presentan impactos limitados y ciertas inconsistencias al no atender problemas relevantes como la comercialización, al punto que, la situación de pobreza de la población objetivo aun no mejora de manera significativa (Martínez Espinoza, 2023).

Otro dato para resaltar es la superficie apoyada de 22 583 ha, que solo representaría un 40% de las estimaciones de superficie sembrada según lo reportado por las estadísticas oficiales (SIAP, 2022). El valor medio nacional de 1.32 ha por productor, confirma la predominancia de pequeños y medianos productores en este sistema. Resulta importante la inclusión de estos productores en el PpB, pues además del

apoyo se les proporcionó asesoría técnica mediante la EAT, que los capacitó en la adopción de prácticas para la transición agroecológica de sus cultivos, además de que otorgaron incentivos en especie (como bolsa para planta). Lo cual resulta indispensable para hacer a estos sistemas más resilientes a los cambios socioambientales.

También debe agregarse que el tamaño de la parcela apoyada varía proporcionalmente con el número de apoyos otorgados por municipio: mayor variabilidad en los primeros lugares.

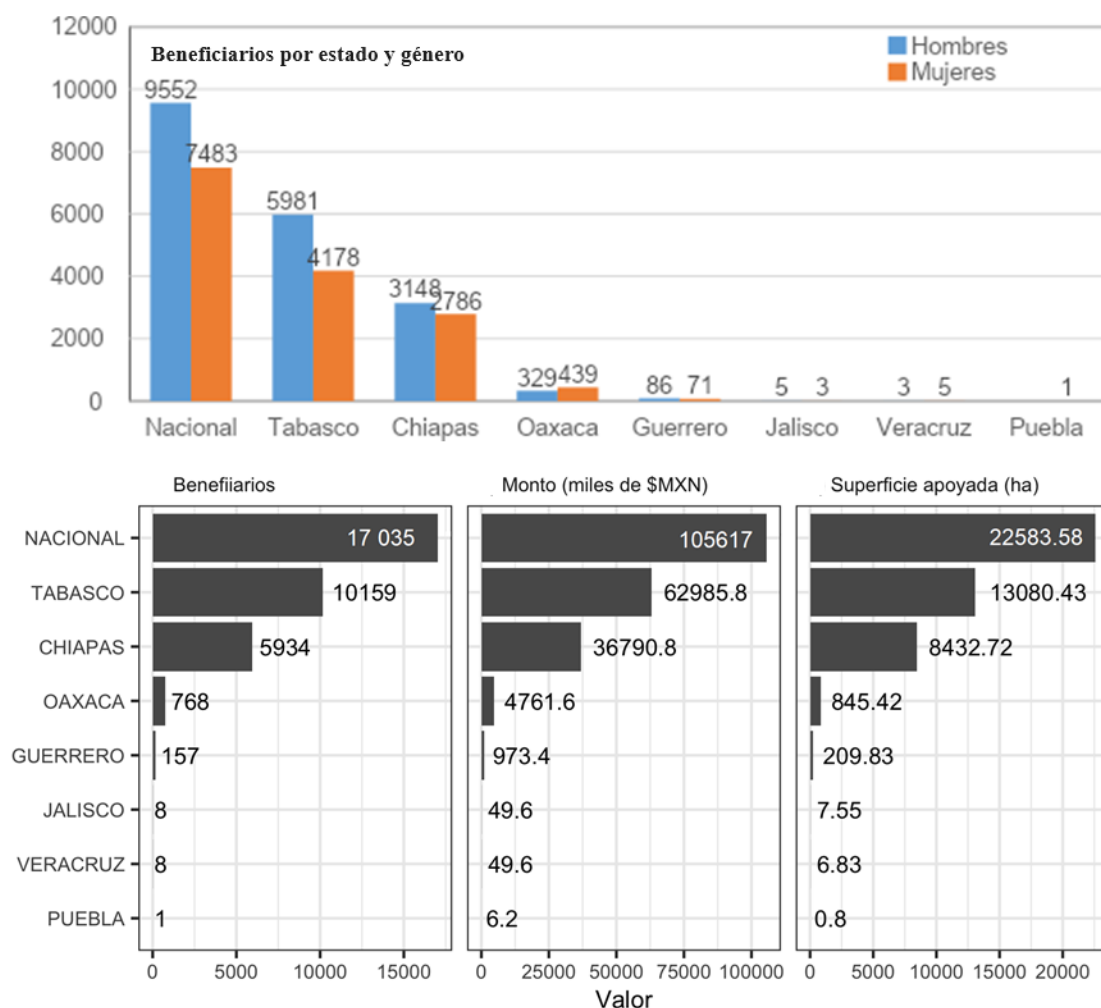


Figura 7. Resumen a nivel de estado de las estadísticas sobre los beneficiarios del Programa producción para el Bienestar de la SADER en 2021 por el cultivo de cacao.
Fuente: elaboración propia con datos de Agricultura (2022a).

Los tres municipios que recibieron mayor número de apoyos, que también correspondieron a Tabasco, fueron Comalcalco con 4 444, Cunduacán con 2 380 y Cárdenas con 2 106, seguidos de los municipios chiapanecos Huixtla con 785 y Pichucalco con 771; le siguen los municipios tabasqueños Jalpa de Méndez con 622 y Huimanguillo con 607, entre otros.

Si bien la producción de cacao en México no es tan relevante en el contexto mundial, su producción en el país está ligada a una larga historia, cultura y saberes —tanto de los SAF en que se produce, como de su elaboración artesanal para su consumo en diversas formas—, que hacen de este cultivo un patrimonio biocultural del cual dependen miles de familias campesinas, principalmente en algunas regiones de los estados de Tabasco y Chiapas. Por lo que se hace necesario definir estrategias y políticas que contribuyan a la adaptación de los productores ante las previsiones de impactos adversos por el CC.

3.4.2. Clasificación de los estudios

En esta sección se mencionan brevemente los temas de cada temática y en las secciones posteriores se profundizan y discuten los estudios más relevantes. En total resultaron 638 documentos de las diferentes fuentes (búsquedas, citas de otros documentos y recomendaciones), de los cuales 277 no se ajustaban al objetivo de la revisión (de estos 7 no fueron localizados en línea, 17 fueron de otra área de estudio y los demás tratan de otras temáticas), 112 estaban repetidos, resultando en 249 documentos tras la depuración (Cuadro 3).

Cuadro 3. Fuentes y gestión de los documentos de la revisión de literatura.

Fuente / fase de trabajo	Citas de otros documentos	Dial-net*	Fisher-Ortiz <i>et al.</i> (2022)	RE	Redalyc*	Scielo*	Scopus*	n
Documentos sin filtrar	7	95	249	40	100 ⁺	86	61	638
Documentos filtrados**	7	56	136	40	33	48	41	361
Documentos repetidos								112
Documentos elegidos								249

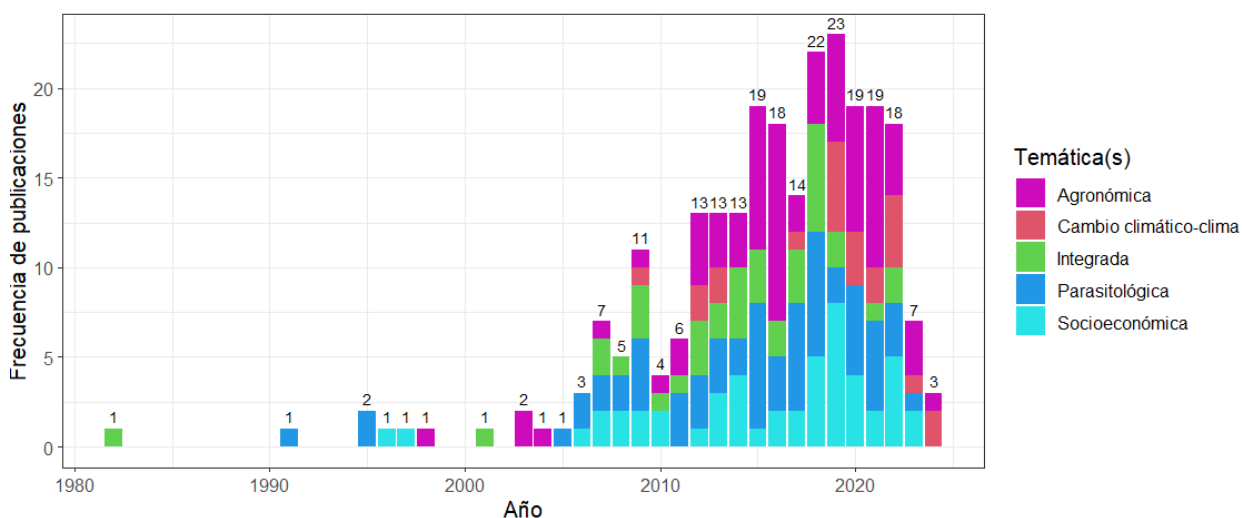
RE: Documentos recomendados por expertos. *Búsqueda: ((cacao OR cocoa) AND (Mexic* OR Tabasco OR Chiapas OR Guerrero OR Oaxaca)). *En este caso arrojaba una búsqueda de muchos más estudios, pero eran irrelevantes, por lo que solo se revisaron los primeros 100 resultados (según el ajuste a la búsqueda). **Para el fin de la presente revisión. n: total de documentos por fase.

Se nota que la fuente principal fue Fisher-Ortiz *et al.* (2022) debido al análisis tan amplio que realizó (aunque de este solo se encontraron 136 documentos relevantes), la siguientes fuentes más importantes fueron Dialnet y Scielo, con 56 y 48 escritos de manera respectiva tras el filtrado, aunque muchos registros entre fuentes se repetían. De los 249 documentos totales, en la temática agronómica se clasificaron 74, 23 en cambio climático-clima, 38 en integrada, 50 en socioeconómica y 64 en parasitológica. No siempre se pudo hacer una delimitación clara ente ellas (nótese que parasitológica en sí es un subconjunto de agronómica e integrada es algo ambiguo de clasificar).

En la Figura 8 se notan las palabras más frecuentes de los títulos. Tienen mucho sentido las tres primeras (cacao, México y *Theobroma*). Pero luego se encuentra la

[illegible]

En la Figura 9 se muestra la tendencia temporal de las publicaciones según la temática. En general no se nota un patrón que indique diferencias temporales entre ellas. La mayoría de los registros se encuentra entre 2005 a 2022.



38

La Figura 10 y la Figura 11 deben ser interpretadas de manera conjunta debido a su naturaleza complementaria.

Agronómica. Los documentos dentro de esta temática —que agrupa el mayor número de registros (74) y que, junto con lo parasitológico, abarcan el 55.4 % del total— se centran en aspectos técnicos del manejo del cacao: manejo integrado, manejo agroecológico, mejora genética (contra enfermedades), mejora del rendimiento y la calidad, control de plagas y enfermedades, así como temas relacionados con la fertilidad del suelo y prácticas agrícolas alternativas. El tema principal más frecuente fue el mejoramiento genético (10 registros), seguido por el control biológico de enfermedades (8) y el control orgánico de enfermedades (6). Varios de estos estudios permanecen en el nivel de laboratorio. Como tema secundario, destaca la resistencia genética a enfermedades como el más recurrente (8 registros), lo cual sugiere un interés científico creciente en el fortalecimiento de la resistencia genética del cacao y la mejora de la calidad del grano.

Cambio climático-clima. En esta temática se aborda la influencia del CC en el cultivo del cacao, lo que va desde la captura de carbono hasta proyecciones climáticas y respuestas de las plantas al microclima (y su modificación mediante manejo agroforestal) y al CC. El tema principal más frecuente es proyecciones ante escenarios de CC (tanto para el cacao individualmente, el cacao y otros cultivos, a nivel de SAF y de algunas de sus enfermedades) con 7 registros, lo cual indica un interés en advertir el impacto del CC y hacer recomendaciones ante tal panorama. También destacan la respuesta al microclima (ecofisiología) y la fisiología del cacao frente al CC, abordadas mediante experimentos semicontrolados, con un registro en cada caso. Cabe señalar que la captura de carbono (cuantificación de la mitigación del CC) es un tema de interés creciente, tratado desde diversos enfoques y componentes del SAF. Incluyendo, por ejemplo: carbono en el suelo, en el cacao o en los árboles de sombra. En estos últimos casos, es común que el tema secundario incluya también aspectos ecológicos y de diversidad biológica del SAF. Varios estudios incorporan este último componente, sin embargo, si no se relacionaban con las temáticas principales, no fueron considerados en la clasificación.

Integrada. Esta temática abarca un enfoque multidimensional, en el cual se combinan factores agronómicos, socioeconómicos y ambientales. Los estudios incluidos bajo esta categoría tienden a integrar varias dimensiones. Sobre todo en el ámbito de evaluación de la sostenibilidad y el análisis integral del cultivo (o la comercialización). Debido a lo anterior es que el tema más frecuente fue problemática general (11 registros) y le siguieron en frecuencia: captura de carbono en árboles (3) y diagnóstico socioeconómico y fitosanitario (2). El tema secundario de alternativas aparece en 9 ocasiones (y se dio dentro de los estudios que abordan la problemática general), lo que apunta a que existe un buen marco de propuestas o nuevas estrategias para mejorar la situación del cultivo en el país.

Parasitológica. Se enfoca en el estudio de plagas y enfermedades que afectan al cacao, incluyendo —sobre todo— la identificación, así como el manejo y control de estos agentes. El tema principal más frecuente es la caracterización de enfermedades (18 registros), la mayoría de los cuales se centra en la moniliasis, y en menor medida en la mancha negra y otras enfermedades. Le sigue la caracterización de plagas (12 registros), sin dominancia por una especie en particular, excepto por *Maconellicoccus hirsutus* (Green) y los barrenadores *Xyleborus volvulus* (Fabricius) y *Xyleborus ferrugineus* (Fabricius). Lo anterior se explica por los problemas ocasionados en el pasado —como *Xyleborus* y la moniliasis— y por las amenazas que representan actualmente estos agentes para el cacao, como la plaga cuarentenaria generalista *M. hirsutus* y la moniliasis (Hernández-Lara *et al.*, 2020; Ramírez González, 2008).



Figura 10. Frecuencia de temas principales por temática investigada.

Fuente: elaboración propia con base en esta revisión.

Notas: cc = cambio climático; mi = manejo integrado.

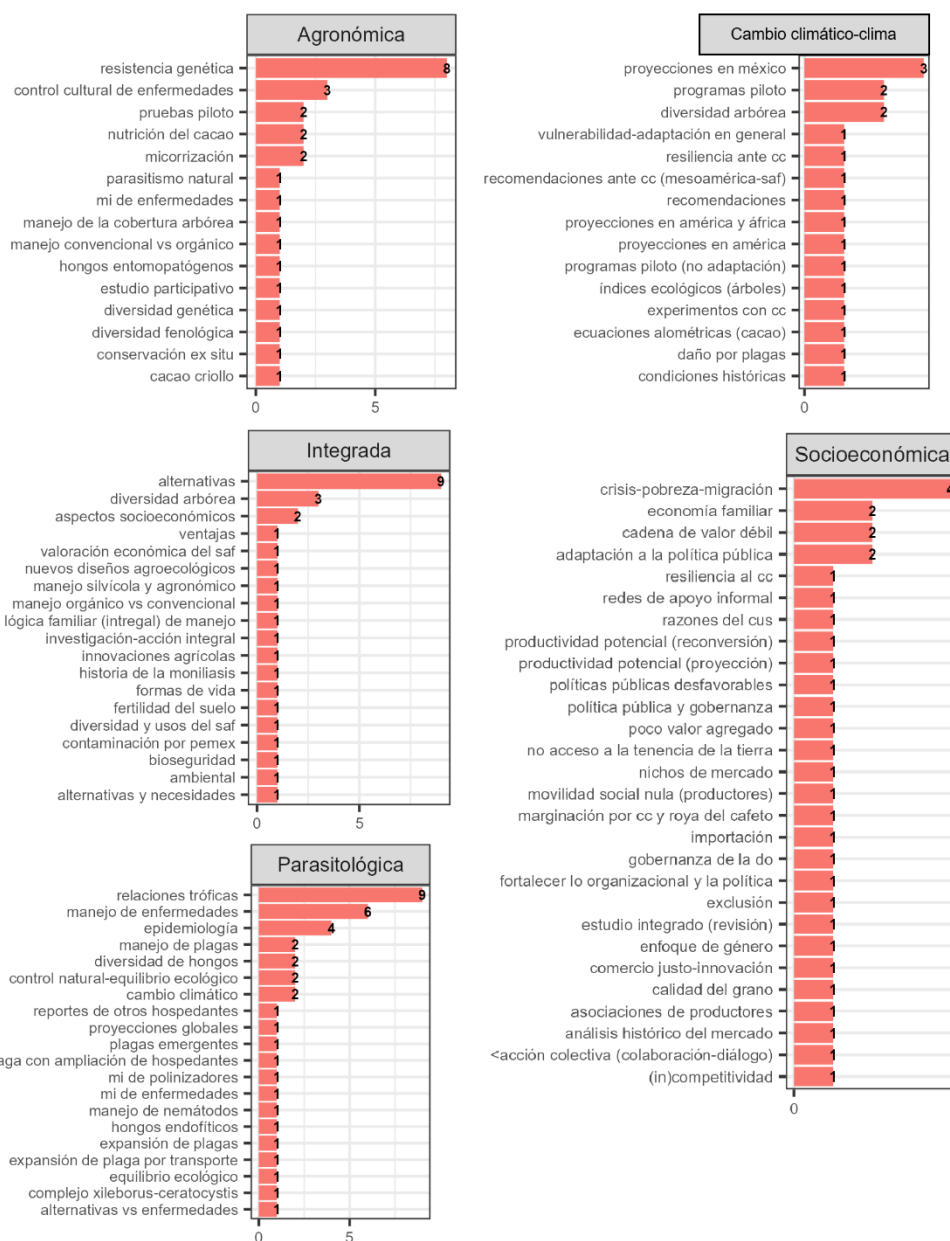


Figura 11. Frecuencia de temas secundarios (que describen de forma alternativa o complementaria al tema principal) por temática investigada.

Fuente: elaboración propia con base en esta revisión

Nota: eec = escenarios de cambio climático, cc = cambio climático, mi = manejo integrado.

Como tema secundario, predominan las relaciones tróficas (9 registros), sobre todo en estudios poblacionales de insectos y arañas, dado que estas últimas pueden contribuir al control de insectos plaga (Moreno-Mendoza *et al.*, 2012). Esto último refleja un interés por comprender las interacciones ecológicas del SAF, las cuales forman parte

de una de las prácticas agroecológicas más comunes: el control biológico, que se promueve mediante el fomento de relaciones tróficas —como el uso de enemigos naturales o agentes antagonistas— que regulen las poblaciones de organismos perjudiciales dentro del SAF. Le siguen, como temas secundarios, el manejo (6 registros) y la epidemiología de enfermedades (4 registros).

Socioeconómica. Se enfoca en los factores sociales y económicos que afectan a los productores de cacao, tales como las cadenas de valor cortas, la pobreza y las políticas públicas. El tema principal más recurrente es lo organizacional (siete registros) y le siguen documentos que tratan de la denominación de origen (DO; cuatro registros) “cacao Grijalva”, lo cual indica la importancia de la organización de los productores y el valor de la DO como estrategia de diferenciación (que en la práctica no opera como tal o no se ven beneficios a la fecha); salud humana también es frecuente (tres casos) y hace referencia a la leishmaniasis cutánea (que se ha asociado a SAF cacao). La “triada” de crisis-pobreza-migración aparece con cuatro registros: la crisis económica del campo produce pobreza, misma que a su vez produce una migración sistémica del territorio. Limitaciones que subrayan las dificultades sociales y económicas que enfrentan los productores en general (ya que estas son generales para el campo mexicano). Las cuales están fuera de su alcance y son más bien de tipo estructural (Martínez Espinoza, 2023). Tales condiciones de crisis también fomentan condiciones de marginación y delincuencia.

3.6. Conclusiones

El cultivo de cacao en México, profundamente arraigado en su legado biocultural, enfrenta un conjunto interconectado de limitantes climáticas, parasitológicas, agronómicas y socioeconómicas que comprometen su sostenibilidad y resiliencia. Esta revisión sistematizada revela una concentración de esfuerzos científicos en torno al manejo agronómico (incluyendo el fitosanitario) del cultivo, mientras que las dimensiones climáticas y estructurales (como la organización productiva o la vulnerabilidad territorial) han sido abordadas con menor frecuencia relativa. La alta recurrencia de temas como el mejoramiento genético, la caracterización de enfermedades, entre otros, revelan un interés científico en abordar mayormente

cuestiones productivas más que las organizacionales, lo cual puede resultar contraproducente ante el CC. Este estudio y el interés creciente general ofrecen un punto de partida para investigaciones futuras que aborden de forma más holística la complejidad del sistema cacaotero mexicano dentro de cada limitante y sus interacciones para proponer estrategias de adaptación al CC.

3.7. Literatura citada

- Agricultura. (2022). *Buscador de beneficiarios producción para el bienestar: Datos 2021. Registro histórico*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.suri.agricultura.gob.mx:8017/buscadorBeneficiario>
- Aguilar-González, L. (2018). El cacao (*Theobroma cacao* L.) en Nayarit como propuesta de agroturismo. *Agro Productividad*, 11(8), 89–93.
- Arias González, J. (2014). Un vertiginoso viaje etnohistórico dentro de los “imaginarios alimentarios” en el simbolismo del cacao en México. *An. Antrop.*, 48(1), 79–95. [https://doi.org/10.1016/S0185-1225\(14\)70490-4](https://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70490-4)
- Ayala-Benítez, D. O. (2021). La microhistoria del cacao en Jalcomulco, Veracruz: Participación social para un aprovechamiento sostenible desde la revalorización de saberes, recursos y capacidades locales. *Interconectando Saberes*, 6(12), 185–191. <https://doi.org/10.25009/is.v0i12.2717>
- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (Eds.). (2016). *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Barradas Miranda, P., Baca del Moral, J., & Cuevas Reyes, V. (2019). Metodologías de políticas públicas con base en evidencias y el enfoque en la agricultura multifuncional. En M. A. Sámano R. & J. Baca del Moral (Coords.), *Políticas públicas para la agricultura multifuncional II* (1.^a ed., pp. 13–32). Universidad Autónoma Chapingo.
- Bautista Morales, R., Alarcón Pulido, S. A., García Muñoz, S. A., Piña Ramírez, F. J., & Ortega Rodríguez, A. (2021). Propuesta para el establecimiento del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la zona norte del estado de Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 9(1), 181–191. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v9i1.350>
- Benjamin, C. S., Dias, L. A. S., Martins, S. C. V., Aucique-Perez, C. E., & Rosmaninho, L. B. C. (2025). Unlocking the potential of cacao yield with full sun cultivation. *Scientific Reports*, 15(1), 4368. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87793-z>
- Camacho-Gómez, M., & Mejía-Rocha, M. I. (2018). Turismo gastronómico del cacao y el chocolate, tendencias latinoamericanas. *Gran Tour: Revista de Investigaciones Turísticas*, 18, 58–76.
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A. T. y Díaz-Echeverría, V. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias*

- Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269–284.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- Castro-Nunez, A., Charry, A., Castro-Llanos, F., Sylvester, J., & Bax, V. (2020). Reducing deforestation through value chain interventions in countries emerging from conflict: The case of the Colombian cocoa sector. *Applied Geography*, 123, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102280>
- Cilas, C., & Bastide, P. (2020). Challenges to cocoa production in the face of climate change and the spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10(9), 1232. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- De la Cruz-Landero, E., Córdova-Avalos, V., García-López, E., Bucio-Galindo, A., & Jaramillo-Villanueva, J. L. (2015). Manejo agronómico y caracterización socioeconómica del cacao en Comalcalco, Tabasco. *Foresta Veracruzana*, 17(1), 33–40. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49742125005>
- Díaz-Valderrama, J. R., Leiva-Espinoza, S. T., & Aime, M. C. (2020). The history of cacao and its diseases in the Americas. *Phytopathology*, 110(10), 1604–1619. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0178-RVW>
- Dillinger, T. L., Barriga, P., Escá, S., Jimenez, M., Salazar Lowe, D., & Grivetti, L. E. (2000). Food of the gods: Cure for humanity? A cultural history of the medicinal and ritual use of chocolate. *The Journal of Nutrition*, 130(8), 2057S–2072S. <https://doi.org/10.1093/jn/130.8.2057S>
- DOF. (2016, 11 de agosto). Declaración general de protección de la denominación de origen “Cacao Grijalva”. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5449991&fecha=11/08/2016
- DOF. (2021, 31 de diciembre). Acuerdo por el que se emiten las reglas de operación del programa Sembrando Vida, para el ejercicio fiscal 2022. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639899&fecha=31/12/2021
- DOF. (2022, 18 de marzo). Acuerdo por el que se dan a conocer las reglas de operación del programa Producción para el Bienestar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural para el ejercicio fiscal 2022. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5646225&fecha=18/03/2022
- Espinosa-García, J. A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Inurreta-Aguirre, H. D., & Góngora-González, S. F. (2015). Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1052–1063. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000501052
- Estrada, A., & Coates-Estrada, R. (2005). Diversity of neotropical migratory landbird species assemblages in forest fragments and man-made vegetation in Los Tuxtlas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 14(7), 1719–1734. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-0696-x>
- FAO. (2022). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/>

- Fisher-Ortíz, R. A., Rodríguez-Robles, U., Aldasoro-Maya, E. M., Soto-Pinto, M. L., & Chávez-García, E. (2022). Sistemas agroforestales de cacao y resiliencia: Factores potenciales ante el cambio climático en México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2), 1–25. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4121>
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillen, G., Garrido-Ramírez, E. R., & Romero-Nápoles, J. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 232–246. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61242145008>
- Hernández-Gómez, E., López-M., J., Solís-B., L., Ramírez-A., M. A., & Garibay-G., C. C. (2017). Participación de la mujer en el cultivo de cacao en Chiapas, México. En J. Martínez Herrera, M. Á. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Seguridad alimentaria: Aportaciones científicas y agroalimentarias* (1.^a ed., pp. 482–485). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Hernández-Lara, P. U., Ramírez-Guillermo, M. Á., & Ramos-Hernández, E. (2020). Ciclo biológico de la cochinilla rosada del hibisco (*Maconellicoccus hirsutus*) (Green) (Hemiptera: Pseudococcidae) en plántulas de cacao. *Ciencia e Innovación*, 3(2), 395–402.
- Hutchins, A., Tamargo, A., Bailey, C., & Kim, Y. (2015). *Assessment of climate change impacts on cocoa production and approaches to adaptation and mitigation: A contextual view of Ghana and Costa Rica*. World Cocoa Foundation. <https://elliott.gwu.edu/sites/g/files/zaxdzs2141/f/World%20Cocoa%20Foundation.pdf>
- ICCO. (2012). *The world cocoa economy: Past and present*. International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/EX-146-7-World-Cocoa-Economy-2012-edited-1.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016). *Marco geoestadístico estatal. Escala 1:4 000 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825217341>
- Kaufman, T., & Justeson, J. (2007). The history of the word for cacao in ancient Mesoamerica. *Ancient Mesoamerica*, 18(2), 193–237. <https://doi.org/10.1017/S0956536107000211>
- Krishnamurthy, L. R., & Krishnamurthy, S. (2016). Family agriculture for bottom-up rural development: A case study of the indigenous Mayan population in the Mexican peninsular. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 4(1), 29–39.
- López-Cruz, A., Soto-Pinto, L., Salgado-Mora, M. G., & Huerta-Palacios, G. (2021). Simplification of the structure and diversity of cocoa agroforests does not increase yield nor influence frosty pod rot in El Soconusco, Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 95(1), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00574-7>

- Luis, J., & Rojas, D. E. (1987). La moneda indígena en México. *Revista Española de Antropología Americana*, 17, 75–88.
- Marelli, J. P., Guest, D. I., Bailey, B. A., Evans, H. C., Brown, J. K., Junaid, M., Barreto, R. W., Lisboa, D. O., & Puig, A. S. (2019). Chocolate under threat from old and new cacao diseases. *Phytopathology*, 109(8), 1331–1343. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-18-0477-RVW>
- Martínez Espinoza, M. I. (2023). Política social y pobreza en la 4T. *Revista Mexicana de Sociología*, 85(núm. especial), 41–69.
- Moreno-Calles, A. I., Toledo, V. M., & Casas, A. (2013). Los sistemas agroforestales tradicionales de México: Una aproximación biocultural. *Botanical Sciences*, 91(4), 375–398. <https://doi.org/10.17129/botsci.2013.91.4.1>
- Moreno-Mendoza, S. D., Ibarra-Núñez, G., Chamé-Vázquez, E. R., & Valle-Mora, F. J. (2012). Gama de presas capturadas por cuatro especies de arañas tejedoras (Arachnida: Araneae) en un agroecosistema de cacao en Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15, 457–469.
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., da Silva e Mota, J. W., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). *PLoS ONE*, 3(10), e3311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Motamayor, J. C., Risterucci, A. M., Lopez, P. A., Ortiz, C. F., Moreno, A., & Lanaud, C. (2002). Cacao domestication I: The origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, 89(5), 380–386. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800156>
- Nájera-Conrado, M. I. (2011). El mono y el cacao: La búsqueda de un mito a través de los relieves del grupo de la serie inicial de Chichén Itzá. *Estudios de Cultura Maya*, 39, 135–172.
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15, 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Notaro, M., Deheuvels, O., & Gary, C. (2022). Participative design of the spatial and temporal development of improved cocoa agroforestry systems for yield and biodiversity. *European Journal of Agronomy*, 132, 126395. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126395>
- Oporto-Peregrino, S., Hidalgo-Mihart, M. G., Collado-Torres, R. A., Castro-Luna, A. A., Gama-Campillo, L. M., & Arriaga-Weiss, S. L. (2020). Effects of land tenure and urbanization on the change of land use of cacao (*Theobroma cacao*) agroforestry systems in southeast Mexico. *Agroforestry Systems*, 94(3), 881–891. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00453-w>
- Ortega Andrade, S., Páez, G. T., Fera, T. P., & Muñoz, J. (2017). Climate change and the risk of spread of the fungus from the high mortality of *Theobroma cacao* in Latin America. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 30–40. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1266072>

- Pérez-Flores, J., Córdova-Ávalos, V., Chávez-García, E., Hernández-Maldonado, E., Córdova-Lázaro, C. E., Córdova-Ávalos, A., Hinojosa-Cuéllar, J. A., & Pérez-Flores, J. (2020). Bebidas prehispánicas y novohispánicas de cacao y maíz en la Chontalpa, Tabasco. *Agro Productividad*, 13(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.v13i7.1605>
- Powis, T. G., Cyphers, A., Gaikwad, N. W., Grivetti, L., & Cheong, K. (2011). Cacao use and the San Lorenzo Olmec. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(21), 8595–8600. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100620108>
- Powis, T. G., Hurst, W. J., Rodríguez, M. del C., Ortiz C., P., Blake, M., Cheetham, D., Coe, M. D., & Hodgson, J. G. (2008). The origins of cacao use in Mesoamerica. *Mexicon*, 30(2), 35–38. <https://www.jstor.org/stable/23759545>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Ramírez González, S. I. (2008). La moniliasis un desafío para lograr la sostenibilidad del sistema cacao en México. *Tecnología en Marcha*, 21(1), 97–110.
- Salas-Tornés, J., & Hernández-Sánchez, L. Y. (2015). Cacao, una aportación de México al mundo. *Revista Ciencia*, 66(3), 32–39.
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabral, L. del C., Martínez-Sánchez, J. L., Sánchez-Hernández, R., & Valdés-Velarde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Sánchez-Díaz, B., Mata-Zayas, E., Gama, L., Rullan-Silva, C., Vidal-García, F., & Rincón-Ramírez, J. (2019). Use of different spectral vegetation indices to determine the presence of mantled howler monkeys (*Alouatta palliata* G.) on cocoa agrosystems (*Theobroma cacao* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(1), 1279–1297. https://doi.org/10.15666/aeer/1701_12791297
- SIAP. (2022). *Datos abiertos: Estadística de producción agrícola*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-81408>
- Silge, J., & Robinson, D. (2017). *Text mining with R: A tidy approach* (1.^a ed.). O'Reilly. <https://www.tidytextmining.com/>
- Silva Pérez, R. (2010). Multifuncionalidad agraria y territorio: Algunas reflexiones y propuestas de análisis. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales (EURE)*, 36(109), 5–33. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612010000300001>
- Tadeo-Sánchez, J. M. (2019). *El sistema agroalimentario localizado (SIAL) del cacao Grijalva de Tabasco* [Tesis de licenciatura, Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Universitario Digital. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000795356
- Tadeo-Sánchez, J. M., & Tolentino-Martínez, J. M. (2020). El cacao Grijalva de Tabasco: Dinámicas socio territoriales en torno a su producción. *Estudios*

- Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(56). <https://doi.org/10.24836/es.v30i56.1002>
- Valenzuela-Córdova, B., Mata-Zayas, E. E., Pacheco-Figueroa, C. J., Chávez-Gordillo, E. J., Díaz-López, H. M., Gama, L., & Valdez-Leal, J. D. (2015). Potencial ecoturístico del agrosistema cacao (*Theobroma cacao* L.) con monos saraguatos (*Alouatta palliata* Gray) en la Chontalpa, Tabasco. *Agro Productividad*, 8(5), 3–10.
- Vázquez-Navarrete, C. J., & Rahman, S. (2014). Productivity management analysis of cacao agro-food system in Tabasco, Mexico: An application of the “fitness” approach. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, 2(2), 49–64. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.168578>
- Velasco Toro, J. (2003). Cosmovisión y deidades prehispánicas de la tierra y el agua en los pueblos del Papaloapan veracruzano. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, 25, 5–17. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/363>

CAPÍTULO 4. LIMITANTES CLIMÁTICAS, PARASITOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS DEL CULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L.) EN MÉXICO. FASE II: REVISIÓN⁴

4.1. Resumen

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.), ha estado vinculado históricamente a varias culturas mesoamericanas asentadas en lo que hoy es México, sin embargo, enfrenta limitantes de diferente índole que restringen su producción y persistencia. Esta revisión buscó analizar el estado actual del conocimiento sobre estas limitantes (climáticas, parasitológicas y socioeconómicas), sus interacciones y alternativas de mejora, contrastándolas internacionalmente, mediante un estado del arte basado en los documentos que se recuperaron en una revisión sistematizada en torno a la problemática referida (el capítulo previo). Todo ello para la proposición de estrategias (agronómicas y sociales) de mejora y adaptación al cambio climático (CC). Para lo cual, cada temática (limitantes y sus interacciones) fueron discutidas en profundidad, al tiempo que se elaboraron diagramas de flujo y síntesis temáticas para una mejor interpretación. Se encontró que el CC afecta a la fisiología del cacao, así como a su patosistema, y en el futuro puede afectar aún más. Si bien la moniliasis (*Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny) continúa siendo el agente parasitológico preponderante en el cultivo de cacao, se han documentado nuevas plagas y enfermedades que han ampliado su rango de distribución o de hospedantes. Entre ellas se incluyen especies cuarentenarias bien conocidas, así como otras que han afectado al cacao por primera vez mediante “saltos de hospedante”, es decir, asociaciones previamente no registradas. Lo cual se argumentó como consecuencias del cambio ambiental global, incluido el CC. A nivel internacional su patosistema es más diverso en regiones como Sudamérica, África o Asia, y el riesgo de introducción de plagas y enfermedades internacionales al país es persistente y puede incrementar con CC. Las limitantes socioeconómicas, como la desorganización y ciclos de crisis, pobreza y migración, afectan estructuralmente a los productores, mayormente de la tercera edad, en un contexto de subsistencia con baja innovación agrícola y políticas públicas históricamente desfavorables. Aunque los aspectos productivos fueron los más estudiados, en la práctica persisten como limitantes. Sin embargo, para mejorar este sistema podría dar mejores resultados el fortalecer el capital social mediante el diálogo de saberes y prácticas agroecológicas más amplias, antes que solo centrarse en lo netamente productivo. Con lo cual se podría fortalecer la adaptabilidad del sistema cacaotero al CC. Finalmente, se reflexionaron las lecciones derivadas de la mal-adaptación al CC y a la roya del cafeto (causada por *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) en el cultivo de café (principalmente *Coffea arabica* L.) en Chiapas,

⁴ Sometido a: Tropical and Subtropical Agroecosystems
Estado: atendiendo sugerencias.

contrastándolas con el caso del cacao para destacar la importancia de fortalecer el capital social y las respuestas institucionales frente al CC.

Palabras clave: agricultura multifuncional; cambio climático; parasitología del cacao; sistemas agroforestales.

4.2. Abstract

Cacao cultivation (*Theobroma cacao* L.) has been historically linked to various Mesoamerican cultures settled in what is now Mexico; however, it faces a range of constraints that limit its production and long-term persistence. This review aimed to analyze the current state of knowledge regarding these constraints (climatic, parasitological, and socioeconomic) their interactions, and potential improvement strategies, contrasting them internationally through a state-of-the-art synthesis based on documents retrieved in a systematic review addressing the aforementioned issues (developed in the previous chapter). The goal was to propose agronomic and social strategies for improvement and adaptation to climate change (CC). To this end, each thematic area (constraints and their interactions) was discussed in depth, and flowcharts and thematic syntheses were developed to support interpretation. It was found that CC affects both the physiology of cacao and its pathosystem and may have even greater impacts in the future. While frosty pod rot (*Moniliophthora roreri* H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny) remains the predominant parasitological agent affecting cacao cultivation, new pests and diseases have been documented that have expanded their host range or geographic distribution. These include well-known quarantine species, as well as others that have affected cacao for the first time through “host jumps” (that is, previously unrecorded associations). These phenomena were interpreted as consequences of global environmental change, including CC. At the international level, its pathosystem is more diverse in regions such as South America, Africa, or Asia, and the risk of introducing international pests and diseases into the country remains persistent and may increase with CC. Socioeconomic constraints—such as disorganization, cycles of crisis, poverty, and migration—structurally affect producers, most of whom are elderly, within a subsistence context characterized by low agricultural innovation and historically unfavorable public policies. Although productive aspects have been the most studied, they continue to act as limiting factors in practice. However, strengthening social capital through knowledge exchange and broader agroecological practices—rather than focusing solely on strictly productive aspects—could yield better outcomes for improving this system. This, in turn, could enhance the adaptability of the cacao system to CC. Finally, lessons were drawn from cases of maladaptation to CC and to coffee leaf rust (caused by *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome) in coffee cultivation (mainly *Coffea arabica* L.) in Chiapas, contrasting them with the cacao case to underscore the importance of reinforcing social capital and institutional responses in the face of CC.

Keywords: multifunctional agriculture; climate change; cacao parasitology; agroforestry systems.

4.3. Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L.) representa un cultivo de alto valor biocultural y económico en México, que se da en esquemas de Sistema Agroforestal (SAF), cuya producción ha sido históricamente afectada por múltiples limitantes (Hernández-Gómez *et al.*, 2015). En las últimas décadas, estas restricciones han contribuido al debilitamiento del sistema cacaotero nacional, alejando al país de los principales productores mundiales (FAO, 2022). Algunas de las condicionantes de este contexto desfavorable se comentan a continuación.

Debido a diversos factores históricos —principalmente por deforestación derivada de megaproyectos agropecuarios e hidroeléctricos desarrollados durante el siglo pasado—, en las principales zonas donde actualmente se cultiva cacao en México, prácticamente ha desaparecido la vegetación original (Fuentes Aguilar, 1977; Santa Cruz De León, 2007). Razones por las cuales se ha destacado el potencial de albergar en esas mismas zonas a al menos 14 de las especies de mayor importancia ecológica y forestal de la selva alta perennifolia (SAP): un importante (y el más exuberante) tipo de vegetación en México, tanto por su diversidad biológica como por los servicios ecosistémicos que de ella se derivan (Santos-Hernández *et al.*, 2021), incluida la provisión de bienes materiales (frutos, madera y leña), la fijación y captura de carbono, la polinización, la conservación del suelo y de la diversidad biológica, así como la protección de cuencas (Casanova-Lugo *et al.*, 2016). Además, ante escenarios de CC, se proyectó que algunos lugares de mayor altitud (>300 msnm) tienen el potencial de mantener esa condición ante escenarios de CC; es decir, albergar a al menos 14 especies clave de la SAP en el futuro (Santos-Hernández *et al.*, 2021).

En cuanto a los factores parasitológicos más importantes en los SAF cacao se encuentran las enfermedades. En México, las dos más trascendentales son la moniliasis y la mancha negra (causada por *Phytophthora* spp.), pero a nivel nacional e internacional se han destacado a otros fitopatógenos más, además de numerosos insectos “plaga” y nematodos (CABI, 2021; Hernández-Gómez *et al.*, 2016; Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2018). Mismas que amenazan la persistencia del cultivo de cacao a mediano y largo plazo (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Hernández-Gómez *et al.*, 2015)

debido a la dificultad en su manejo. Esta dificultad es genérica a las regiones de trópico húmedo debido a las condiciones de baja variabilidad estacional que allí se presentan. El CC ha generado alteraciones en la biósfera que afectan tanto a los ecosistemas como a los sistemas agrícolas, incluidos los SAF, por ejemplo, mediante procesos de variabilidad climática, mismos que han generado impactos multidimensionales (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Malhi *et al.*, 2020). Esta dinámica, junto con la expansión agrícola hacia áreas boscosas, la diseminación de material vegetal infectado y la migración humana, pueden complejizar la interacción entre los componentes del patosistema de los sistemas agrícolas, lo que puede favorecer su dispersión y disminuir los rendimientos. En consecuencia, la persistencia del cultivo de cacao se vería amenazada por la climatización de enfermedades ante CC, la mayor incidencia de plagas y la limitada capacidad de respuesta del subsistema social ante ese contexto (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2020; Notaro *et al.*, 2022).

En general, existe un complejo de factores socioeconómicos que propician una mayor vulnerabilidad del cultivo de cacao en general y a las afectaciones por plagas y enfermedades en particular, como son: manejo fitosanitario deficiente (como falta de podas o el no retirar o cosechar frutos infestados de forma continua), como indican Leandro-Muñoz and Cerda (2021). Así como escasez histórica de políticas públicas adecuadas y de recursos económicos para asistencia técnica y recambio o renuevo de plantas, dos de las actividades más costosas y tardadas en este cultivo perenne (Somarriba *et al.*, 2021), así como la pérdida de la cultura agrícola intergeneracional (Hernández-Gómez *et al.*, 2015), entre otros. Aspectos que se ven influenciados y mediados por factores financieros externos, principalmente por los precios del grano, los cuales están determinados por el mercado global de oferta y demanda, así como por el valor y las fluctuaciones de los precios internacionales y regionales (J. Díaz-José *et al.*, 2014; O. Díaz-José *et al.*, 2013). Esto es particularmente común en productos clasificados como “*commodities*”, es decir, mercancías utilizadas como insumos para la elaboración de otros productos, que cotizan en mercados y bolsas internacionales (ICCO, 2012).

Por otro lado, la mejor rentabilidad de otros cultivos y actividades pecuarias dentro de una lógica capitalista (maximización de ganancias en el menor tiempo posible), así como el incentivo gubernamental (financiamiento y apoyos económicos) de tales actividades también han impulsado históricamente el recambio del cultivo (Oporto-Peregrino *et al.*, 2020). Otra limitante es el desinterés de las generaciones jóvenes en el campo para dedicarse a otros trabajos (asalariados) y los consecuentes procesos de migración y desterritorialización de las zonas productoras (Ramírez Martínez, 2021). Además de que existe una pérdida de conocimientos bioculturales relacionados con la fase productiva —e incluso de la propia preparación de los derivados—, sumado a que la preservación del legado cultural relacionado con el cacao tampoco ha sido considerada una prioridad, ni por la sociedad ni por las instancias gubernamentales (Newell *et al.*, 2021).

Por otra parte, la contaminación por petróleo en algunos lugares contiguos a las bases petroleras en Tabasco también es un problema relevante para el cultivo (Pinkus-Rendón & Contreras-Sánchez, 2012). Una limitante estructural es el acaparamiento y la desigualdad social que se vive en las regiones productoras, que conllevan a una estratificación vertical de cinco niveles, donde los productores de cacao se encuentran en el nivel más bajo y normalmente no pueden ascender de nivel (Ramírez-Martínez, 2007), manteniéndose en general en la pobreza. A lo que se suma la violencia (existencia de grupos delictivos importantes, por ejemplo en la Chontalpa) y el propio robo de los frutos de cacao directamente de las plantaciones, mismos que afectan las dinámicas de producción y el rendimiento (Chávez García, 2012).

Referente a la salud humana: se ha relacionado la incidencia de leishmaniasis cutánea en estas zonas, enfermedad transmitida por organismos de la familia Psychodida como lo es *Lutzomyia* spp. con el cultivo de cacao (Del Carmen Carrada Figueroa *et al.*, 2014). Por ello, resulta fundamental conservar el equilibrio ecológico en los SAF, con lo cual se favorezca la presencia de enemigos naturales de tales insectos vectores, como lo son las arañas tejedoras de la familia Araneae (Pérez-De La Cruz *et al.*, 2007). Lo cual contribuye al control biológico de vectores y, por ende, a la regulación de riesgos sanitarios (servicio ecosistémico de regulación).

Pese a todas las ventajas que presentan los SAF basados en cacao, así como el hecho de que diversas culturas prehispánicas de Mesoamérica —incluidos numerosos pueblos originarios de México, Guatemala y Honduras—, han mantenido un vínculo ancestral con el cacao (Attolini Lecón, 2011). Existe un déficit en la producción nacional de cacao en alrededor del 50%, que sigue una tendencia al alza según reporta el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2022). Aunado a que, las previsiones de reducción en la idoneidad climática del cacao y el posible incremento de la incidencia de plagas y enfermedades debido al CC amenazan la producción y persistencia del cacao a nivel nacional e internacional (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2020); previsiones realizadas no solo al nivel de cultivo, sino al nivel de SAF (de Sousa *et al.*, 2019).

La persistencia de limitantes climáticas, parasitológicas y socioeconómicas en el cultivo de cacao en México ha sido ampliamente documentada, pero su abordaje sigue fragmentado y con escasa articulación entre dimensiones. Lo cual es de particular relevancia ante el CC. Esta revisión, a modo de estado del arte, integró y contrastó el estado actual del conocimiento sobre dichas limitantes, sus interacciones y las alternativas de mejora disponibles, a nivel nacional pero con contrastes internacionales. El propósito es contribuir al diseño de estrategias agronómicas y sociales que fortalezcan la adaptabilidad del sistema cacaotero frente al CC, con base en evidencia científica y enfoques integrados.

4.4. Materiales y métodos

Los documentos analizados en este capítulo fueron recuperados del capítulo anterior, que realizó una revisión sistematizada en bases como Scielo, Scopus, Redalyc, Dialnet y recomendaciones de expertos. A partir de dicha base depurada (249 registros) y su clasificación, se realizaron síntesis temáticas (de cada tipo de limitante) y se discutieron en profundidad sus contenidos más relevantes. Para facilitar la interpretación, se elaboraron diagramas de flujo que permiten visualizar algunas de las interacciones más relevantes en este contexto. El análisis se desarrolló desde una perspectiva sistémica, con lo que se reconoce la complejidad e interdependencia de los factores que inciden en la persistencia del cultivo. Ello en concordancia con el

enfoque de agricultura multifuncional. El cual amplía el paradigma tradicional de la agricultura (centrado exclusivamente en la función económico-productiva: bienes comerciales y divisas) e incorpora funciones territoriales, ecológicas, sociales y culturales de esta actividad, sus conexiones intersectoriales y relevancia para con otros sectores (Silva Pérez, 2010).

Finalmente, como recurso comparativo y con el objetivo de destacar la importancia de fortalecer los SAF tradicionales en su conjunto y los de cacao en particular, se incorporó la reflexión sobre la mal-adaptación al CC en SAF de café (*Coffea* spp.) en Chiapas (pero que resulta generalizable a nivel internacional), particularmente frente a la roya del cafeto y a desafíos sociales y estructurales análogos a los que enfrentan los SAF cacao. Estos resultados son pertinentes en el contexto actual, tanto por su contribución al entendimiento de la problemática como por el potencial de mejora en la adaptabilidad del sistema cacaotero ante sus desafíos, tanto de tipo socioeconómico como climático.

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Cambio climático

Estos SAF son vulnerables al CC, al igual que los SAF de café, *Coffea arabica* L. (de Sousa *et al.*, 2019). Lo anterior viene explicado por el estrecho rango de condiciones edafoclimáticas en las cuales el cacao puede crecer y producir: precipitaciones y temperaturas particulares (alta precipitación con poca estacionalidad y temperaturas cálidas con poca variación), así como tipos y profundidades del suelo específicos (Suárez *et al.*, 2013; Suárez-Venero *et al.*, 2019). Aunado al requerimiento de sombra que tales SAF presentan, sobre todo durante sus primeras etapas (Jiménez-Pérez *et al.*, 2019). Además, se estima que los SAF podrían reemplazar o tendrían que mezclarse parcialmente con los de café para el año 2050 en América Central y el sur sureste de México (de Sousa *et al.*, 2019). En este contexto, el CC puede reducir la aptitud climática de las especies (por un aumento en las temperaturas máximas extremas y cambios en la estacionalidad de la precipitación) en zonas que eran adecuadas para el cultivo, e incluso, aumentar los niveles de la superficie del mar. Al tiempo que existiría mayor riesgo de inundación (más el consecuente incremento de

incidencia de enfermedades por el incremento de humedad) en áreas donde los SAF están más expuestos a esta condición (Bunn *et al.*, 2019; Cilas & Bastide, 2020; Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Malhi *et al.*, 2020; Quiroz-Antúnez *et al.*, 2022). Sin embargo, otros estudios han proyectado que el área de distribución del cacao se incrementará con CC (Rivera-Aguirre *et al.*, 2021). Por lo anterior es que resulta necesario continuar investigando tales aspectos; más aún, con la consideración del microclima que producen el arbolado y la microbiota del SAF, pues se ha comprobado que estos reducen el estrés abiótico del cacao ante sequías, salinidad y CC, además de innumerables beneficios adicionales (Brito-Vega *et al.*, 2013; Jiménez-Pérez *et al.*, 2019; Troya Guerrero & Pino Meléndez, 2023).

Además, el CC puede incrementar la cantidad, la recurrencia y el impacto de fenómenos hidrometeorológicos extremos (como ciclones, huracanes, sequías, inundaciones, olas de calor, etc.) y sus consecuencias negativas en la población, sus bienes e infraestructura; Tabasco y Veracruz son los estados que se inundan con mayor frecuencia e impacto (lo que está relacionado y se explica por CC y variabilidad climática) debido a su geografía e historia (que han dejado a su población expuesta y vulnerada ante tales eventos). Por lo anterior es por lo que tales estados vieron mermados sus cultivos (incluido el cacao) y su ganado de forma importante por grandes inundaciones históricas (Marín Olán, 2022; Oropeza Orozco *et al.*, 2016), así como por sequías (Marín Olán, 2022). Por otro lado, el uso de tecnologías agroforestales (y agroecológicas) ayudan enormemente en la mitigación y adaptación al CC (Jiggins, 2014). Por ejemplo, se estima que los bosques almacenan al menos el 40% del carbono terrestre. Sin embargo, la deforestación continúa erosionando esta capacidad de almacenamiento, al tiempo que degrada el suelo y reduce la diversidad biológica. Por su parte, la agroforestería tiene el potencial de revertir los principales efectos de la deforestación (deterioro del suelo y pérdida de la diversidad biológica) y el caso de los SAF cacao no es la excepción (Morán Villa, 2022):

Referente a su capacidad y potencial para la mitigación y adaptación al CC, se tiene que el carbono orgánico del suelo (COS) que puede haber en el SAF-cacao de la Chontalpa, Tabasco (en 13 parcelas evaluadas), varía con la edad del SAF y la

profundidad del suelo. Dicho COS puede variar de 6.6 t ha⁻¹ en parcelas de 10 a 20 años a una profundidad de 0.3 m, hasta 28.7 t ha⁻¹ en parcelas de 30 a 40 años a una profundidad de 0.1 m, con totales (profundidad de 0 a 0.3 m) de 42.7 y 56.2 t ha⁻¹ para respectivos rangos de edad, para luego decrecer a mayores edades del SAF. El carbono almacenado en el componente biomasa vegetal en promedio fue de 147.7 t ha⁻¹, del cual, 79.5% perteneció a los árboles de sombra, 13.3% a los árboles de cacao, 7% a la hojarasca y el 0.12% restante a las herbáceas (Morán Villa, 2022). En tanto que SAF de cacao orgánico en Indonesia almacenan hasta 11 t⁻¹ ha⁻¹ al año (Jiggins, 2014). Se identificaron varios estudios sobre el carbono del cultivo de cacao en México (Arenas-Arcia, 2013; Salvador-Morales *et al.*, 2019, 2020; Suárez-Venero *et al.*, 2019; Trinidad *et al.*, 2016), pero el anterior es el más completo e integrador, pues analiza la captura (en varios componentes del SAF) y la emisión de este gas y del nitrógeno, aunado a que derivó en un estudio alométrico para estimar biomasa arbórea del cacao (Morán-Villa *et al.*, 2024) y en otro ecológico a nivel SAF (Morán-Villa *et al.*, 2022).

El CC también ha afectado, mediante patrones distorsionados de sequías y heladas (en casos como Brasil) la producción del café a nivel América, y del cacao en África, por lo que pueden darse cambios en los regímenes biofísicos normales, principalmente mediante el aumento de las temperaturas medias, mayores fluctuaciones en las temperaturas extremas y cambios en los patrones de precipitación (Harvey *et al.*, 2021). Además, con fenómenos hidrometeorológicos extremos más frecuentes, se puede dar la diseminación internacional de las enfermedades, tal como se sospecha que ocurrió con la entrada de la moniliasis de Costa Rica a México debido a los eventos respectivos, ocurridos entre 2000 y 2010 (Cilas & Bastide, 2020), aunque existen otras hipótesis de que esta ingresó a México vía antropogénica.

Fisiología. En concordancia con los escenarios de CC, el efecto combinado de dos niveles de temperatura (30 y 40 °C) y dos de concentración de carbono (400 y 1200 µmol CO₂ mol⁻¹) ha sido explorado bajo condiciones semicontroladas en el crecimiento y fisiología de plántulas de cacao (neocriollo y trinitario) en Yucatán, México. Se encontraron efectos positivos en el crecimiento si la temperatura y el carbono son altos (40°C y 1200 µmol CO₂ mol⁻¹), pero efectos perjudiciales en sus

respuestas fisiológicas (incluido el crecimiento) si uno o ambos factores son bajos. De este modo, los efectos fisiológicos generados por un elevado CO₂ podrían reducir el impacto negativo por el incremento de la temperatura, con lo cual, se incrementaría el rango de tolerancia del cacao (Ríos-Bolívar *et al.*, 2022); ello coincidió con los resultados más generales reportados anteriormente (Lahive *et al.*, 2019). En una revisión más amplia de las respuestas fisiológicas del cacao ante CC, Lahive *et al.* (2019), también encontraron que la falta de agua reduce significativamente los rendimientos, aunque existen diferencias genéticas en la sensibilidad de tal limitación (ciertos genotipos son más tolerantes); además, que en el campo, el cacao enfrenta temperaturas más altas de lo que comúnmente se reporta; la interacción entre el cacao y los árboles de sombra es compleja y puede generar resultados contradictorios en las modelizaciones; la implementación de estrategias de mitigación puede ayudar a reducir el estrés ambiental. Y por último, que existen importantes lagunas en la investigación al respecto. Por lo que, en estudios que busquen abordar la respuesta del cacao al CC en escenarios futuros, se deberá tener en consideración estos aspectos.

Otros efectos fisiológicos que el CC tendría en el cultivo son: inhibición de la floración, producción de vainas más pequeñas y madurez temprana del fruto (Pérez Sosa & Granados Ramírez, 2020); otro de los efectos relevantes del CC se relaciona con la distribución futura de sus polinizadores, es decir, principalmente *Forcipomyia* spp. (Vanhove *et al.*, 2020), que al parecer no ha sido estudiado, ni a nivel nacional ni internacional.

Patosistema. Con referencia a las repercusiones del cambio global en el patosistema del cacao, se identificaron tres factores intrínsecos e interactuantes entre sí (Figura 12): CC, movimientos de material vegetal y cambios de uso de suelo. Los movimientos de personas, de mercancías y material vegetal (germoplasma) a gran escala, facilitados por la globalización (Evans & Waller, 2010; Mehl *et al.*, 2017), han favorecido la rápida diseminación de una amplitud de fitopatógenos (como se cree que sucedió con la diseminación de la moniliasis de Colombia hacia países de Centro y Suramérica; Másmela-Mendoza, 2019). Con lo cual se facilita la hibridación de ciertas razas o tipos

Dentro de estos movimientos también pueden incluirse el bioterrorismo, como intentos intencionados de afectar con agentes biológicos y patógenos a la población o la producción agrícola, tal como sucedió con la introducción de la escoba de bruja en Bahía, Brasil: la diseminación intencionada de la enfermedad desde las selvas Amazónicas de donde era nativa hacia las grandes plantaciones de cacao del estado de Bahía con el fin de debilitarlo (H. C. Evans & Waller, 2010).

Afectaciones multidimensionales. Sin olvidar que el sector salud (salud humana) también puede ser afectada por CC, por ejemplo, por más golpes de calor, por reducción de la seguridad alimentaria o por el aumento de la distribución espacial de vectores de enfermedades virales, tales como el dengue y el zika, transmitidos por *Aedes* spp. (Cuadros Cagua, 2017; Galindo *et al.*, 2014); lo que sin duda puede complicar el desarrollo y rentabilidad de la agricultura tropical en general. Además de los sectores agrícola y salud, los sectores hídrico y energético, biodiversidad y pobreza pueden verse seriamente afectados, debido a la interdependencia de sus factores: tanto de forma directa como de forma indirecta (Galindo *et al.*, 2014; IPCC, 2023).

De tal modo que las consecuencias previsibles —algunas ya evidenciadas en el cultivo, especialmente en países africanos— incluyen el cambio en la aptitud climática tanto del cultivo como de las especies patógenas y sus enemigos naturales. También existe la posibilidad de que se amplíe el rango de hospedantes de los patógenos, lo que podría facilitar nuevos saltos de huésped y alterar sus hábitos alimenticios, como el paso de formas endófitas a patogénicas. A esto se suma la aceleración de los ciclos reproductivos de insectos plaga, así como un incremento en el riesgo de diseminación internacional en ambientes más propicios, lo que podría traducirse en una mayor probabilidad de eventos epidémicos (Cilas & Bastide, 2020; Higuera-Ciapara, 2015; Jung *et al.*, 2020; Olusayo Okeniyi *et al.*, 2021; Schroth *et al.*, 2016). En el país poco se ha estudiado o hecho énfasis en torno al efecto del CC sobre la distribución de las enfermedades del cacao, por lo que resulta imprescindible su abordaje.

4.5.2. Factores socioeconómicos de importancia

Para efectos de este análisis, se ha incluido a la temática agronómica dentro de esta sección.

Manejo agronómico. Los SAF de cacao han sido abordados desde diferentes perspectivas, por ejemplo, desde las innovaciones (Becerra, 2006; Díaz José, 2013; Ó. Díaz-José *et al.*, 2013; O. Díaz-José *et al.*, 2013). También, con el enfoque de género (Martínez-Salvador & Martínez-Salvador, 2020). Existe manejo orgánico y en algunos casos ha habido certificaciones (Castelán-Estrada & Chávez-García, 2019; Larrondo-Posadas, 2017), sin embargo, el manejo convencional sigue siendo el predominante. Por otro lado, la rentabilidad del sistema condiciona ese manejo y viceversa. Pues para que pueda haber renovación de plantaciones se requiere de una gran inversión y esfuerzo, por lo que resulta necesario que el proceso sea paulatino (Somarriba *et al.*, 2021).

La adopción de innovaciones (Aguilar Gallegos, 2015; Díaz José, 2013; Ó. Díaz-José *et al.*, 2013) en este cultivo es intermedio: los atributos del productor influyen en esa adopción: esto es, si este está bien articulado tiene mayores niveles de innovación y, también tiene mejores rendimientos y mayor creación de valor económico; la edad afecta de forma negativa (y de hecho, el grueso de los productores se encuentra en una categoría de edad avanzada), mientras que tamaño de la parcela, escolaridad, experiencia e importancia de la actividad económica tienen un impacto positivo en tal adopción. En tanto que el género no influye (Aguilar Gallegos *et al.*, 2013). En la selección de árboles de sombra se deberá tener en cuenta que aquellos árboles usados y preferidos actualmente en los SAF cacao o café en Centroamérica (incluido México) son vulnerables al CC (de Sousa *et al.*, 2019), por lo que nuevos diseños agroforestales resultan necesarios para adaptarse al CC.

Además, para que el sistema sea rentable se deben producir al menos 0.77 t ha⁻¹ de grano (Espinosa-García *et al.*, 2015), lejos del promedio nacional de 0.54 t ha⁻¹; por ende, y de forma complementaria, en el SAF se incluyen otros cultivos de importancia comercial (López-Juárez *et al.*, 2016; Trinidad *et al.*, 2016).

Para mejorar este sistema son necesarios mercados alternativos (Priego-Castillo *et al.*, 2009), así como fomentar y regular los sistemas forestales que el SAF ostenta, para que los productos forestales (madera, leña y frutos convencionales y no convencionales) realmente representen un ingreso considerable y fiable; a la vez que,

el pago por servicios ambientales podría ser una alternativa de ingreso adicional, que también aseguraría la mantención de externalidades ambientales significativas, como ha sucedido en la región chiapaneca de la Selva Lacandona (Zepeda Torres, 2021; Zepeda Torres & Cruz Morales, 2022).

Se ha demostrado que el Manejo Integrado del Cultivo, MIC (Figura 13), es eficiente en el manejo de las plagas y enfermedades (Leandro-Muñoz & Cerda, 2021; Ortiz-García *et al.*, 2015). Sin embargo, se requiere esfuerzos tanto por el agricultor como por el servicio de extensionismo, es decir, con la parte institucional; ello para que esas estrategias tengan un impacto regional más importante.

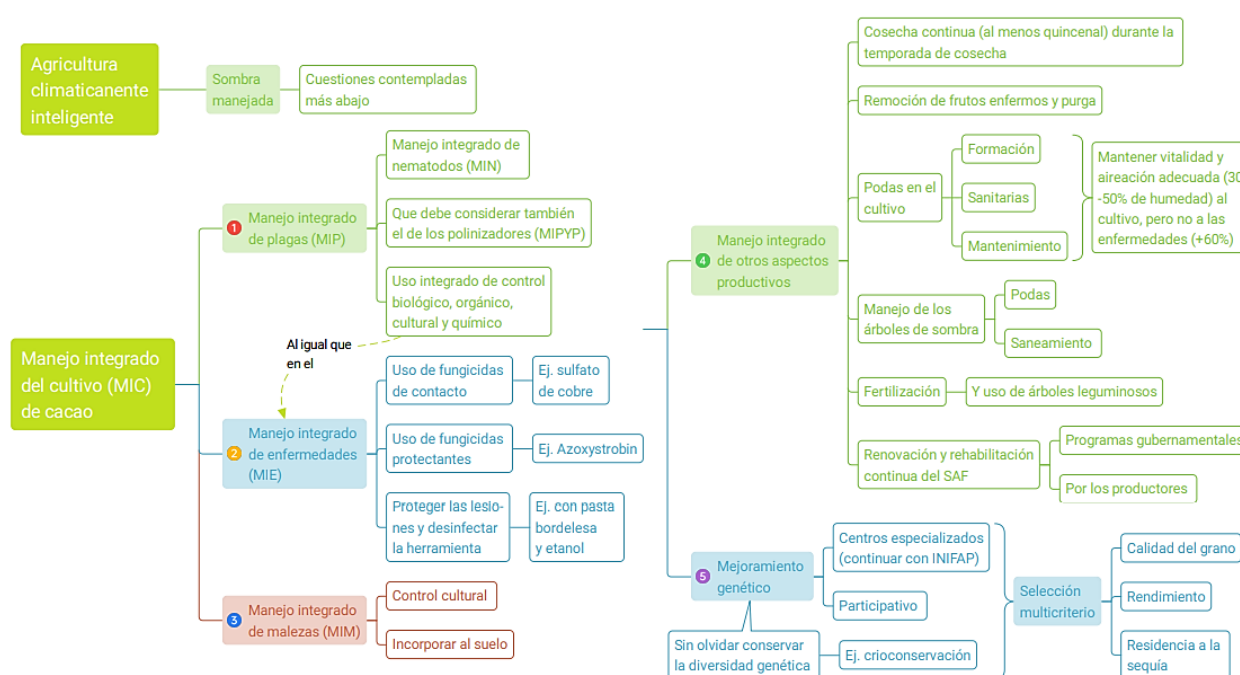


Figura 13. Principales alternativas del manejo integrado del cultivo de cacao con propuestas propias.

Fuente: elaborado con base en la revisión de literatura.

Una forma de llevar a cabo los retos de sobrellevar la producción, producir más con menos (sostenibilidad) y hacer frente al CC, es la producción agroecológica (Ballesteros Possú *et al.*, 2007; López Báez *et al.*, 2015; Nicholls *et al.*, 2013) y la agricultura climáticamente inteligente (Agbenyo *et al.*, 2022; FAO, 2021; Jumiya *et al.*, 2021); las cuales se alinean con el MIC (Ortiz-García *et al.*, 2015), y que, a su vez, toman en cuenta el manejo integrado de plagas y enfermedades (Cilas & Bastide,

2020); y, además, el manejo integrado de nematodos (Orisajo, 2009) y el manejo integrado de plagas y polinizadores (Claus *et al.*, 2018).

Con manejo orgánico y aplicando prácticas del MIC, se documentó que, con variedad neocriolla (Carmelo), en una escuela de campo en Cunduacán, Tabasco, desde 2006 a 2014 y con incrementos paulatinos, el rendimiento de grano alcanzó alrededor de 1 t ha⁻¹ y, aun así, se proyectaron incrementos superiores a futuro. Además, que los rendimientos y precios de venta fueron superiores al sistema convencional de referencia (Córdova-Avalos *et al.*, 2016) Lo anterior, pese a que las variedades neocriollas típicamente son de menor rendimiento (pero de mayor calidad) que las otras variedades (López-Hernández *et al.*, 2018; Ramírez-González *et al.*, 2013). Resultados que coinciden con lo señalado por otros estudios, en los cuales también se ha documentado una reducción en la incidencia de plagas y enfermedades al usar principios del MIC (Castelán-Estrada & Chávez-García, 2019; Ortiz-García *et al.*, 2015; Triano-Sánchez *et al.*, 2016). Por ejemplo, Torres de la Cruz *et al.* (2011) compararon el manejo convencional con el MIC en el SAF cacao en la Chontalpa. Cuyos resultados se contrastan, de forma respectiva, a continuación: 228 a 1082 kg de cacao seco ha⁻¹ año⁻¹ (incremento de la producción en 374.4 %); incidencia final de la moniliasis de 80.7% y 16% (diferencia significativa; reducción en 79.9%); tasa de retorno marginal de 100 y 177 de manera respectiva. Así, el MIC produjo beneficios brutos más altos.

Pese a que en México no se dan los casos de sistemas a pleno sol (monocultivo) o sin árboles de sombra, y se trata más bien de SAF, un metaanálisis de comparación (52 artículos) de tales sistemas encontró que las ventajas económicas totales igualaron a ambos sistemas. Sin embargo, los SAF diversificados proveyeron más servicios ambientales. Por otro lado, la incidencia y severidad de las enfermedades en el cultivo fueron altamente dependientes de la especie fitopatógena y no tanto de la cobertura arbórea (Niether *et al.*, 2020). En tanto que, en el Soconusco la simplificación existente del SAF cacao (disminución de la cobertura arbórea en composición y densidad para tratar de reducir la afectación por enfermedades y aumentar el rendimiento) no resultó en una disminución significativa en la incidencia de moniliasis o un incremento del rendimiento del grano (López-Cruz *et al.*, 2021).

Se han revisado las estrategias para el combate de la moniliasis en Colombia (Tirado-Gallego *et al.*, 2016) y en México (Hernández-Gómez *et al.*, 2012), que se empatan e incluyen varios aspectos del MIC. Si bien hasta cierto punto las enfermedades se han estabilizado y controlado, existe una vulnerabilidad construida que amplía y puede hacer más complejo el patosistema del cacao. El cual de por sí es amplio y de distribución tendiente a ampliarse debido al cambio global. Por ende, la rentabilidad y vitalidad del sistema resulta incierta. Además, la aplicación indiscriminada de pesticidas, lejos de solucionar el problema a largo plazo, además del costo inherente (económico y de tiempo invertido) que conlleva, genera resistencia en las plagas y enfermedades (Torres de la Cruz *et al.*, 2011).

Sin embargo, es necesario continuar investigando estrategias de control, no solo a nivel laboratorio (*in vitro*), sino su validación en campo (*in vivo*). Diferentes alternativas, a usarse de forma combinada, han sido propuestas para el manejo de la moniliasis en México, estas son de tipo cultural, químico y biológico (Ortíz-García *et al.*, 2015; Torres de la Cruz *et al.*, 2011), como son: manejo cultural y mejora genética, detección e identificación temprana de frutos enfermos. Por ejemplo, la aplicación de lixiviados de vermicomposta sin esterilizar a una concentración de 10 a 20% inhibió todo el crecimiento micelial *in vitro* de *M. roreri*, aunque debe probarse en campo (Hernández-Gómez *et al.*, 2012); manejo silvícola-cultural como la poda de descopado, pero también el desmamone (eliminación de brotes laterales) y el deshierbe (Córdova Ávalos *et al.*, 2001); uso de fungicidas curativos para recuperar frutos enfermos (en una sola aplicación, dirigida exclusivamente a los chilillos) en cada ciclo de floración-amarre (Torres de la Cruz *et al.*, 2011; Torres-de la Cruz *et al.*, 2013); el uso de enemigos naturales endófitos (como *Trichoderma* spp.), tanto comerciales como nativos, que inhiben (antibiosis) y parasitan (micoparasitismo) en contra de los hongos fitopatógenos, incluidos *M. roreri*, pueden reducir infecciones sobre el suelo, la planta o la mazorca (Reyes-Figueroa *et al.*, 2016).

Diversos estudios han evaluado la eficacia de extractos vegetales *in vitro* contra *M. roreri*. Por ejemplo, se ha demostrado que extractos metanólicos de variedades locales de chile (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*, morfotipos amashito y garbanzo)

inhibieron hasta en 95 % el crecimiento micelial y en 100 % la producción de conidios a concentraciones de 1000 y 2500 mg L⁻¹. Además, el chile garbanzo redujo en 35 % la viabilidad de conidios (De la Cruz-Ricardez *et al.*, 2020). También, se ha demostrado la inhibición total del crecimiento micelial mediante bioaceites esenciales de varias especies, incluyendo pirul (*Schinus molle* L.) y pimienta negra (*Piper nigrum* L.) (Gómez-López *et al.*, 2020). Por otro lado, el extracto acuoso y alcaloideo de *Lupinus* spp. mostró un efecto inhibitorio de *M. roreri*, siendo más eficaz el extracto acuoso al 25 % de semillas de *Lupinus montanus* Kunth (De la Cruz-Ricardez *et al.*, 2016). Extractos por destilación también inhibieron a *M. roreri* en al menos 40% (Tamayo España *et al.*, 2016). Sin embargo, resulta necesario la prueba en campo y verificación de que tales bioaceites esenciales o extractos no tengan un efecto insecticida contra los polinizadores (Ortiz-García, 2017).

Ha sido documentado el uso de fungicidas curativos (Torres-de la Cruz *et al.*, 2013), así como un control químico más variado (Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2019): en condiciones de campo, *M. roreri* mostró sensibilidad a una aplicación única de fungicidas sistémicos como tebuconazol, propiconazol, azoxystrobin y trifloxystrobin, formulados a una concentración de 0.8 gramos de ingrediente activo por litro (g.i.a./L); esta intervención fue complementada con tres aplicaciones de hidróxido de cobre a 7.5 g.i.a./L, lo que contribuyó a la contención del patógeno en frutos juveniles; en ensayos *in vitro*, el hongo también fue sensible a siete fungicidas protectantes, entre ellos: sulfato de cobre, hidróxido de cobre, óxido cuproso, oxiclورو de cobre y polisulfuro de calcio, lo que sugiere un espectro de acción eficaz en etapas tempranas de infección. Además, Ochoa-Fonseca *et al.* (2017) utilizaron polisulfuro de calcio y silicosulfocálcico al 10%, aplicados cada tres días o un día después de la inoculación, en el control *in vivo* de *M. roreri*; ambos tratamientos inhibieron completamente el desarrollo de la enfermedad, ya que la incidencia (%) y los índices de severidad (externa e interna, en escalas de 0 a 5) presentaron valores de cero, mientras que en el tratamiento sin aspersión estos valores fueron del 80%, 3.3 y 3.8, respectivamente; dichos productos son alternativas efectivas, viables y requieren poca especialización, además de que su aplicación en sistemas orgánicos está permitida.

De igual modo, se ha trabajado en la formulación de Bio-100, producto con propiedades antimicrobianas y elicitoras con bajo impacto ambiental que fomenta la producción de fenoles en el fruto para reducir la incidencia de la moniliasis (en relación proporcional inversa): en campo, los tratamientos que mejor redujeron la incidencia (60%) fueron biomasa de cepa EPCH0496 (1:10 volumen/volumen, v/v), caldo fermentado de cepa EPCH0496 y extracto alcohólico A (1:1000 v/v), y los que reducen la variedad de síntomas fueron los extractos alcohólicos S (1:1000 v/v) y A; la biomasa y ambos extractos alcohólicos aumentaron la concentración de fenoles en el pericarpio, por lo que se definieron como los componentes más adecuados (Albores-Flores *et al.*, 2015).

Además, se ha reportado un efecto antifúngico (fungistático) del extracto alcohólico de polen maduro (amarillo) e inmaduro (beige) de flor de cacao con estaminodios cerrados sobre el crecimiento micelial y necrosis por *M. royeri* durante la etapa de amarre: mayor efecto significativo con polen inmaduro (menor crecimiento micelial y presencia de necrosis con diferencia de una semana) que inmaduro (incidencia de 33.3% y 40% respectivamente). Lo cual quizás fue debido a que, tras la madurez, el polen presenta menores compuestos antifúngicos (Albores Flores *et al.*, 2022).

Entre las oportunidades para el sector cacaotero se encuentran el mejoramiento genético por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el mejoramiento genético participativo (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2013). En el Cuadro 4 se presentan algunos de los materiales genéticos recientemente desarrollados por INIFAP. Además, también se han realizado algunos esfuerzos para conservar a largo plazo a los materiales base, para lo cual se ha propuesto la crioconservación (Avendaño-Arrazate, López-Gómez, *et al.*, 2018). De hecho, ya se han validado varios de esos materiales en campo (Rivera-Torrez *et al.*, 2022).

Cuadro 4. Nuevos clones de cacao mexicanos con mejoramiento genético reportados en la literatura

Nombre	Características distintivas	Referencia
H-275	Producto de híbridos, INIFAP 1 x PA 169. Presenta rendimiento y resistencia a moniliasis y mancha negra. En el segundo año de cosecha mostró un rendimiento de 0.6 t ha ⁻¹ y resistencia en 100 % a la moniliasis, este último carácter es heredado de PA 169 (95% de similitud genética). Fue el primer reporte de resistencia a la moniliasis en México.	(Azpeitia M. <i>et al.</i> , 2015)
CAERI 1	Calidad, resistencia a enfermedades y rendimiento	(Avendaño-Arrazate <i>et al.</i> , 2019)
CAERI 2	Características análogas al CAERI 1	(Avendaño-Arrazate <i>et al.</i> , 2019)
Regalo de Dios	Similar a los anteriores, con diferencia que es el resultado del mejoramiento genético participativo	(Avendaño-Arrazate, Guillén-Díaz, <i>et al.</i> , 2018)
LACANDÓN	Este clon es de tipo criollo, producto de la selección de clones de variantes criollos del programa de mejoramiento genético en México: posee buen rendimiento y calidad: es una alternativa de renovación para las plantaciones comerciales para calidad de chocolate gourmet.	(Avendaño-Arrazate & Cueto-Moreno, 2018)
Chak	Híbrido, producto de variedades ecuatoriales y mexicanas criollas. Productividad, calidad y resistencia a enfermedades.	(Azpeitia-Morales, 2020 ^a)
Olmecca	Características análogas a Chak	(Azpeitia-Morales, 2020b)

Cabe decir que varios de los clones reportados en el cuadro anterior se encuentran registrados en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales de la SADER (Agricultura, 2022), al igual que otras variedades no expuestas aquí, aunque poco numerosas.

Otros aspectos socioeconómicos. Las desventajas competitivas en el mercado internacional son un factor desfavorable para la producción de este grano (J. Díaz-José *et al.*, 2014), la inexistencia de asesoría para el productor acerca del manejo de la sombra y del control de plagas y enfermedades, la falta de apoyos gubernamentales y la aplicación de políticas públicas que no favorecen a los productores (Díaz-José *et al.* 2014; Hernández-Gómez *et al.* 2015) son otros factores decisivos. Sántiz Tovilla *et*

al. (2023) han revisado a profundidad (17 publicaciones) los factores (y sus interacciones) que limitan a los productores de cacao en el desarrollo de su actividad (producción, transformación y comercialización del cacao en grano y derivados) en México: señalaron que existen al menos 45 factores limitantes en seis ámbitos que afectan al productor; el ámbito más significativo fue “Cultivo y cosecha de cacao” (28 factores relacionados) y los factores “Manejo convencional” y “Enfermedades de las plantaciones” fueron las principales limitantes; además, observaron que el factor “Organización deficiente” limita a los productores en todos los ámbitos analizados; los factores limitantes que poco han sido mencionados aquí y que estos autores rescatan son varios, pero destacan: plantaciones a pequeña escala, mano de obra contratada, falta de capacitación, venta de cacao en baba/baja transformación del cacao/manejo poscosecha deficiente, venta no directa al consumidor, costo de producción/ingresos económicos bajos, poco apoyo de instituciones públicas, invisibilización del trabajo de la mujer/idea de inferioridad en mujeres, reducción del área de la plantación (y minifundios)/cambio de uso del suelo, daños a la salud humana y ambiental, pérdida de identidad colectiva (desterritorialización en sentido más amplio), investigaciones desligadas de la realidad, robo de mazorcas, desvinculación de la iniciativa privada-investigadores-productores, cultura individualista y paternalista, falta de cultura empresarial y falta de credibilidad en las instituciones de investigación. Zepeda Torres & Cruz Morales, (2022) argumentan a profundidad que prácticas clientelistas, paternalistas y de simulación son comunes en una organización de productores de cacao ante las políticas públicas cambiantes (tan comunes en el país) en Maravilla Tenejapa Chiapas; esos resultados naturalmente que pueden ser generalizables a otras organizaciones de esta índole y son aspectos adversos en la producción, pues limitan el alcance real de los programas gubernamentales, de por sí insuficientes. Aunado a lo anterior, la histórica descapitalización del campo, las políticas públicas desfavorables, la pobreza (originada por una crisis sistémica del campo, característica del actual sistema neoliberal), así como el impulso de ciertos cultivos industriales en detrimento de los básicos (y los tradicionales, como el cacao), conllevan a la pérdida de la seguridad alimentaria, sobre todo de las clases sociales más bajas (Flores, 2019).

De igual modo, ello en última instancia impulsó a una migración sistémica en Chiapas (que comienza de forma local, se vuelve interestatal y llega a ser internacional), pero que es aplicable al campo mexicano en general; si bien las consecuencias del CC en el cultivo de café en Chiapas (como se discute más adelante) fueron un factor decisivo, las condiciones estructurales facilitaron tal migración (Villafuerte Solís & García Aguilar, 2014).

En una comunidad de Tabasco, Cuicuilco 2ª sección, debido a muchas de las problemáticas anteriormente mencionadas, solo se alcanzan rendimientos de 96.19 kg ha⁻¹. A los que se agregaron, la contaminación por desechos sólidos (por Petróleos Mexicanos, PEMEX) y los efectos ocasionados por el CC (Méndez Sánchez *et al.*, 2019). También en Tabasco, una encuesta (estratificada por superficie) a 346 productores de cacao encontró que los actores y los aspectos organizacionales están significativamente correlacionados con los indicadores de desempeño; así, 14 de 20 elementos de manejo productivo se correlacionan de manera significativa a indicadores de desempeño con tres elementos: participación en la producción de cacao orgánico, escolaridad del productor y fijación de precios (Vázquez-Navarrete & Sanzidur, 2014).

Desde otra perspectiva, también será necesario tener en consideración las lógicas y tendencias del sistema socio-ecológico debido a que los programas de renovación y rehabilitación de plantaciones casi nunca lo hacen (Somarriba *et al.*, 2021) y es posible que por ende fallen. Al respecto, Chávez-García *et al.* (2012) indican que los huertos familiares (otra forma de SAF) y las parcelas de cultivos anuales en un poblado del plan Chontalpa deben ser considerados en conjunto con los cacaotales o madreños para su entera comprensión.

Harvey *et al.* (2021) han revisado las directrices de SAF café en América: intensificación (mayor uso de agro insumos y variedades resistentes a las enfermedades) e intrusión en bosques nativos, por lo que, es necesario hacer frente a esas tendencias y a las del CC. Se debe tener cuidado que los SAF cacao no caigan en estos puntos críticos. Por ende, resultan necesarios nuevos diseños agroforestales

y mayor vinculación entre los diferentes actores de la cadena de valor (de Sousa *et al.*, 2019; Peña-Aguilar & Bermudez-Peña, 2015; Wiegel *et al.*, 2020).

Fisher-Ortíz *et al.* (2022) han realizado una caracterización de los factores potenciales del sistema socio-ecológico cacaotero para hacer frente a los retos del CC (perspectiva de resiliencia en general). Las fortalezas del sistema son una gran capacidad adaptativa debido a la innovación científica y de los saberes, y que, pese a sus problemáticas, se han tomado diversas acciones, las cuales permiten su reproducción socioecológica (autorregulación). También, señalan las desventajas siguientes: sistema poco rentable, bajo grado de participación juvenil, los actores suelen no cooperar (baja auto organización).

El cacao (neo)criollo se conoce por su alta calidad, el cual presenta granos grandes con cotiledones blancos, que desarrollan una adecuada intensidad aromática durante la poscosecha, debido al alta cantidad de compuestos que originan a los precursores del aroma y sabor a chocolate (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2011). Sin embargo, estos materiales tienen bajo rendimiento y son susceptibles a enfermedades. Por tales razones (y debido a una mayor susceptibilidad a la moniliasis), el cacao criollo está siendo desplazado por variedades de mayor rendimiento y resistentes a enfermedades, aunque de menor calidad (Albores-Flores *et al.*, 2018; Avendaño-Arrazate *et al.*, 2011). Por ende, resulta necesaria la protección de esta invaluable agrobiodiversidad, así como su fomento.

Se debe de tener cuidado de no caer (o continuar el camino) en la mal-adaptación al CC, como sí ha sucedido con los SAF café en Chiapas, como se refiere en el Apéndice 2.

Aunque con menor superficie y cantidad de productores, algo análogo ha sucedido con el cultivo del cacao ante las diferentes emergencias fitosanitarias y crisis que ha tenido (incluida la debida a la moniliasis), que también han producido cambios de actividad y de uso del suelo. En Tabasco la pérdida de superficie fue de cerca de 20 mil ha de un total de aproximadamente 60 mil ha previas a la entrada de la moniliasis, y por lo tanto, se produjo la consecuente deforestación, pérdida de biodiversidad, de suelo y de

medios de vida. Las condiciones socioeconómicas del productor de cacao son similares a las del productor de café; la migración se da sobre todo en territorio nacional (produciendo con ello, como se dijo, una desterritorialización). Además, actualmente existen y han existido programas de mejora genética que han tratado de fortalecer la cuestión parasitológica en cacao (con variedades resistentes a sus enfermedades más importantes); aunque esto (y el intento de incrementar la productividad) también ha reducido el acervo génico (*pool* genético), por lo que la característica genética criolla (variedad de cacao criollo) se ha ido diluyendo (Avendaño-Arrazate *et al.* 2011). Sin olvidar que *M. roreri* afecta con más severidad a variedades con mayor ascendencia criolla y a frutos en etapas juveniles (chilillos). Por otro lado, se simplifican estos SAF (con la esperanza de reducir la incidencia de la moniliasis, sin resultados contundentes, como si sucede con el MIC, pero que es altamente demandante de mano de obra), ante el contexto de la insuficiencia e inconsistencia de apoyos gubernamentales. Si bien existen algunas alternativas para dar mayor valor al cacao, como mercados diferenciados, lo cierto es que estos siguen siendo muy reducidos. Por lo tanto, se debe poner especial atención en no caer en los errores enunciados para el SAF café, incluida la pérdida de los recursos fitogenéticos, medios de vida y biocultura que este importante sistema aún ostenta, pese a todas las limitantes ya mencionadas.

Además, se ha argumentado que el fortalecimiento del capital social de estos sistemas, que actualmente es muy débil (mediante el fomento de la acción colectiva: el trabajo colaborativo y el diálogo de saberes), puede ser una vía más efectiva para fortalecer el cultivo que el atender “el único y principal problema (parasitológico)” que representa la moniliasis (Hes *et al.*, 2018). En otras palabras, que en vez de centrarse en un único problema (la enfermedad: “la punta del *iceberg*”), se deben atender primeramente los demás problemas del subsistema social mediante su fortalecimiento. Los intentos de mejora del cultivo de cacao deberían ser aplicados desde el punto de vista de la transición agroecológica (que bien ha tenido en cuenta el gobierno en turno, pero que es necesario fortalecer) como lo plantean Côte *et al.* (2022).

Un aspecto relevante para destacar es que la resistencia genética a la moniliasis en los materiales mejorados podría mantenerse vigente por más tiempo, en comparación con la roya del cafeto. Esto se debe a que *M. royeri*, se reproduce únicamente por vía asexual (anamorfa), sin que se haya identificado una fase sexual (teleomorfa) que implique recombinación genética (Ali *et al.*, 2015), aunque es posible que dicho hongo genere variabilidad genética mediante otros procesos. Además, en México existe una diversidad genética relativamente baja de *M. royeri* (Rodríguez-Velázquez *et al.*, 2025), en comparación con su centro de origen: Colombia (Ali *et al.*, 2015). Lo que restringe el espectro de resistencia disponible, aunque se puede dar la diseminación de nuevos grupos genéticos. Sin embargo, es importante considerar otro escenario: si se homogeneizan en exceso las variedades cultivadas, la resistencia generada frente a ciertas enfermedades podría volverse vulnerada, tal como ha ocurrido con la roya del cafeto. Esta situación plantea un riesgo latente en contextos de CC, donde la presión de nuevos fitopatógenos, enfermedades y la propia variabilidad ambiental podrían superar las defensas previamente desarrolladas si no se hace una planificación adecuada y a largo plazo.

El caso de las especies de oomicetos que afectan al cacao es diferente, dado que normalmente presentan gran variabilidad genética intra e interespecífica.

4.5.3. Factores parasitológicos: Plagas

A continuación, se ilustran los agentes causales de las principales plagas y enfermedades que afectan el cacao a nivel mundial (Figura 14).

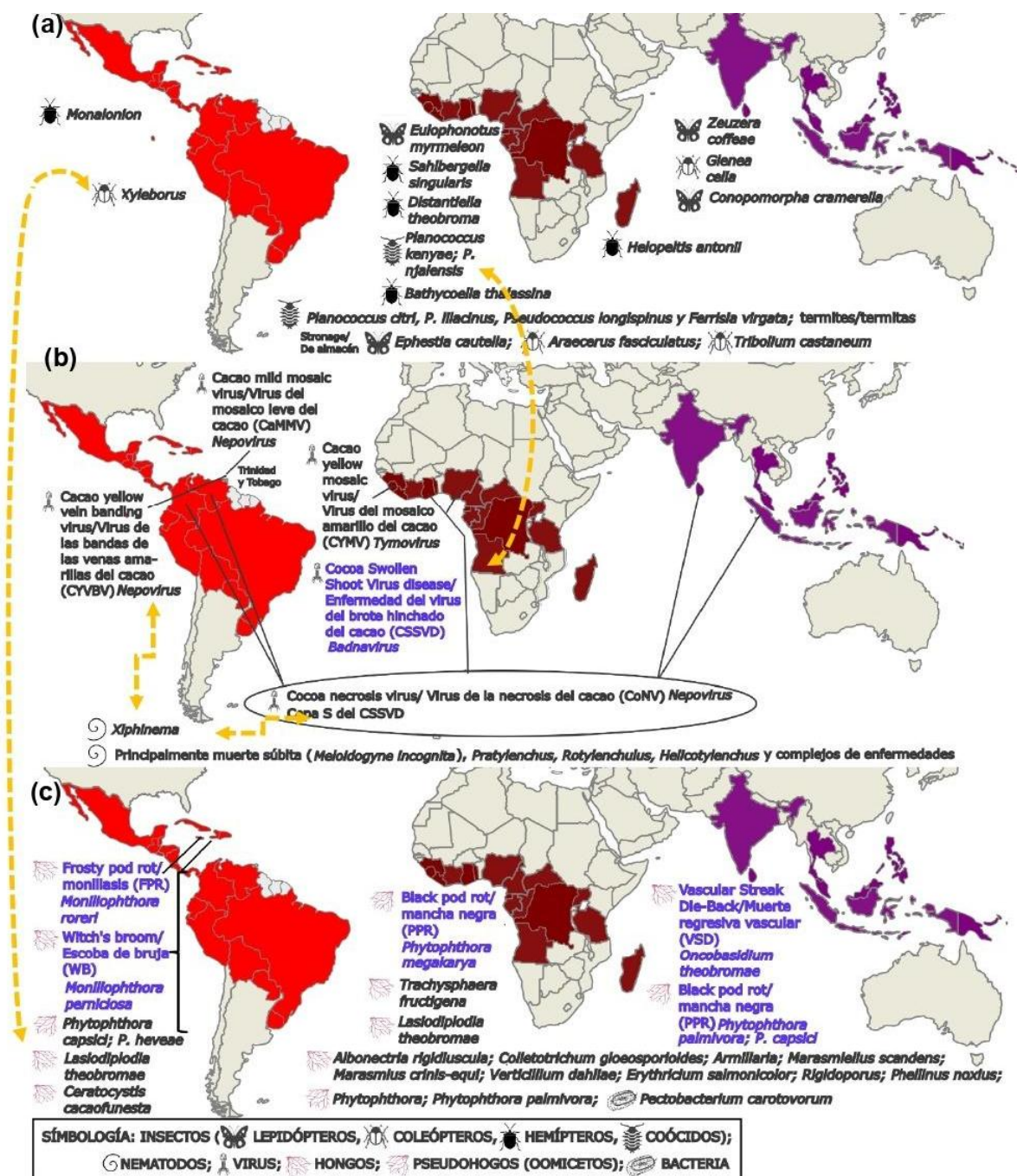


Figura 14. Distribución regional de plagas y enfermedades relevantes del cacao a nivel mundial.

(a) Insectos plaga. (b) Nematodos y enfermedades virales. (c) Otros agentes fitopatógenos. El traslape horizontal de nombres entre regiones indica coocurrencias. Aquellos agentes de mayor importancia regional están en azul. Las líneas y corchetes indican países particulares en donde se presenta la condición respectiva. Las líneas punteadas indican una vectorización confirmada parcial o totalmente. Fuente: elaboración propia con base en CABI (2021), Delgado-Ospina *et al.* (2021), Jung *et al.* (2020), Marelli *et al.* (2019) y Orisajo (2009).

Nótese que la mayor diversidad se encuentra en África occidental y sudeste asiático, las regiones de mayor producción de cacao. Dicho patrón se explica en parte, debido a la forma en que se cultivó el cacao en esos lugares, principalmente como “frentes pioneros”: lugares donde se elimina el bosque tropical natural para aprovechar la fertilidad del bosque a mediano plazo. Con lo cual, nuevos patógenos se adaptaron al cacao mediante saltos de hospedante (afectación de un hospedante que anteriormente no había sido afectado) y, sobre todo, debido a las grandes dimensiones de esas intrusiones (Bailey & Meinhardt, 2016). Además, en esa figura se han incluido algunas vectorizaciones de enfermedades por animales, principalmente nematodos y cochinillas, con el fin de exponer relaciones ecológicas importantes.

En Sudamérica, las dos enfermedades principales son la moniliasis y la escoba de bruja (causada por *Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime & Phillips-Mora), que afectan de manera severa la producción y en condiciones idóneas, cada una tiene la capacidad para destruir el cultivo; las pérdidas estimadas en la producción mundial por estas enfermedades son del 2% y 10%, respectivamente. Por su parte, en África occidental *Phytophthora megakarya* Brasier & M.J.Griffin y el CSSV (causada por *Badnavirus/Nepovirus*) son limitantes serios y expansivos al cultivo. En los territorios insulares y países del sudeste asiático, los principales problemas fitosanitarios del cultivo de cacao están asociados a *Rizoctonia theobromae* (P.H.B.Talbot & Keane) Oberw., R.Bauer, Garnica & R.Kirschner (también referida como *Ceratobasidium theobromae* (P.H.B.Talbot & Keane) Samuels & Keane y *Oncobasidium theobromae* P.H.B.Talbot & Keane), agente causal de la muerte regresiva por estrías vasculares (*Vascular Streak Dieback*, VSD) y a *Phytophthora palmivora* (E.J. Butler) E.J. Butler; esta última es la especie más ampliamente distribuida del género y la responsable de la mazorca negra en esa región (Ortiz-García, 2017). Las pérdidas estimadas en la producción mundial por *R. theobromae* son de 2% y por *Phytophthora* spp. 20%; en Indonesia el barrenador de la mazorca del cacao, *Conopomorpha cramerella* (Snellen), y la mancha negra redujeron dramáticamente la producción de cacao, sobre todo durante la década de 1920; además, otros patógenos reconocidos causan pérdidas

serias a nivel local o pueden causar pérdidas aún mayores en el futuro (Bailey & Meinhardt, 2016; Marelli *et al.*, 2019; Ortiz-García, 2017).

En este contexto global, la introducción a México de nuevas plagas que tengan como hospedante al cacao, puede representar una amenaza a la producción local (Torres-de la Cruz *et al.*, 2019). También, se pueden dar casos de la introducción o resurgencia de nuevas plagas y enfermedades del cultivo, tal como ocurrió en 1991 en Cunduacán y Cárdenas, Tabasco. En donde se observaron poblaciones de una especie de mosca blanca, *Aleurodicus floccissimus* (Martin, Hernández-Suarez & Carnero), sinónimo de *Lecanoideus floccissimus* Martin, Hernández-Suarez & Carnero, la cual había sido registrada con anterioridad en la región; y que, debido a sus bajas poblaciones, pobre distribución y, por ende, poco interés de los productores, no se le dio la importancia respectiva; sin embargo en 1998 ocurrieron brotes importantes que motivaron la solicitud de la intervención gubernamental para su control (Cortéz-Madrigal *et al.*, 2008). Por ello es fundamental identificar, monitorear y determinar los daños causados en las plantaciones por las plagas, así como sus diferentes etapas de vida. De tal modo que se facilite el desarrollo de estrategias de manejo integrado para reducir sus poblaciones (López-Guillén *et al.*, 2020).

De hecho, varias plagas, principalmente insectos, afectan al cacao, pero han sido poco estudiadas (López *et al.*, 2003), entre estas se tienen a las señaladas en la Figura 15, mismas que son comentadas en el Apéndice 1. Algunas de las cuales son registros relativamente nuevos para México (ampliando su distribución geográfica, como sucedió con *Michaeloporus nubilus* (Felder & Rogenhofer), especie monófaga registrada en Sudamérica, detectada en mayo de 2018 en Soconusco según López-Guillén *et al.*, 2020) y otras para el cultivo (salto de huésped, como sucedió con *Trigona fuscipennis* Friese, registrada desde 2018 en Soconusco, como indican López-Guillén *et al.*, 2021) o plagas que han ampliado sus hospedantes (caso de la plaga cuarentenaria de *Maconellicoccus hirsutus* (Green), que se registró por primera vez en cacao en 2018 en Tabasco según Torres-de la Cruz *et al.*, 2019), entre otras.

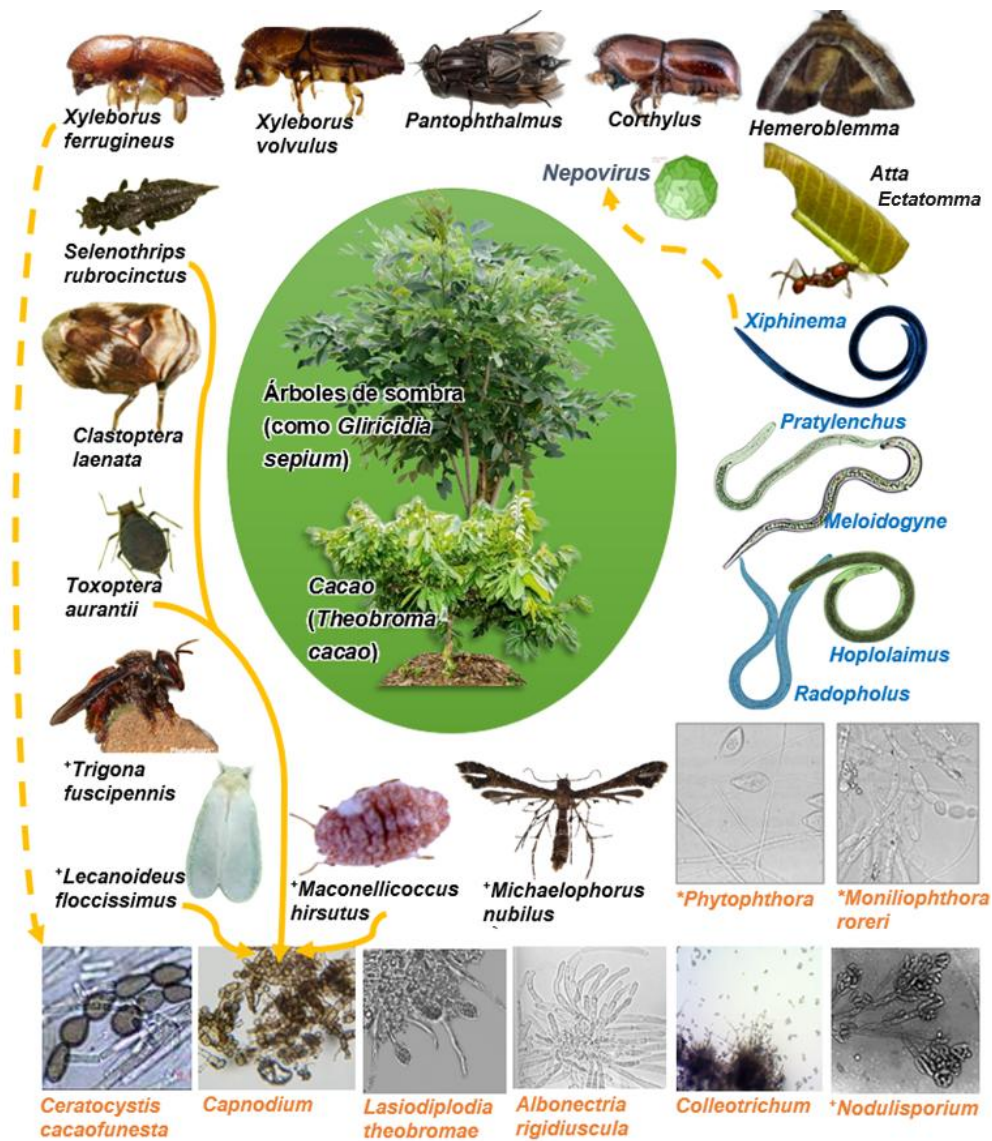


Figura 15. Principales organismos asociados a plagas y enfermedades del cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en México.

Nota: Las flechas punteadas indican procesos de vectorización real o potencial (prácticamente confirmados); las flechas continuas señalan la creación de condiciones idóneas (uso como sustrato). El texto en color negro corresponde a insectos plaga (adultos), en azul a nematodos, y en verde a enfermedades fungosas (fúngicas y pseudofúngicas). El símbolo "+" indica registros nacionales o internacionales posteriores a 1997 que identifican nuevos organismos asociados a cacao.

Fuente: elaboración propia con base en Cibrián T. (2017), Cibrián T. et al. (1995), Cibrián-Tovar et al. (2007), Córdova Ávalos et al. (2001), Cortéz-Madrigal et al. (2008), Gerónimo-López et al. (2013), González-Ruiz et al. (2019), Hernández-Gómez et al. (2015), López-Guillén et al. (2020, 2021), Paladines-Rezabala et al. (2022) y Torres-de la Cruz et al. (2019).

Las ardillas y las aves son otras plagas importantes en algunos lugares, pero son reportadas con poca frecuencia (Castelán-Estrada & Chávez-García, 2019; Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Peña *et al.*, 2015); para controlar daños por aves puede servir el cubrir las mazorcas con diversos materiales (como papel aluminio; Peña *et al.*, 2015), aunque puede ser mejor alternativa el incluir en el diseño agroforestal a árboles que puedan proveer el alimento que estas prefieren.

Además, en Chiapas también se reportan como insectos plaga a *Xyleborus morigerus* Blandford (sinonimia de *Xylosandrus morigerus* (Blandford)), *Hypothenemus birmanus* Wood & Bright, *Corthylus minutissimus* Schedl, *Taurodermus sharpi* Wood e *Hypothenemus interstitialis* Wood & Bright (Hernández-Gómez *et al.*, 2015). La variación en la temperatura o precipitación, de las cuales depende enormemente la ocurrencia de los patógenos, ya sea como consecuencia del CC o como consecuencia del escaso o inadecuado manejo del micrositio (en estructura y composición), puede resultar en cambios en su incidencia y severidad (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; N. Evans *et al.*, 2008). Así pues, el clima, la fructificación del cacao y la presencia de moniliasis condicionan la intensidad epidémica de *Phytophthora capsici* Leonian (Torres-de la Cruz *et al.*, 2023). Por lo anterior es que resulta de gran relevancia el manejo de la sombra y en general, el MIC.

4.5.3. Factores parasitológicos: Enfermedades

Además de sobrellevar y mitigar el CC, la producción agrícola en los trópicos enfrenta tres desafíos principales (Côte *et al.*, 2022): (1) el manejo de la fertilidad del suelo, afectado por el rápido reciclaje de nutrientes, lo que genera suelos sensibles, pobres o degradados; (2) el manejo complejo de plagas y enfermedades, favorecido por un ambiente cálido y húmedo, con baja estacionalidad, que prolonga las condiciones idóneas para el desarrollo de patógenos; y (3) condiciones socioeconómicas desfavorables, marcadas por una creciente demanda de alimentos, distribución desigual y estructuras económicas que limitan el empleo rural. En este apartado, se aborda el manejo de enfermedades, cuya complejidad ha llevado al uso de elementos vegetales combinados para formar barreras naturales (como SAF o policultivos), con

lo que se interrumpe el flujo de fitopatógenos y plagas, con base en principios agroecológicos fundamentales (Côte *et al.*, 2022).

Además del clima y los cambios climáticos, que ayudaron a concluir la poca producción de Colima y Nayarit en México durante el siglo XVI (Machuca Chávez, 2009; Aguilar-González, 2018), las enfermedades (incluso a nivel mundial) han moldeado la distribución actual del cacao, así como su grado de productividad; ello sobre todo debido al ambiente cálido y húmedo donde este cultivo prospera, también idóneo para las enfermedades; de hecho, históricamente estas han sido sus mayores limitantes parasitológicas; sobre todo las de tipo fúngicas y pseudofúngicas (Bailey & Meinhardt, 2016; Díaz-Valderrama *et al.*, 2020; Ploetz, 2007).

Por lo anterior, el rol de los hongos en el cultivo de cacao normalmente se asocia con pérdidas y contaminación de la cosecha; lo que en última instancia afecta la calidad del grano. Sin embargo, los hongos también cumplen un rol benéfico en el ambiente, tales como antagonismo, comensalismo y producción de enzimas (algunas benéficas para el grano). Además, estos están presentes durante toda la cadena de valor del cacao (desde el cultivo hasta el almacenamiento), con las mencionadas funciones en una variedad de rangos ecosistémicos y en asociación con las plantas (Delgado-Ospina *et al.*, 2021). Así, son importantes durante la fermentación, proceso necesario para dar mayor calidad y valor al producto; además, los hongos endofíticos pueden ayudar en el control de algunas enfermedades causadas por hongos fitopatógenos. Con CC se puede agravar la severidad y distribución de los fitopatógenos (Cilas & Bastide, 2020; Ortega Andrade *et al.*, 2017); por ende, las estrategias de mitigación se deben enfocar en reducir la dispersión de los agentes dañinos y preservar a los benéficos (Delgado-Ospina *et al.*, 2021).

También, se han reportado nuevos registros de enfermedades del fruto de cacao, que pueden confundirse con sus enfermedades más comunes, como sucedió con *Nodulosporium* en Soconusco en 2019 (González-Ruiz *et al.*, 2019). Además, dichos autores también identificaron a *Trichoderma*, un agente antagonístico de micoparasitismo o de biocontrol de otros hongos, como la moniliasis (Cuervo-Parra *et al.*, 2011; López-Ferrer *et al.*, 2017; Reyes-Figueroa *et al.*, 2016; Romero-Cortes *et al.*, 2015); género

que ha sido usado con tales fines en programas gubernamentales estatales de sanidad vegetal en Chiapas y Tabasco (CESAVE Chiapas, 2022; CESVETAB, 2022).

Aunado a las enfermedades, la disponibilidad de nutrientes es otro factor que condiciona el amarre de chilillos (*Cherelle Wilt Disease*: muerte temprana del fruto, condición fisiológica para autorregular la producción), que se diferencia de las enfermedades fúngicas por su temprana aparición (antes del amarre) y la ausencia de micelio en los chilillos, que se tornan completamente negros tras su secado (Bailey & Meinhardt, 2016). Además de la moniliasis y la mancha negra, que se comentan más adelante, entre las principales enfermedades del cacao reportadas para México se encuentran las que se enlistan en la Figura 15 y en el Apéndice 1. Estas enfermedades afectan a cultivos perennes o árboles de sombra comúnmente asociados al cacao, así como a cultivos tropicales y subtropicales que suelen encontrarse de forma contigua a estos SAF como los cítricos (*Citrus* spp.), el plátano (*Musa* spp.), el café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner), el mango (*Mangifera indica* L.), el hule (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.), entre otros—. En consecuencia, se configura un patosistema complejo, en el que las enfermedades se comparten entre los componentes arbóreos y los cultivos adyacentes, lo que plantea desafíos adicionales para su manejo fitosanitario.

Otros agentes causales de enfermedades, mucho menos citados en la literatura, incluyen varios de los 18 hongos fitopatógenos del cacao estudiados por Cuervo-Parra et al. (2011). Estos autores evaluaron *in vitro* el antagonismo —incluido el micoparasitismo— de *Trichoderma harzianum* Rifai frente a dichos fitopatógenos, todos ellos aislados de frutos de cacao (entre los que se encontraba *M. roreri*); en concreto, sin contar a los que ya se han mencionado, reportaron a: *Phytophthora megasperma* Drechsler, *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., *Fusarium caeruleum* Lib. ex Sacc. (sinonimia de *Fusarium coeruleum* Lib. ex Sacc.), *Fusarium fujikuroi* Nirenberg (sinonimia de *Fusarium verticillioides* (Sacc.) Nirenberg), *Corynespora cassicola* (Berk. & M.A. Curtis) C.T. Wei, *Curvularia lunata* (Wakker) Boedijn (sinonimia de *Cochliobolus lunatus* R.R. Nelson & F.A. Haasis), *Curvularia hawaiiensis* (Bugnic. ex M.B. Ellis) Manamgoda, L. Cai & K.D. Hyde, *Paecilomyces variotii* Bainier (sinonimia

de *Byssochlamys spectabilis* (Udagawa & Shoji Suzuki) Houbraken & Samson), *Paecilomyces niveus* Stolk & Samson (sinonimia de *Byssochlamys nivea* Westling), *Penicillium chrysogenum* Thom, *Penicillium expansum* Link, *Rhizopus arrhizus* A. Fisch. (sinonimia de *Rhizopus oryzae* Went & Prins. Geerl.), *Neurospora crassa* Shear & B.O. Dodge y *Aspergillus niger* Tiegh. Tales autores reportaron una inhibición del crecimiento micelial de cerca del 11 al 85% por *T. harzianum*. En tanto que González-Ruiz *et al.* (2019), además de *Nodulosporium*, identificaron morfológicamente cepas correspondientes a algunos de los géneros mencionados anteriormente en Soconusco, Chiapas: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* y *Trichoderma*.

Moniliasis

La moniliasis, enfermedad que afecta principalmente al fruto joven del cacao o “chilillo” (Bailey *et al.*, 2018), se mantuvo durante décadas como una amenaza externa para la producción cacaotera de México. Originaria de Sudamérica, donde había causado impactos históricos significativos, esta enfermedad no había sido registrada en territorio mexicano hasta el año 2005, cuando se confirmó su presencia en Pichucalco, Chiapas (Phillips-Mora *et al.*, 2006). De 2005 a 2013, se registró la mayor caída de la producción en la historia reciente (ver Figura 5), la cual se le atribuyó a dicha enfermedad y a algunos factores socioeconómicos de los productores y el deficiente e inadecuado manejo agroforestal que efectuaban; los cuales en conjunto propiciaron su diseminación rápida y fluida (Hernández-Gómez, 2014; Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2018). Entre esos factores se encuentran la avanzada edad de las plantaciones, así como su relativa homogeneidad genética y la diseminación antropogénica (ropa de los trabajadores). Durante ese periodo se pusieron en juego la economía familiar, el arraigo cultural, las funciones ecosistémicas y todas las demás externalidades de los SAF. Las condiciones adversas citadas propiciaron que algunas familias abandonaran el cultivo por desinterés debido a los altos costos que implicaba mantener las plantaciones y los exiguos ingresos que se obtenían, así como la gran complejidad del problema que enfrentaban, lo que condujo a ubicar a la moniliasis como el principal factor parasitológico que ha influido en la pérdida de producción y biodiversidad del cacao en Chiapas (Hernández-Gómez,

2014) y en Tabasco (Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2018), aunado a la amenaza a la sustentabilidad del sistema entero (Priego-Castillo *et al.*, 2009). La pérdida de la biodiversidad de cacao se dio en parte, por dicho desinterés y por la desatención de su cultivo debido a la baja rentabilidad y a la complejidad de sobrellevar el problema del manejo de las enfermedades, aunado al hecho de que las variedades criollas son más susceptibles a la moniliasis (Albores-Flores *et al.*, 2018). Aunque el mejoramiento genético puede reducir esa diversidad genética, es necesario para poder afrontar esa problemática. Ello mediante la mejora genética de los materiales: resistencia a las enfermedades, mejora de la calidad del grano y rendimiento; al igual que resulta necesaria su disposición en viveros locales y el fomento de la adopción de esos materiales (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2013), así como la enseñanza práctica de su propagación (Córdova-Avalos *et al.*, 2016; Zequeira-Larios *et al.*, 2012). Las alternativas para su manejo se señalan más adelante. El descopado también se ha mostrado efectivo en lidiar con el problema de la moniliasis (Hernández-Escobar *et al.*, 2020). En suma, se hace evidente la necesidad de un adecuado manejo agroforestal (Torres-de-la-Cruz *et al.*, 2018) para rescatar el cultivo del abandono.

Entre países y regiones, la cuarentena de la moniliasis es recomendable; un factor de riesgo especial es la larga vida de las esporas; los factores de dispersión por mazorca son altos y por semilla y esqueje son moderados (End *et al.*, 2017).

Mancha negra

Por otro lado, la mancha negra es una enfermedad causada por especies oomicetes-pseudofúngicas fitopatógenas del género *Phytophthora* (Marelli *et al.*, 2019). Se distribuyen en las tres grandes zonas cacaoteras del mundo (América, África y Asia-Oceanía) y constituyen, a ese mismo nivel, la enfermedad que provoca más pérdidas en volumen de producción: 20% (Delgado-Ospina *et al.*, 2021); al menos una de sus especies se encuentra en los principales países productores como fitopatógeno de importancia; también, presenta un espectro amplio de hospedantes: afecta a más de 23 familias (CABI, 2021; Surujdeo-Maharaj *et al.*, 2016). Esta especie infecta al fruto del cacao, le produce una mancha negra o café oscuro (pudrición) sin bordes irregulares en gran parte de su superficie, a la vez que se liberan micotoxinas que

perjudican la calidad del producto final (de forma similar a la moniliasis). Además, provoca mermas en el rendimiento del grano (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Hernández-Gómez *et al.*, 2015); y, en condiciones idóneas, causa la muerte de plántula en vivero, así como muerte descendente y canchales en plantas adultas; una vez establecida, es difícil de erradicar (Acebo-Guerrero *et al.*, 2012; Surujdeo-Maharaj *et al.*, 2016). En México, se ha indicado que esta enfermedad también se presenta de manera importante, por ejemplo con la especie *P. capsici-Phytophthora tropicalis* Aragaki & J.Y. Uchida (Chávez-Ramírez *et al.*, 2021). De hecho, en 109 encuestas y visitas realizadas en 45 localidades de ocho municipios de las regiones Norte y Soconusco de Chiapas se encontró en casi las mismas parcelas donde se presentaba *M. roreri*, pero con menor frecuencia (70%) y por lo general su severidad era menor. Por lo anterior, se trata de la segunda enfermedad de mayor importancia en México (Hernández-Gómez *et al.*, 2015).

Se han realizado algunas revisiones sobre la diversidad de especies de mancha negra (Bailey *et al.*, 2013; Chávez-Ramírez *et al.*, 2021) y sobre las alternativas de su manejo a nivel mundial (Acebo-Guerrero *et al.*, 2012; Surujdeo-Maharaj *et al.*, 2016): tales estrategias incluyen el control químico, métodos de control cultural y fitosanitario (principalmente la remoción continua de frutos infestados), resistencia genética y control biológico; el control químico es el que ha resultado más efectivo para México, el cual consiste en la aspersión de oxiclورو de cobre, caldo bordelés (sulfato de cobre y cal, en proporción 1:1 de peso) o cupravit (400 g por cada 100 litros de agua, aunque de forma menos costo-eficiente), y de forma opcional, algún adherente. Ello debe realizarse cada 20 días, solo durante la época lluviosa y de forma preventiva (Alcalá-Álvarez, 1982; Córdova Ávalos *et al.*, 2001). Una alternativa como agente de biocontrol de la mancha negra del cacao (y también de la moniliasis) es la bacteria *Paenibacillus polymyxa* (Prazmowski) Ash *et al.* (cepa NMA1017), la cual ya ha sido probada *in vitro* e *in vivo* (con reducciones de la incidencia de 86 a 33% y de la infección de 68 a 6% en campo): esta especie presenta un efecto inhibitorio del crecimiento de *P. tropicalis*, pues rompe su pared celular y produce enzimas hidrolíticas (Gómez-de la Cruz *et al.* 2023).

El Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), organismo fitosanitario del gobierno mexicano, en torno a fitopatógenos del cacao, considera a *Moniliophthora perniciosa* (SENASICA, 2019b) y *Phytophthora palmivora* (SENASICA, 2019d) como enfermedades de vigilancia epidemiológica sanitaria (SENASICA, 2019c). Lo mismo ocurre con las plagas mosca del mediterráneo, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (SENASICA, 2010) y cochinilla rosada del hibisco, *M. hirsutus* (SENASICA, 2019a). Además, se ha evidenciado la idoneidad climática de enfermedades entre países, que implica riesgo de dispersión, incluidas las especies *M. roreri* y *M. perniciosa*, así como la existencia de regiones con mayores condiciones idóneas para los patógenos: en México existe mayor probabilidad de presencia de *M. roreri* en Chiapas, especialmente en el Soconusco y de *M. perniciosa* en la Península de Yucatán, aunque comparativamente inferior que *M. roreri* (Másmela-Mendoza, 2019).

4.6. Conclusión

La interacción entre el CC, que puede alterar las condiciones fisiológicas óptimas para el cacao y amplificar la severidad y amplitud de su patosistema (plagas y enfermedades), y los desafíos socioeconómicos, como la desorganización y la falta de políticas públicas efectivas, crea un sistema vulnerable que requiere enfoques integrales para su fortalecimiento. Condiciones que hacen más desafiante el manejo agronómico del cultivo. Por ejemplo, además de la moniliasis y la mancha negra, nuevas plagas y enfermedades se han presentado en el país, algunas de las cuales han ampliado su rango de hospedantes o han afectado al cacao por primera vez, lo cual se argumentó como consecuencias directas del cambio ambiental global, incluyendo el CC. El riesgo de introducción de nuevas plagas y enfermedades, especialmente desde países con mayor intercambio geográfico y comercial, subraya la urgencia de estrategias preventivas y de monitoreo de tales agentes de riesgo potencial.

El MIC, basado en principios agroecológicos, emerge como una alternativa viable que no solo mejora los rendimientos y reduce la incidencia de enfermedades, sino que también puede potenciar los servicios ambientales y socioeconómicos de estos

sistemas. De igual modo, se identificaron alternativas prácticas para el manejo de las principales enfermedades del cacao, algunas de las cuales pueden incorporarse al MIC, mientras que otras requieren ser fortalecidas mediante investigación adicional.

Para superar estas limitantes, el fortalecimiento del capital social y la acción colectiva, a través del diálogo de saberes y la vinculación multiactoral (entre productores, investigadores e instituciones), se perfilan como estrategias prioritarias para superar algunas de las limitantes estructurales más básicas y fomentar la innovación. Las políticas públicas deberían fortalecer aún más la transición agroecológica, por ejemplo, mediante el fomento de mercados especializados de forma generalizada (ya que en la práctica solo benefician a un número reducido de productores), así como el pago por servicios ambientales y la preservación del legado cultural que el cacao soporta. Ello con fines de garantizar la viabilidad económica y cultural del sistema cacao. Para lo cual, las respuestas institucionales efectivas ante brotes emergentes o reemergentes de especies fitopatogénicas agresivas como la roya del cafeto o la moniliasis, así como de plagas, serán decisivas.

Además, en un contexto de cambio ambiental global, la adaptación al CC y la gestión efectiva del patosistema requieren un equilibrio entre conocimiento local y científico, con lo que se asegure que las soluciones sean contextualmente relevantes, y sobre todo, consistentes a largo plazo.

La comparación con la mal-adaptación al CC en SAF de café en Chiapas, donde la deforestación y simplificación de los sistemas y la homogeneización genética han hecho más vulnerables a esos SAF, ofrece lecciones críticas e incluso análogas para el caso del cacao. Evitar estrategias que prioricen soluciones de corto plazo, como la reducción de la diversidad en los SAF o el uso excesivo de agroquímicos, es fundamental para preservar los servicios ecosistémicos y la agrobiodiversidad asociada a los SAF cacao, especialmente de variedades de ascendencia criolla.

Esta revisión pone de manifiesto que el futuro del cultivo de cacao en México depende de una visión holística que vaya más allá de las soluciones técnicas o sociales de forma aislada. Al priorizar la organización comunitaria, la agroecología (incluyendo el

manejo integrado) y la conservación de la agrobiodiversidad, es posible transformar las limitantes en oportunidades para revitalizar el sistema cacaotero. Lo que a su vez permitiría potencial el rol multifuncional y la relevancia como estrategia de mitigación y adaptación al CC de los SAF cacao en las regiones de trópico húmedo.

4.7. Literatura citada

- Acebo-Guerrero, Y., Hernández-Rodríguez, A., Heydrich-Pérez, M., El Jaziri, M., & Hernandez-Lauzardo, A. N. (2012). Management of black pod rot in cacao (*Theobroma cacao* L.): A review. *Fruits*, 67(1), 41–48. <https://doi.org/10.1051/fruits/2011065>
- Agbenyo, W., Jiang, Y., Jia, X., Wang, J., Ntim-Amo, G., Dunya, R., Siaw, A., Asare, I., & Twumasi, M. A. (2022). Does the adoption of climate-smart agricultural practices impact farmers' income? Evidence from Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), Article 3804. <https://doi.org/10.3390/ijerph19073804>
- Agricultura. (2022). *Catálogo nacional de variedades vegetales (en línea): Cacao*. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SN DecimallCS), Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/snics/articulos/catalogo-nacional-de-variedades-vegetales-en-linea?idiom=es>
- Aguilar Gallegos, N. (2015). *Análisis de redes sociales aplicado a los procesos de innovación agrícola* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional UACH. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/60>
- Aguilar Gallegos, N., Muñoz Rodríguez, M., Santoyo Cortés, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013). Influencia del perfil de los productores en la adopción. *Teuken Bidikay - Revista Latinoamericana de Investigación en Organizaciones, Ambiente y Sociedad*, 4(4), 207–228.
- Albores Flores, V. J. L., Gómez Rodríguez, L., López García, J. A., & Grajales Conesa, J. (2022). Mecanismos de infección endógena en frutos de cacao con *Moniliophthora roreri*. *Polibotánica*, 53(53), 197–209. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.13>
- Albores-Flores, V. J., Adriano-Anaya, M. D. L., Gutiérrez-Aguilar, E., Coronel N., R., & Salvador-Figueroa, M. (2015). Formulación de Bio-100 para la producción de fenoles de frutos de cacao. En *XXVII Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco; IV Congreso Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical* (pp. 545–552).
- Albores-Flores, V. J., García-Guzmán, G., Espinosa-García, F. J., & Salvador-Figueroa, M. (2018). Degree of domestication influences susceptibility of *Theobroma cacao* to frosty pod rot: A severe disease devastating Mexican cacao. *Botanical Sciences*, 96(1), 84–94. <https://doi.org/10.17129/botsoci.1793>

- Alcalá-Álvarez, A. (1982). *Problemática del cacao en el estado de Chiapas, México* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara].
- Ali, S. S., Shao, J., Strem, M. D., Phillips-Mora, W., Zhang, D., Meinhardt, L. W., & Bailey, B. A. (2015). Combination of RNAseq and SNP nanofluidic array reveals the center of genetic diversity of cacao pathogen *Moniliophthora roreri* in the upper Magdalena Valley of Colombia and its clonality. *Frontiers in Microbiology*, 6, Article 850. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00850>
- Arenas-Arcia, J. L. (2013). *Estimación de carbono orgánico del suelo en los agroecosistemas caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) y cacao (Theobroma cacao)* [Tesis de maestría tecnológica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo]. Repositorio Colposdigital. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2146>
- Attolini Lecón, A. (2011). Cuentas, dares y tomares del cacao: Delicia, convite, rito mesoamericano. *Aspectos Antropológicos. Revista Digital Universitaria*, 12(4), 3–21. <https://www.revista.unam.mx/vol.12/num4/art38/art38.pdf>
- Avendaño-Arrazate, C. H., & Cueto-Moreno, J. (2018). “Lacandón”: Nuevo clon de cacao criollo (*Theobroma cacao* L.) mexicano. *Agro Productividad*, 11(9), 169–171.
- Avendaño-Arrazate, C. H., Guillén-Díaz, S., & Hernández-Gómez, E. (2018). “Regalo de Dios”: Clon de cacao (*Theobroma cacao* L.) tolerante a *Moniliophthora roreri* Cif & Par, para la renovación de zonas cacaoteras de México. *Agro Productividad*, 11(9), 173–176. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1233>
- Avendaño-Arrazate, C. H., Hernández-Gómez, E., Solís-Bonilla, J. L., Cueto-Moreno, J., & Zamarripa-Colmenero, A. (2019). “CAERI 1” and “CAERI 2”, nuevos clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agro Productividad*, 12(8), 73–77. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1392>
- Avendaño-Arrazate, C. H., López-Gómez, P., Iracheta-Donjuan, L., Vázquez-Ovando, A., Bouchan, R., Cortés-Cruz, M., & Borrayo, E. (2018). Diversidad genética y selección de una colección núcleo para la conservación a largo plazo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Interciencia*, 43(11), 770–777.
- Avendaño-Arrazate, C. H., Mendoza-López, A., Hernández-Gómez, E., López-Guillén, G., Martínez-Bolaños, M., Caballero-Pérez, J. F., Guillén-Díaz, S., & Espinosa-Zaragoza, S. (2013). Mejoramiento genético participativo en cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agro Productividad*, 6(5), 71–80.
- Avendaño-Arrazate, C. H., Villarreal-Fuentes, J. M., Campos-Rojas, E., Gallardo-Méndez, R. A., Mendoza-López, A., Aguirre-Medina, J. F., Sandoval-Esquivez, A., & Espinosa-Zaragoza, S. (2011). *Diagnóstico del cacao en México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232186/Diagnostico_del_cacao_en_mexico.pdf
- Azpeitia M., A., Mirafuentes H., F., & Ramos M., G. (2015). Caracterización morfológica del híbrido de cacao H-275 para resistencia a moniliasis y alto rendimiento. En *XXVII Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco; IV Congreso Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical* (pp. 545–552).

- Azpeitia-Morales, A. (2020a). Chak, nuevo híbrido mexicano de cacao (*Theobroma cacao* L.) de alto rendimiento y calidad. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(2), 239–241.
- Azpeitia-Morales, A. (2020b). Olmeca: Híbrido de cacao para alto rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(8), 1999–2003.
- Bailey, B. A., Crozier, J., Sicher, R. C., Strem, M. D., Melnick, R., Carazzolle, M. F., Costa, G. G. L., Pereira, G. A. G., Zhang, D., Maximova, S., Guiltinan, M., & Meinhardt, L. (2013). Dynamic changes in pod and fungal physiology associated with the shift from biotrophy to necrotrophy during the infection of *Theobroma cacao* by *Moniliophthora roreri*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 81, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2012.11.005>
- Bailey, B. A., Evans, H. C., Phillips-Mora, W., Ali, S. S., & Meinhardt, L. W. (2018). *Moniliophthora roreri*, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology*, 19(7), 1580–1594.
- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (Eds.). (2016). *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Ballesteros Possú, W., Ordóñez Jurado, H. R., Gangotena Rosero, E. J., & Zamudio Salas, M. A. (2007). Implementación de un modelo agroecológico de aprovechamiento de las unidades productivas de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el municipio de Maravilla Tenejapa, estado de Chiapas, México. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 24(1–2), 33–45.
- Brito-Vega, H., Espinosa-Victoria, D., Salaya-Domínguez, J. M., & Gómez-Méndez, E. (2013). La biota del suelo: Importancia en sistemas agroforestales y agrícolas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(3), 445–453.
- Bunn, C., Läderach, P., Quaye, A., Muilerman, S., Noponen, M. R. A., & Lundy, M. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services*, 16, Article 100123. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123>
- CABI. (2021). *Fotoguía de plagas, enfermedades y desórdenes del cacao*. Commonwealth Agricultural Bureaux International. <https://www.plantwise.org/FullTextPDF/2021/20217800019.pdf>
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A. T. y Díaz-Echeverría, V. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269–284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- Castelán-Estrada, M., & Chávez-García, E. (2019). Evaluación campesina del manejo agroecológico de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 12(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1438>
- CESAVE Chiapas. (2022). *Manejo fitosanitario del cacao: Campaña fitosanitaria*. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Chiapas. https://cesavechiapas.org.mx/sitio/p_mfc.php

- CESVETAB. (2022). *Manejo fitosanitario del cacao*. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Tabasco. <https://cesvetab.mx/mfcacao/>
- Chávez García, E. (2012). *Percepción de la pobreza y formas de vida en comunidades campesinas de la Chontalpa, Tabasco, México* [Tesis de doctorado, Universidad Internacional de Andalucía].
- Chávez-García, E., Stephan, R., & Galmiche-Tejeda, Á. (2012). Lógica de manejo del huerto familiar en el contexto del impacto modernizador en Tabasco, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 9(68), 177–200.
- Chávez-Ramírez, B., Rodríguez-Velázquez, N. D., Chávez-Sánchez, M. E., Vásquez-Murrieta, M. S., Hernández-Gallegos, M. A., Velázquez-Martínez, J. R., Avendaño-Arrazate, C. H., & Estrada-de los Santos, P. (2021). Morphological and molecular identification of *Phytophthora tropicalis* causing black pod rot in Mexico. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 43(5), 670–679. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1870003>
- Cilas, C., & Bastide, P. (2020). Challenges to cocoa production in the face of climate change and the spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10(9), Article 1232. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Claus, G., Vanhove, W., Van Damme, P., & Smagghe, G. (2018). Challenges in cocoa pollination: The case of Côte d'Ivoire. En *Pollination in plants* (pp. 39–58). InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75361>
- Córdova Ávalos, V., Sánchez Hernández, M., Estrella Chulím, N. G., Macías Layalle, A., Sandoval Castro, E., Martínez Saldaña, T., & Ortiz García, C. F. (2001). Factores que afectan la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el ejido Francisco I. Madero del Plan Chontalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 34(17), 93–100.
- Córdova-Avalos, V., Guerrero-Peña, A., Bucio-Galindo, A., Córdova-Avalos, A., Hinojosa-Cuéllar, J. A., Izquierdo-Reyes, F., & Hernández-Echeverría, C. (2016). Escuela de producción orgánica de cacao criollo (*Theobroma cacao* L. var. Carmelo), en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 9(12), 63–67.
- Cortéz-Madrigal, H., Martínez-López, M. C., Reyes-Izquierdo, F., & Ortega-Arenas, L. D. (2008). Primer registro de *Lecanoideus floccissimus* (Hemiptera: Aleyrodidae) en cacao de Tabasco, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 34(1), 33–40. <https://doi.org/10.25100/socolen.v34i1.9248>
- Côte, F. X., Rapidel, B., Sourisseau, J. M., Affholder, F., Andrieu, N., Bessou, C., Caron, P., Deguine, J.-P., Faure, G., Hainzelin, E., Malezieux, E., Poirier-Magona, E., Roudier, P., Scopel, E., Tixier, P., Toillier, A., & Perret, S. (2022). Levers for the agroecological transition of tropical agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), Article 67. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00799-z>
- Cuadros Cagua, T. A. (2017). El cambio climático y sus implicaciones en la salud humana. *Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 159. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-40.ccis>
- Cuervo-Parra, J. A., Ramírez-Suero, M., Sánchez-López, V., & Ramírez-Lepe, M. (2011). Antagonistic effect of *Trichoderma harzianum* VSL291 on phytopathogenic fungi isolated from cocoa (*Theobroma cacao* L.) fruits. *African*

- Journal of Biotechnology*, 10(52), 10657–10663.
<https://doi.org/10.5897/ajb11.1333>
- De la Cruz-Ricardez, D., Lagunes-Espinoza, L. C., Ortiz-García, C. F., & Pablo-Pérez, M. (2016). Actividad antifúngica *in vitro* del extracto acuoso y alcaloideo de *Lupinus* spp. sobre *Moniliophthora roreri*. *Agro Productividad*, 9(12), 3–9.
<https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/853/717>
- De la Cruz-Ricardez, D., Ortiz-García, C. F., Lagunes-Espinoza, L. del C., & Torres-de la Cruz, M. (2020). Efecto antifúngico *in vitro* de extractos metanólicos de *Capsicum* spp. en *Moniliophthora roreri*. *Agrociencia*, 54(6), 813–824.
- de Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*, 9(1), Article 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>
- Del Carmen Carrada Figueroa, G., Leal Ascencio, J., Jiménez Sastré, A., & López Álvarez, J. (2014). Transmisión de leishmaniasis cutánea asociada con plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*) en Tabasco. *Gaceta Médica de México*, 150(6), 499–508.
https://www.anmm.org.mx/GMM/2014/n6/GMM_150_2014_6_499-508.pdf
- Delgado-Ospina, J., Molina-Hernández, J. B., Chaves-López, C., Romanazzi, G., & Paparella, A. (2021). The role of fungi in the cocoa production chain and the challenge of climate change. *Journal of Fungi*, 7(3), Article 202.
<https://doi.org/10.3390/jof7030202>
- Gómez-López, A., Martínez-Bolaños, L., Ortiz-Gil, G., Martínez-Bolaños, M., Avendaño-Arrazate, C. H., & Hernández-Meneses, E. (2020). Bioaceites esenciales inhiben a *Moniliophthora roreri* (Cif. y Par.) Evans et al., causante de la moniliasis en el cultivo del cacao. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 6, E0061016.
https://www.researchgate.net/publication/344635733_Bioaceites_esenciales_inhiben_a_Moniliophthora_roreri
- Díaz José, Ó. (2013). *Sistemas específicos de innovación: El caso del cacao en el Soconusco, Chiapas* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo]. CUESTAAM. <https://ciestaam.edu.mx/publicacion/sistemas-especificos-innovacion-caso-del-cacao-en-soconusco-chiapas/>
- Díaz-José, J., Díaz-José, O., Mora-Flores, S., Rendón-Medel, R., & Tellez-Delgado, R. (2014). Cacao in Mexico: Restrictive factors and productivity levels. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(4), 397–403.
<https://doi.org/10.4067/S0718-58392014000400004>
- Díaz-José, O., Aguilar-Ávila, J., Rendón-Medel, R., & Santoyo-Cortés, V. H. (2013). Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria*, 40(2), 279–289. www.rcia.uc.cl
- Díaz-José, Ó., Porras-Umaña, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013a). *El cacao (Theobroma cacao): Avances y retos en la gestión de la innovación* (Col. Trópi, Vol. 1). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la

- Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/285>
- Díaz-José, Ó., Porras-Umaña, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013b). *El cacao (Theobroma cacao): Avances y retos en la gestión de la innovación* (Col. Trópi, Vol. 1). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/285>
- Díaz-Valderrama, J. R., Leiva-Espinoza, S. T., & Catherine Aime, M. (2020). The history of cacao and its diseases in the Americas. *Phytopathology*, 110(10), 1604–1619. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0178-RVW>
- End, M. J., Daymond, A. J., & Hadley, P. (Eds.). (2017). *Directrices técnicas para el movimiento seguro del germoplasma de cacao* (Tercera actualización). Global Cacao Genetic Resources Network (CacaoNet). www.cacaonet.org
- Espinosa-García, J. A., Uresti-Gil, J., Vélez-Izquierdo, A., Moctezuma-López, G., Inurreta-Aguirre, H. D., & Góngora-González, S. F. (2015). Productividad y rentabilidad potencial del cacao (*Theobroma cacao* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(5), 1052–1063. <http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/598>
- Evans, H. C., & Waller, J. M. (2010). Globalisation and the threat to biosecurity. En *The role of plant pathology in food safety and food security* (pp. 53–72). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8932-9>
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M. A., Gladders, P., & Fitt, B. D. L. (2008). Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5(24), 525–531. <https://doi.org/10.1098/rsif.2007.1136>
- FAO. (2021). *Climate-smart agriculture case studies 2021: Projections from around the world*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb5359en>
- FAO. (2022). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Fisher-Ortiz, R. A., Rodríguez-Robles, U., Aldasoro-Maya, E. M., Soto-Pinto, M. L., & Chávez-García, E. (2022). Sistemas agroforestales de cacao y resiliencia: Factores potenciales ante el cambio climático en México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2), Article 4121. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4121>
- Flores, M. de L. (2019). Los alcances en la producción agrícola chiapaneca. Una reflexión sobre la soberanía alimentaria en la región. *Región y Sociedad*, 31, Article e1177. <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1177>
- Fuentes Aguilar, L. (1977). El estado como organizador del espacio: El Plan Chontalpa, un ejemplo. *Investigaciones Geográficas*, 8(5), 67–82. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111977000100005&lang=es
- Galindo, L. M., Samaniego, J., Alatorre, J. E., & Carbonell, J. F. (2014). *Reflexiones metodológicas del análisis del cambio climático*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Naciones Unidas.

- Gómez-de la Cruz, I., Chávez-Ramírez, B., Avendaño-Arrazate, C. H., Morales-García, Y. E., Muñoz-Rojas, J., & Estrada-de los Santos, P. (2023). Optimization of *Paenibacillus* sp. NMA1017 application as a biocontrol agent for *Phytophthora tropicalis* and *Moniliophthora roreri* in cacao-growing fields in Chiapas, Mexico. *Plants*, 12(12), 2336. <https://doi.org/10.3390/plants12122336>
- González-Ruiz, A., Sánchez-Arizpe, A., Ochoa-Fuentes, Y. M., Galindo-Cepeda, M. E., Rodríguez Guerra, R., & Flores Torres, L. M. (2019). Primer informe de *Nodulosporium* (Xylariaceae) en *Theobroma cacao* L. en Chiapas, México y pruebas de patogenicidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 779–789. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1657>
- Harvey, C. A., Pritts, A. A., Zwetsloot, M. J., Jansen, K., Pulleman, M. M., Armbrrecht, I., Avelino, J., Barrera, J. F., Bunn, C., Hoyos García, J., Isaza, C., Muñoz-Ucros, J., Pérez-Alemán, C. J., Rahn, E., Robiglio, V., Somarriba, E., Valencia, V., Somarriba, E., & Valencia, V. (2021). Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(4), Article 62. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0>
- Hernández-Escobar, C., López-Báez, O., Ramírez-González, S., Espinosa-Zaragoza, S., & Perezgrovas-Garza, R. (2020). Manejo sustentable de la moniliasis del cacao mediante poda de descopado en Comalcalco, Tabasco. En F. Sánchez Gutiérrez, R. Monroy Hernández, Á. Sol Sánchez, F. Guevara Hernández, R. Valdivia Alcalá, A. Gómez Vázquez, & A. Bautista Gálvez (Eds.), *La investigación agropecuaria como aporte al uso de tecnologías sustentables* (pp. 89–94). Facultad Maya de Estudios Agropecuarios, Universidad Autónoma de Chiapas.
- Hernández-Gómez, E. (2014). *Diagnóstico fitosanitario de cacao (Theobroma cacao L.) en Chiapas* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados].
- Hernández-Gómez, E., Garrido-Ramírez, E. R., Solís-Bonilla, J. L., Avendaño-Arrazate, C. H., Ramírez-Guillermo, M. A., Nava-Díaz, C., & Hernández-Morales, J. (2016). Incidencia y severidad de moniliasis y mancha negra en el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el estado de Chiapas, México. En J. Martínez-Herrera, M. A. Ramírez-Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Innovación tecnológica para la seguridad alimentaria* (pp. 239–241). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillen, G., Garrido-Ramírez, E. R., & Romero-Nápoles, J. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 232–246. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61242145008>
- Hernández-Gómez, E., López-Navarrete, M. C., Garrido-Ramírez, E. R., Solís-Bonilla, J. L., Zamarripa-Colmenero, A., Avendaño-Arrazate, C. H., & Mendoza-López, A. (2012). Las moniliasis (*Moniliophthora roreri* Cif & Par) del cacao: Búsqueda de estrategias del manejo. *Agro Productividad*, 5(6), 3–8. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/416>

- Hes, T., Mintah, S., Sulaiman, H., Banda Arrieta, J. S., Ramírez Esquivel, J., Martínez Saldaña, T., & Aguirre López, J. M. (2018). The falling production of Mexican cacao analyzed through the lens of Mincerian earnings function in the context of social capital of smallholders. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCUYO*, 50(1), 185–202.
- Higuera-Ciapara, I. (Ed.). (2015). *Hacia dónde va la ciencia en México: Ecosistemas, plagas y cambio climático* (1a ed.). Centro Geo; CONACYT; Academia Mexicana de Ciencias A.C.; Consejo Consultivo de Ciencias.
- ICCO. (2012). *The world cocoa economy: Past and present*. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/EX-146-7-World-Cocoa-Economy-2012-edited-1.pdf>
- IPCC. (2023). *AR6 synthesis report: Climate change 2023*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jiggins, J. (2014). Agroecology: Adaptation and mitigation potential and policies for climate change. En *Global environmental change* (pp. 733–743). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5784-4_123
- Jiménez-Pérez, A., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., & de la Rosa-Manzano, E. (2019). Effect of canopy management in the water status of cacao (*Theobroma cacao*) and the microclimate within the crop area. *Botanical Sciences*, 97(4), 701–710. <https://doi.org/10.17129/botsci.2256>
- Jumiyati, S., Hadid, A., Toknok, B., Nurdin, R., & Paramitha, T. A. (2021). Climate-smart agriculture: Mitigation of landslides and increasing of farmers' household food security. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 708(1), Article 012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/708/1/012073>
- Jung, J. M., Byeon, D. hyeon, Kim, S. H., Sunghoon-Jung, & Lee, W. H. (2020). Estimating economic damage to cocoa bean production with changes in the spatial distribution of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in response to climate change. *Journal of Stored Products Research*, 89, Article 101681. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101681>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(1), Article 5. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Larrondo-Posadas, L. G. (2017). *Evaluación inicial de la sustentabilidad de la producción de cacao en Tacotalpa, Tabasco y Pichucalco, Chiapas* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. RU DGB UNAM. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000754708
- Leandro-Muñoz, M. E., & Cerda, R. (2021). *Guía para el manejo integrado de enfermedades en el cultivo de cacao* (Serie técn., Vol. 1). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10918>
- López, A. P., Delgado Núñez, V. H., Azpeitia Morales, A., López Arroyo, J. I., Jiménez Chong, J. A., Flores Rodríguez, A., Fraire Sierra, L., & Castañeda Ceja, R. (2003). *El cacao en Tabasco: Manejo y producción* (2a ed.). Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco.

- 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
- López-Cruz, A., Soto-Pinto, L., Salgado-Mora, M. G., & Huerta-Palacios, G. (2021). Simplification of the structure and diversity of cocoa agroforests does not increase yield nor influence frosty pod rot in El Soconusco, Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems*, 95(1), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00574-7>
- López-Ferrer, U. del C., Brito-Vega, H., López-Morales, D., Salaya-Domínguez, J. M., & Gómez-Méndez, E. (2017). Papel de *Trichoderma* en los sistemas agroforestales-cacaotal como un agente antagónico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1), 91–100.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93950595003>
- López-Guillén, G., Hernández-Baz, F., González, J. M., Arrazate, C. H. A., & Báez, M. A. (2020). First record of the cacao plume moth *Michaelophorus nubilus* (Felder & Rogenhofer) (Lepidoptera: Pterophoridae) in Mexico. *Revista Brasileira de Entomologia*, 64(4), Article e20200076. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-rbent-2020-0076>
- López-Hernández, J. G., López-Hernández, L. E., Avendaño-Arrazate, C. H., Aguirre-Medina, J. F., Espinosa-Zaragoza, S., Moreno-Martínez, J. L., Mendoza-López, A., & Suárez-Venero, G. M. (2018). Biología floral de cacao (*Theobroma cacao* L.); criollo, trinitario y forastero en México. *Agro Productividad*, 11(9), 129–135.
- López-Juárez, S. A., Sol-Sánchez, Á., Córdova-Ávalos, V., & Gallardo López, F. (2016). Efecto de la poda en plantaciones de cacao en el estado de Tabasco, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Publicación Especial, 2807–2815.
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), Article 20190104. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Marelli, J. P., Guest, D. I., Bailey, B. A., Evans, H. C., Brown, J. K., Junaid, M., Barreto, R. W., Lisboa, D. O., & Puig, A. S. (2019). Chocolate under threat from old and new cacao diseases. *Phytopathology*, 109(8), 1331–1343.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-18-0477-RVW>
- Marín Olán, P. (2022). *Y llegaron las panzonas: Ensayo regresivo sobre la ganadería bovina en Tabasco, 2015-1949*. <https://doi.org/10.19136/book241>
- Martínez Becerra, A. (2006). El desarrollo rural local en una zona cacaotera de Tabasco, México: Propuesta de un modelo de innovación. En *X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos* (pp. 1–12).
- Martínez-Salvador, L. E., & Martínez-Salvador, C. (2020). Innovación social en organizaciones cacaoteras en Tabasco, México. Aproximaciones desde la

- gobernanza y la participación femenina en la agricultura. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(55), Article e20939. <https://doi.org/10.24836/es.v30i55.939>
- Másmela-Mendoza, J. E. (2019). Distribución potencial y nicho fundamental de *Moniliophthora* spp. en cacao de América y África. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 659–679. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35038>
- Mehl, J., Wingfield, M. J., Roux, J., & Slippers, B. (2017). Invasive everywhere? Phylogeographic analysis of the globally distributed tree pathogen *Lasiodiplodia theobromae*. *Forests*, 8(5), Article 145. <https://doi.org/10.3390/f8050145>
- Méndez Sánchez, J. A., López Hernández, E. S., & López Martínez, S. (2019). Deficiencia productiva del sistema cacao, a causa de PEMEX: Percepción o realidad. *Journal of Basic Sciences*, 5(15), 124–133. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
- Morán Villa, V. L. (2022). *Contribución al estudio de captura y emisión de gases de efecto invernadero (C y N) en sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao L.) en México* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio UACH. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/9d5dafad-de84-4be0-8a81-6ebfd371a8cb>
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Márquez-Berber, S. R., & Valdés-Velarde, E. (2022). Composición florística y arreglo de sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(67), Article 3840. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3840>
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Mata-González, R., Márquez-Berber, S. R., Abdallah, M. A. B., Valdes-Velarde, E., & Hernández-Sánchez, R. (2024). Above-ground biomass estimation by developing allometric equations for *Theobroma cacao* in Tabasco, Mexico. *Agroforestry Systems*, 98(3), 537–549. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00928-x>
- Newell, G. E., Reyes-Escutia, F. de J., Bolom-Martínez, S. del C., & Gutiérrez-Gallegos, E. U. (2021). La bebida pozol de cacao en su presencia en el carnaval zoque de San Fernando, Chiapas: Un análisis biocultural con reflexiones para la sociedad contemporánea. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 31(57), Article 1089. <https://doi.org/10.24836/es.v31i57.1089>
- Nicholls, C., Ríos, L., & Altieri, M. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7–20. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921>
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15(10), Article 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- Notaro, M., Deheuvels, O., & Gary, C. (2022). Participative design of the spatial and temporal development of improved cocoa agroforestry systems for yield and

- biodiversity. *European Journal of Agronomy*, 132, Article 126395. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126395>
- Ochoa-Fonseca, L. E., Ramírez-González, S. I., López-Báez, O., Espinosa-Zaragoza, S., Alvarado-Gaona, Á. E., & Álvarez-Siman, F. (2017). Control *in vivo* de *Moniliophthora roreri* en *Theobroma cacao*, utilizando polisulfuro de calcio y silicosulfocálcico. *Ciencia y Agricultura*, 14(2), 59–66. <https://doi.org/10.19053/01228420.v14.n2.2017.7149>
- Olusayo Okeniyi, M., Seun Okeniyi, T., & Bolanle Mustopha, F. (2021). Effects of climate change on pests and diseases, its awareness and adaptation strategies among cocoa farmers in Abia State. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 10(3), 061–068. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.10.3.0227>
- Oporto-Peregrino, S., Hidalgo-Mihart, M. G., Collado-Torres, R. A., Castro-Luna, A. A., Gama-Campillo, L. M., & Arriaga-Weiss, S. L. (2020). Effects of land tenure and urbanization on the change of land use of cacao (*Theobroma cacao*) agroforestry systems in southeast Mexico. *Agroforestry Systems*, 94(3), 881–891. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00453-w>
- Orisajo, B. S. (2009). Nematodes of cacao and their integrated management. En *Integrated management of fruit crops nematodes* (pp. 119–134). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9858-1_5
- Oropeza Orozco, O., Cram Heydrich, S., & Fernández Lomelín, M. del P. (2016). Panorama general de las inundaciones. En O. Moncada Maya & Á. López López (Coords.), *Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea* (pp. 191–204). Instituto de Geografía, UNAM.
- Ortiz-García, C. F. (2017). Situación de las enfermedades del cacao y manejo en México, en presencia de moniliasis. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35(Suplemento), S3–S4. https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/simposia/Simp osio_Cacao_CF_Otiz_Garcia.pdf
- Ortíz-García, C. F., Torres-de-la-Cruz, M. y Hernández-Mateo, S. (2015). Comparación de dos sistemas de manejo del cultivo de cacao en presencia de *Moniliophthora roreri* en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 191–196. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.2.191>
- Peña L., J., Azpeitia M., A., & Arias de los Santos, G. (2015). Influencia de las aves en la disminución del rendimiento del cacao y estrategias para prevenir sus daños. En *XXVII Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco; IV Congreso Internacional en Producción Agroalimentaria Tropical* (pp. 553–558).
- Peña-Aguilar, J. M., & Bermudez-Peña, C.-P. (2015). Vinculación universidad-empresa. Innovación para la diversificación de mercados en cacao. *Revista Iberoamericana de Contaduría, Economía y Administración*, 4(7).
- Pérez Sosa, E., & Granados Ramírez, G. R. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, 3, 39–67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>

- Pérez-De La Cruz, M., Sánchez-Soto, S., Ortiz-García, C. F., Zapata-Mata, R., & De La Cruz-Pérez, A. (2007). Diversidad de insectos capturados por arañas tejedoras (Arachnida: Araneae) en el agroecosistema cacao en Tabasco, México. *Biological Control*, 36(1), 090–101.
- Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C. F., López, A. P., Hernández, J., & Aime, M. C. (2006). First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot (moniliasis disease) of cocoa in Mexico. *Plant Pathology*, 55(4), 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01418.x>
- Pinkus-Rendón, M. J., & Contreras-Sánchez, A. (2012). Impacto socioambiental de la industria petrolera en Tabasco: El caso de la Chontalpa. *LiminaR*, 10(2), 122–144. <https://liminar.cesmecha.mx/index.php/r1/article/view/99/86>
- Ploetz, R. C. (2007). Cacao diseases: Important threats to chocolate production worldwide. *Phytopathology*, 97(12), 1634–1639. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1634>
- Priego-Castillo, G. A., Galmiche-Tejeda, A., Castelán-Estrada, M., Ruiz-Rosado, O., & Ortiz-Ceballos, A. I. (2009). Evaluación de la sustentabilidad de dos sistemas de producción de cacao: Estudios de caso en unidades de producción rural en Comalcalco, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 25(1), 39–57. <https://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v25n1/v25n1a3.pdf>
- Quiroz-Antúnez, U. G., Monterroso-Rivas, A. I., Calderón-Vega, M. F., & Ramírez-García, A. G. (2022). Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja*, 36(2), 1–15. <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>
- Ramírez Martínez, M. Á. (2021). Migración y desterritorialización: El caso de los productores de cacao de la Chontalpa tabasqueña. En A. V. Parra González (Ed.), *Políticas públicas en defensa de la inclusión, la diversidad y el género III: Migraciones y derechos humanos* (1a ed., pp. 607–615). Ediciones Universidad de Salamanca. <https://doi.org/10.14201/0AQ0298>
- Ramírez-González, M. B., Cely-Niño, V. H., & Ramírez, S. I. (2013). Actividad antioxidante de clones de cacao (*Theobroma cacao* L.) finos y aromáticos cultivados en el estado de Chiapas, México. *Perspectivas en Nutrición Humana*, 15(1), 27–40.
- Ramírez-Martínez, M. Á. (2007). Los productores de cacao de pequeña escala en el contexto de la globalización. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas*, 13(37), 103–112.
- Reyes-Figueroa, O., Ortiz-García, C. F., La Cruz, M. T. De, Lagunes-Espinoza, L. D. C., & Valdovinos-Ponce, G. (2016). Especies de *Trichoderma* del agroecosistema cacao con potencial de biocontrol sobre *Moniliophthora roreri*. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2), 149–163. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.08.036>
- Ríos-Bolívar, F. M., Garruña, R., Rivera-Hernández, B., Herrera, A., & Tezara, W. (2022). Effect of high concentrations of CO₂ and high temperatures on the physiology of Mexican cocoa. *Plant Stress*, 6, Article 100114. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100114>

- Rivera-Aguirre, D. A., Ortiz-Acosta, M. A., Bernal-Mendoza, H., Sánchez-Rojas, G., Ramírez-Bravo, O. E., & Jiménez-García, D. (2021). Impacto del cambio climático en la distribución potencial de tres cultivos agrícolas en México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 7(1), Article E0071015. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071015>
- Rivera-Torrez, D. L., Lagunes-Gálvez, L. M., Azpeitia-Morales, A., & García-Alamilla, P. (2022). Reproductive and morphological phenology of eight Mexican cacao clones (*Theobroma cacao* L.). *Agro Productividad*, 15(8), 157–167. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2204>
- Rodríguez-Velázquez, N. D., Fernández-Pavía, S. P., Pineda-Vaca, D., Tlacuilo-Cano, J.-D., López-Guillén, G., Chávez-Ramírez, B., & Estrada-de los Santos, P. (2025). Genetic diversity of *Moniliophthora roreri* from cacao trees growing in the Soconusco area, Chiapas, Mexico. *Plant Disease*, 109(6), 1303–1313. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-24-0873-RE>
- Romero-Cortes, T., López-Pérez, P. A., Ramírez-Lepe, M., & Cuervo-Parra, J. A. (2015). Modelado cinético del micoparasitismo por *Trichoderma harzianum* contra *Cladosporium cladosporioides* aislado de frutos de cacao (*Theobroma cacao*). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 32(3), 32–45.
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabral, L. del C., Martínez-Sánchez, J. L., Sánchez-Hernández, R., & Valdés-Velarde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques*, 25(1), Article e2511638. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Salvador-Morales, P., Martínez-Sánchez, J. L., Cámara Cabral, L., & Zequeira Ramos, C. (2020). Estructura y carbono específico en una cronosecuencia de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 26(3), Article e2632131. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632131>
- Salvatore, M. M., Andolfi, A., & Nicoletti, R. (2020). The thin line between pathogenicity and endophytism: The case of *Lasiodiplodia theobromae*. *Agriculture (Switzerland)*, 10(10), Article 488. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100488>
- Santa Cruz De León, E. E. (2007). *Las transformaciones económicas de la agricultura de exportación del Soconusco, en la segunda mitad del siglo XX* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo].
- Sántiz Tovilla, R., Nadal, A., Salvatierra Izaba, B., Nazar Beutelspacher, D. A., & Bello Baltazar, E. (2023). Análisis de los factores que limitan a los pequeños productores en el desarrollo de la actividad cacaotera en México. *Agroalimentaria*, 29(56), 39–63. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.338855>
- Santos-Hernández, A. F., Monterroso-Rivas, A. I., Granados-Sánchez, D., Villanueva-Morales, A., & Santacruz-Carrillo, M. (2021). Projections for Mexico's tropical rainforests considering ecological niche and climate change. *Forests*, 12(2), Article 119. <https://doi.org/10.3390/f12020119>
- Schroth, G., Garcia, E., Griscom, B. W., Teixeira, W. G., & Barros, L. P. (2016). Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará.

- Sustainability Science*, 11(2), 277–293. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0330-8>
- SENASICA. (2010). *Ficha técnica. Ceratitis capitata (Wiedemann). Mosca del mediterráneo*. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. [http://www.cesavep.org/descargas/MNF/08_FichaT_Ceratitis capitata.pdf](http://www.cesavep.org/descargas/MNF/08_FichaT_Ceratitis CAPITATA.pdf)
- SENASICA. (2019a). *Cochinilla rosada del hibisco. Maconellicoccus hirsutus Green, 1908* (Ficha Técnica No. 6).
- SENASICA. (2019b). *Escoba de bruja del cacao. Moniliophthora perniciosa (Stahel) Aime* (Ficha Técnica No. 04).
- SENASICA. (2019c). *Manual técnico operativo de vigilancia epidemiológica fitosanitaria*. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Accion operativa/Manual operativo/Manual operativo VEF 2019.pdf>
- SENASICA. (2019d). *Pudrición del cogollo. Phytophthora palmivora (E. J. Butler) E. J. Butler* (Ficha Técnica No. 51).
- SIAP. (2022). *Datos abiertos: Estadística de producción agrícola*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Silva Pérez, R. (2010). Multifuncionalidad agraria y territorio: Algunas reflexiones y propuestas de análisis. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales (EURE)*, 36(109), 5–33. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612010000300001>
- Somarriva, E., Peguero, F., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., López-Sampson, A., Leandro-Muñoz, M. E., Jagoret, P., & Sinclair, F. L. (2021). Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), Article 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9>
- Suárez, G. M., Florido Bacallao, R., Soto Carreño, F., & Caballero Núñez, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 30–37.
- Suárez-Venero, G. M., Avendaño-Arrazate, C. H., Ruíz-Cruz, P. A., & Estrada-de los Santos, P. (2019). Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco Chiapas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(3), 315–332. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.12.093>
- Surujdeo-Maharaj, S., Sreenivasan, T. N., Motilal, L. A., & Umaharan, P. (2016). Black pod and other *Phytophthora* induced diseases of cacao: History, biology, and control. En B. A. Bailey & L. W. Meinhardt (Eds.), *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters* (pp. 213–266). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_7
- Tamayo España, L. E., Ramírez González, S. I., López Báez, O., Quiroga Madrigal, R. R., & Espinosa Zaragoza, S. (2016). Extractos por destilación de *Origanum vulgare*, *Tradescantia spathacea* y *Zingiber officinale* para el manejo de

- Moniliophthora roreri* de *Theobroma cacao*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(5), 1065–1076.
- Tirado-Gallego, P. A., Lopera-Álvarez, A., & Ríos-Osorio, L. A. (2016). Estrategias de control de *Moniliophthora roreri* y *Moniliophthora perniciosa* en *Theobroma cacao* L.: Revisión sistemática. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 417–430. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:517
- Torres de la Cruz, M., Ortiz García, C. F., Téliz Ortiz, D., Mora Aguilera, A., & Nava Díaz, C. (2011). Temporal progress and integrated management for frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*) of cocoa in Tabasco, México. *Journal of Plant Pathology*, 93(1), 31–36. <https://doi.org/10.4454/jpp.v93i1.270>
- Torres-de la Cruz, M., De-la Cruz Pérez, A., Pérez-de la Cruz, M., & Ortiz-García, C. F. (2019). Registro y descripción del daño de la cochinilla rosada del hibisco, *Maconellicoccus hirsutus* Green (Hemiptera: Pseudococcidae), en *Theobroma cacao* L., en Tabasco, México. *Revista Chilena de Entomología*, 45(1), 157–163. www.biotaxa.org/rce. ISSN0718-8994
- Torres-de la Cruz, M., Mora-Aguilera, G., Ortiz-García, C. F., Gaspar-Génico, J. Á., Pérez-de la Cruz, M., & Acencio-Castillo, N. (2023). Climate, fruiting and frosty pod rot influence the epidemic intensity of *Phytophthora capsici* in cacao plantations in Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 41(1), 26–44. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2210-3>
- Torres-de la Cruz, M., Ortiz García, C. F., Téliz Ortiz, D., Mora Aguilera, A., & Nava Díaz, C. (2013). Efecto del azoxystrobin sobre *Moniliophthora roreri*, agente causal de la moniliasis del cacao (*Theobroma cacao*). *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31(1), 65–69. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61230974007>
- Torres-de-la-Cruz, M., Guillén González, C. A., Ortiz-García, C. F., De-la-Cruz-Pérez, A., Luna Rodríguez, M., & Cappello García, S. (2018). Hongos asociados al patosistema cacao en el estado de Tabasco, México. En J. Martínez Herrera, M. Á. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria* (1a ed., pp. 216–220). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://archivos.ujat.mx/2019/div-daca/publicacion/ICASegAlim.pdf>
- Torres-de-la-Cruz, M., Quevedo-Damián, I., Ortiz-García, C. F., Lagúnez-Espinoza, L. C., Nieto-Angel, D., & Pérez-de la Cruz, M. (2019). Control químico de *Moniliophthora roreri* en México. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 21(2), 55–61.
- Triano-Sánchez, A., Palma-López, D. J., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., & Córdova Ávalos, V. (2016). Nutrición orgánica en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 9(12), 39–44.
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., & Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el Plan Chontalpa, Tabasco. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 2(1), 53–71. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5680>

- Troya Guerrero, G., & Pino Meléndez, V. E. (2023). Microbiota asociada a plantaciones agroforestales de cacao y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 24–33. <https://orcid.org/0000-0003-0986-1651>
- Vanhove, W., Yao, R. K., N'Zi, J.-C., N'Guessan Toussaint, L. A., Kaminski, A., Smagghe, G., & Van Damme, P. (2020). Impact of insecticide and pollinator-enhancing substrate applications on cocoa (*Theobroma cacao*) cherelle and pod production in Côte d'Ivoire. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 293, Article 106855. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106855>
- Vázquez-Navarrete, C. J., & Rahman, S. (2014). Productivity management analysis of cacao agro-food system in Tabasco, Mexico: An application of the “fitness” approach. *International Journal of Food and Agricultural Economics*, 2(2), 49–64. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.168578>
- Villafuerte Solís, D., & García Aguilar, M. del C. (2014). Tres ciclos migratorios en Chiapas: Interno, regional e internacional. *Migración y Desarrollo*, 12(22), 3–37.
- Wiegel, J., del Río, M., Gutiérrez, J. F., Claros, L., Sánchez, D., Gómez, L., González, C., & Reyes, B. (2020). *Coffee and cacao market systems in the Americas: Opportunities for supporting renovation and rehabilitation*. International Center for Tropical Agriculture (CIAT).
- Zepeda Torres, A. (2021). *Adaptación de la organización rural a las políticas públicas, estudio de caso: “Alianza de Cacaoteros de la Selva” durante el período 2005-2020 en Amatitlán, Maravilla Tenejapa* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo].
- Zepeda Torres, A., & Cruz Morales, J. (2022). Praxis política y estrategias de adaptación: Una mirada desde la Alianza de Cacaoteros de la Selva. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 17, Article e-604. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2022.v17.604>
- Zequeira-Larios, C., Nisao-Ogata, A., Gama-Campillo, L., & Brown, D. (2012). Escuelas de campo para agricultores en cultivo de cacao en México. *KUXULKAB´*, 18(34), 95–102.

CAPÍTULO 5. DIAGNÓSTICO AGRARIO Y MULTIFUNCIONALIDAD DE UNIDADES PRODUCTIVAS QUE INCLUYEN CACAO EN EL SOCONUSCO, CHIAPAS, MÉXICO⁵

5.1. Resumen

En México, el cacao (*Theobroma cacao* L.) es un cultivo tradicional con importancia multifuncional por su carácter agroforestal e histórico-biocultural. Sin embargo, su rol complementario en unidades productivas con una lógica de agricultura familiar ha sido poco estudiado en el país, incluso en Chiapas. Este trabajo buscó diagnosticar razonadamente unidades productivas que incluyen cacao en el Soconusco, la principal región cacaotera de Chiapas. También, se buscó caracterizar la multifuncionalidad de esas unidades. Se utilizó el diagnóstico agrario y el análisis de innovaciones agrícolas. Los instrumentos empleados fueron: revisión de literatura, entrevistas semiestructuradas y encuestas. Se seleccionaron a nueve productores con diferentes niveles de manejo y tipo de sistema agroforestal de los municipios Huixtla, Tuzantán, Huehuetán y Villa Comaltitlán. La multifuncionalidad se caracterizó con el método de análisis multicriterio (MCDA) de suma ponderada e información de campo. Los resultados mostraron diferencias en ingreso agrícola y sistemas productivos, con el cacao en un rol económico equivalente o secundario frente a cultivos como palma africana, mango, café robusta, ganadería y apicultura; la unidad productiva más multifuncional fue aquella que incluyó cacao (1 hectárea) y ganadería (6 hectáreas); en contraste, el sistema agroforestal más multifuncional fue un policultivo tradicional con manejo integrado (1.25 hectáreas). En varias unidades familiares los apoyos gubernamentales representaron más del 50% de los ingresos, especialmente en productores adultos mayores y parcelas de mayor superficie. Finalmente, se discutió la relevancia de los sistemas agroforestales para la sostenibilidad y la multifuncionalidad agraria del Soconusco, así como la necesidad de políticas públicas apropiadas para ello.

Palabras clave: diagnóstico socioeconómico y productivo; historia agrícola; regionalización agrícola; análisis multicriterio; territorialidad productiva; geografía rural.

5.2. Abstract

In Mexico, cacao (*Theobroma cacao* L.) is a traditional crop with multifunctional significance due to its agroforestry, and historical-biocultural roles. However, its complementary role in productive systems within the framework of family farming remains insufficiently studied in the country, even in Chiapas. This study aimed to systematically diagnose productive units that incorporate cacao in Soconusco, one of the main cacao-growing regions in Chiapas, while characterizing their multifunctionality.

⁵ Sometido a: *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*.
Estado: Sometido.

An agrarian diagnosis and an innovation analysis were conducted, employing literature review, semi-structured interviews, and surveys. Nine producers with varying management levels and agroforestry system types from the municipalities of Huixtla, Tuzantán, Huehuetán, and Villa Comaltitlán were selected. Multifunctionality was assessed using the weighted sum method of multi-criteria decision analysis (MCDA) alongside field data. Results revealed differences in agricultural income and livelihoods, with cacao playing an equivalent or secondary economic role compared to oil palm, mango, robusta coffee, livestock, and beekeeping. The most multifunctional productive unit combined cacao (1 hectare) with livestock (6 hectare), whereas the most multifunctional agroforestry system was a traditional polyculture with integrated management (1.25 hectare). Additionally, government subsidies represented over 50% of the income for family units, particularly older farmers, or larger landholdings. Finally, the study discusses the significance of these agroforestry systems in fostering sustainability and agrarian multifunctionality in Soconusco, underscoring the need for appropriate public policies to support these practices.

Keywords: agricultural history; agricultural regionalization; multi-criteria analysis; productive and socioeconomic diagnosis; productive territoriality; rural geography.

5.3. Introducción

Actualmente la sociedad está adoptando una visión más consciente y exigente hacia una agricultura más sostenible, por lo que esta debe tornarse cada vez más multifuncional (Leroux *et al.*, 2022). Así pues, la **multifuncionalidad agraria o agrícola** se refiere a los diversos roles que desempeña la agricultura⁶ más allá de la simple producción de alimentos e insumos agroindustriales y divisas (función económico-productiva), abarcando también funciones ambientales, sociales y culturales (bienes “no comerciales”), lo que se denomina como externalidades (como la provisión de servicios ambientales, patrimonio cultural y espacios recreativos); esa multifuncionalidad se vincula directamente con el enfoque territorial, en el sentido de que los espacios de cultivo ahora se conciben como estructurantes territoriales y sustentadores de recursos patrimoniales y paisajísticos (Cairol *et al.*, 2009; Silva Pérez, 2010), que influyen en la dinamización de las economías locales y en las estructuras sociales (pues favorecen la reproducción social familiar y local, así como

⁶ Agricultura en sentido amplio: el sector primario como tal; esto es, agricultura, silvicultura, horticultura y actividades conexas que dependen de la tierra (Vejre *et al.*, 2007).

los medios de vida rurales); de igual modo, la agricultura constituye una estrategia de ocupación y apropiación del territorio, donde los productores articulan conocimiento local, gestión de recursos y manejo agrícola (Silva, 2015).

La multifuncionalidad agraria cobra especial relevancia en los sistemas agroforestales⁷ (SAF), sistemas complejos que integran (espacial o temporalmente) árboles, cultivos y/o animales en una misma unidad productiva; y que se entienden, por lo tanto, como unidades paisajísticas integradas, que potencian los servicios ambientales, la resiliencia del paisaje y la biodiversidad, al tiempo que mantienen sus funciones primarias o económico-productivas (Leroux *et al.*, 2022; Vejre *et al.*, 2007). Por ende, los SAF representan estrategias para la sostenibilidad del medio y el desarrollo rurales (Cairol *et al.*, 2009; Lundgren, 1987). Además, la agricultura implica una interacción con diferentes industrias (conexión intersectorial), que crea una red compleja de interacciones que interrelacionan el territorio (Silva, 2015). Así pues, de lo anterior emerge que actualmente los espacios rurales ya no solo sean vistos como espacios de mera producción agropecuaria, sino como organismos sociales complejos; lo que reconoce las intrincadas relaciones sociales, de producción y consumo que definen su territorio y su vínculo con la agricultura en general y con la de tipo familiar en particular (Silva, 2015); esta última, es de hecho, la que predomina en el país y se expresa más plenamente en su parte centro-sureste.

Por su parte, los SAF que incluyen cacao (*Theobroma cacao* L.) son fundamentales en México, Centro y Suramérica debido a su multifuncionalidad; por ejemplo, por su riqueza biocultural y su aporte a la agrobiodiversidad; que, para el caso de Mesoamérica data de las culturas olmeca y maya hasta la actualidad (Nájera-Conrado, 2011). En el Soconusco, la segunda región cacaotera más importante (por superficie y volumen de producción) del país y la principal en Chiapas, estos SAF destacan por

7 Agroforestería: sistemas y prácticas agrícolas de uso de la tierra donde plantas leñosas perennes se siembran deliberadamente en la misma unidad de tierra junto con cultivos agrícolas, ya sea con o sin animales, en combinaciones espaciales o en secuencia temporal (Lundgren, 1987); o bien, el uso del mismo espacio (agrícola) para una multitud de tareas agrícolas y obtención de beneficios (bienes y servicios), de forma ordenada en el tiempo y el espacio (Casanova-Lugo *et al.*, 2016).

su multifuncionalidad, al combinar funciones de producción de diferentes especies (de cacao y cultivos complementarios, incluidas ornamentales, frutales y maderables), en una misma unidad productiva; de igual modo, estos SAF proveen servicios ambientales como biodiversidad y captura de carbono (Suárez-Venero *et al.*, 2019), al igual que beneficios sociales, incluida la generación de empleo (familiar o contratado), la subsistencia o seguridad alimentaria familiar y la preservación de saberes locales, entre otras (Arias González, 2014; Fisher-Ortíz *et al.*, 2022). Como sistemas socioecológicos, los SAF con cacao, que en el país principalmente se dan en esquemas de agricultura familiar y de subsistencia, articulan conocimientos tradicionales, al tiempo que modelan patrones espaciales y relaciones ecológicas (Fisher-Ortíz *et al.*, 2022), con lo que configuran paisajes que reflejan una territorialidad propia (Rueda Vázquez & Vidal Fócil, 2022).

Por otro lado, los sistemas de cultivo (incluidos los SAF) por lo regular no se comprenden al nivel de unidad productiva (UP) —sistemas agrícolas, ganaderos y forestales de un mismo productor— y bajo una lógica de agricultura familiar o campesina (Cochet & Devienne, 2013): esto es, no hay una comprensión sobre la forma en que los agricultores complementan (económica y funcionalmente) sus sistemas de cultivo con sus otros sistemas; incluso, la falta de claridad en esa complementariedad casi siempre condiciona la incidencia de los programas de extensión (Somarriba *et al.*, 2021). Tal es el caso del cacao, que pese a su relevancia en los términos multidimensionales mencionados, su rol como componente complementario en UP ha sido escasamente estudiado en Chiapas con el enfoque enunciado, incluso en regiones emblemáticas como el Soconusco.

Este estudio buscó realizar un diagnóstico razonado de UP que incluían cacao en cuatro municipios del Soconusco y caracterizar su multifuncionalidad para destacar el aporte de los SAF a la sostenibilidad y a la multifuncionalidad agraria regional. Se seleccionaron de manera deliberada a productores en condiciones contrastantes,

considerando distintos niveles de transición agroecológica⁸ (según sus innovaciones agrícolas) y tipo de SAF. Esta selección razonada respondió al interés de representar la diversidad de condiciones agroclimáticas y características de las UP en la región. Aunque el área de estudio es relativamente pequeña y homogénea en términos geográficos y climáticos, presenta una notable variabilidad en términos agronómico-productivos y sociales, lo cual ofrece un campo fértil para estudiar las contrastantes actividades agropecuarias con las que se complementa el cacao y la multifuncionalidad de las UP que lo incluyen.

Desde un enfoque interdisciplinario, se recurrió a la metodología mixta del diagnóstico agrario, que permite caracterizar contextual e integralmente a los sistemas productivos (SP) desde diferentes perspectivas (Ferraton *et al.*, 2008); el nivel de transición agroecológica se caracterizó con base en Díaz-José *et al.*, (2013). Al tiempo, se integró un análisis multicriterio para caracterizar la multifuncionalidad de los SP (esto es, sistemas pecuarios, ganaderos o forestales) desde dimensiones ambientales, sociales y económicas. Los datos se obtuvieron mediante revisión de literatura (historia y regionalización agrícola), así como entrevistas semiestructuradas, encuestas y observación de campo. Una descripción más detallada de los métodos se ofrece en la sección respectiva.

El documento tiene la estructura siguiente: introducción, materiales y métodos, resultados y discusión y conclusiones. El apartado de resultados y discusión se estructuró como se indica a continuación: 1) historia agrícola en torno al Soconusco,

⁸ La **transición agroecológica** es el proceso de cambio desde prácticas agrícolas convencionales hacia sistemas más sostenibles, basados en principios ecológicos, sociales y territoriales; busca mejorar la sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas para enfrentar desafíos socioambientales multidimensionales como el cambio climático, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad; todo esto, manteniendo o mejorando la productividad agrícola. Se basa en los principios de sostenibilidad (reducción de la dependencia de insumos externos y optimización de servicios ecosistémicos), resiliencia (promoción de la biodiversidad y la adaptación local ante cambios socioambientales) y equidad social (asegurar que las comunidades y pequeños productores se beneficien sin aumentar sus desigualdades). Asimismo, busca rescatar el conocimiento local, fomentar la participación comunitaria y mejorar la gestión sostenible de los recursos (Altieri & Nicholls, 2007; Schwarz *et al.*, 2022). Se entiende así, que la búsqueda de una agricultura más multifuncional está inmersa en esta definición.

2) regionalización agrícola de las UP analizadas, 3) tipos de SAF documentados y 4) caracterización de la multifuncionalidad.

5.4. Materiales y métodos

5.4.1. Área de estudio

El estudio se desarrolló en los municipios de Huixtla, Tuzantán, Huehuetán y Villa Comaltitlán (comprendidos entre las coordenadas: 92° 46' 40.5" a 92° 17' 55.9" de longitud oeste y 14° 55' 48.9" a 15° 20' 22.9" de latitud norte), pertenecientes a la región del Soconusco, Chiapas, México. Tales municipios presentan condiciones agroclimáticas contrastantes y una notable diversidad de UP y SAF con cacao. Como se dijo anteriormente, los municipios fueron seleccionados de forma deliberada por su representatividad dentro de la región, si bien no son los mayores productores de cacao dentro de esta (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, 2022), pero sí representan algunos de los lugares de abastecimiento histórico del cacao.

Referente al clima, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2008) indica que: en la zona de planicie costera se presenta el tipo climático cálido subhúmedo con lluvias en verano y la unidad climática $Aw_2(w)$, que abarca poco menos de la mitad de los municipios referidos; posteriormente, en casi la totalidad de la zona de sierra, con una altitud desde unos 20 a 30 hasta cerca de 1 100 msnm y en terreno escarpado, domina el tipo climático cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y la unidad $Am(w)$; finalmente, una porción al noreste de Tuzantán y otra al norte de Huixtla (cerro la Piedra Llorona), ambas con más de 1 100 msnm, presentan el tipo climático Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano y la unidad $A(C)m(w)$.

En cuanto a cobertura del suelo se refiere, se presenta: vegetación hidrófila (manglar en la planicie aluvial y posteriormente tular), en el centro (en terrenos planos y ligeramente inclinados) se presenta un uso agropecuario amplio y un uso habitacional disperso (excepto las cabeceras municipales y algunos poblados); en tanto que, en la sierra se presenta agricultura temporal permanente y vegetación secundaria de selva alta (INEGI, 2017), aunque de hecho, se informó en campo que estos últimos corresponden en su mayoría a SAF de café y cacao. Los tipos de suelo son aún más

variables. En suma, esos elementos biofísicos han favorecido un óptimo desarrollo de la agricultura, con productos de exportación nacional e internacional; pero a la vez, se ha impactado negativamente al ambiente (del Carpio Penagos, 2017).

5.4.2. Enfoque metodológico

Se empleó la metodología del diagnóstico agrario (Cochet & Devienne, 2013; Ferraton *et al.*, 2006), que permite caracterizar integralmente las UP desde una perspectiva histórica, económica, técnica y paisajística. Dicha metodología está pensada para evaluar sistémicamente la agricultura de todo un paisaje o territorio, pero es adaptable a un cultivo y a sus sistemas complementarios, tal como se ha hecho aquí. Esta posee un enfoque en la UP completa y no se basa en la idea de la optimización (máxima ganancia en el menor lapso posible), y más bien, en el enfoque de subsistencia familiar. Con esta se busca representar, mediante modelos agrícolas (no se busca estudiar todas y cada una de las explotaciones agrícolas, sino las más representativas al nivel regional), desde un punto de vista de la complementariedad de los SP; y, en última instancia, calcular su ingreso neto. Para lo cual, parte de un muestreo razonado que requiere de conocimiento esencial previo de la región. Sus pasos generales son: análisis del paisaje (previo a la aplicación de los instrumentos, que debe ajustarse posteriormente), análisis histórico (historia agrícola regional, derivado de las entrevistas y de revisión exhaustiva de literatura) y económico (cálculo de indicadores económicos con base en las respuestas de las entrevistas), además de la integración del análisis al nivel del SP, y puede llegar a la observación de interacciones entre unidades de producción familiar y a la definición de aspectos críticos a resolver (recomendaciones de política pública). En la fase de regionalización agrícola y el análisis del paisaje se incluyó la representación cartográfica de las UP para contextualizarles espacialmente usando como insumo información geográfica oficial y puntos (tomados con GPS) de las localidades sondeadas.

Asimismo, se incorporó un análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) por el método de suma ponderada (Ishizaka & Nemery, 2013) para evaluar la multifuncionalidad de las UP con datos recabados en campo. La caracterización de las innovaciones agrícolas en cacao (vista como una forma de cuantificar lo agronómico y

la transición agroecológica) se basó en el catálogo de Díaz José *et al.* (2013: 110-111), que fue usado como lista de verificación e incluye aspectos de manejo agronómico y vinculación. Las variables empleadas en la caracterización de la multifuncionalidad fueron: ingreso agrícola, número de SP (de cultivo o ganado) de la unidad familiar, número de especies arbóreas del SAF que reportó el productor (con base en el listado de Suárez-Venero *et al.*, 2019), si contrata o no jornales, la cantidad de dinero (pesos mexicanos) que recibe por apoyos gubernamentales en el año y la cantidad de dinero que recibe por trabajo asalariado anual fuera de su SP; todos los criterios fueron la maximización (excepto ingreso por trabajo asalariado fuera de la parcela, que fue a minimizar): en la maximización los valores altos son “lo ideal” y la minimización penaliza valores altos; los pesos de cada variable fueron equitativos para fines prácticos, pero estos podrían variarse si buscaran plantearse escenarios distintos (por ejemplo, un enfoque más económico o ambiental). Si bien la mayoría son variables económicas, también se incluyó el aspecto ambiental (especies arbóreas) y aspectos que se relacionan con lo social.

De un sondeo inicial dirigido en diez localidades, se seleccionó una gama variada de tipos de productor: se incluyeron a nueve cacaocultores de ocho localidades, quienes se encontraban en el programa nacional de Producción para el Bienestar (PpB) con una gama amplia de condiciones; estos productores fueron nombrados como bajo transición agroecológica por la misma política pública (que busca mejorar la producción de este y otros cultivos mediante incentivos económicos y en especie, como asistencia técnica): así, se seleccionaron a productores de las diferentes zonas listadas previamente (planicie y sierra), con parcelas de tamaños variables, como se detallará en la sección de resultados.

Recolección de información: las fuentes de información de la historia y regionalización agrícola se especifican en las subsecciones respectivas, pero sobre todo fueron de tipo secundarias e información de campo. Las entrevistas semiestructuradas (basadas en Cochet; Devienne, 2013 y Ferraton *et al.*, 2008) incluyeron aspectos sobre los costos, calendarios y actividades agrícolas de los SP, así como aspectos históricos referentes a la agricultura, con el fin de dar un anclaje

espacial y un panorama histórico y dinámico a los SP. Las encuestas, diseñadas específicamente para tal fin, se enfocaron en documentar las condiciones socioeconómicas, agronómicas y fitosanitarias que enfrentan los productores de cacao, con el objetivo de entender su dinámica productiva y qué tanto se ve afectada su producción por los factores parasitológicos (incluidas las enfermedades principales del cacao, como la moniliasis, *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny y la mancha negra, *Phytophthora* spp.). Las entrevistas y encuestas se aplicaron en octubre de 2022.

Observación de campo: las visitas a los cacaocultores se hicieron cuando se aplicaron los instrumentos, durante dos semanas y media, al menos una vez por cada SP, con el acompañamiento y la orientación del personal del grupo R5-Soconusco (rubro cacao) de la Estrategia de Acompañamiento Técnico (EAT) del programa PpB. Se obtuvo el consentimiento informado de los cacaocultores para participar en las entrevistas y encuestas; sin embargo, sus nombres no se incluyeron con fines de asegurar su confidencialidad y solo se incluyeron las ubicaciones de sus UP a nivel localidad.

La información del trabajo de campo se procesó, codificó y analizó en el programa Excel (Microsoft®), según el orden y las fórmulas específicas de cada método. El análisis MCDA se desarrolló en Rstudio.

5.5. Resultados y discusión

5.5.1. Historia agrícola

El Apéndice 3 y el Apéndice 4 aportan un panorama de largo plazo sobre la transformación agrícola en el Soconusco. En él se muestra cómo la región transitó desde el predominio de la ganadería, el cacao y el café (principalmente *Coffea arabica* L.) hacia una diversificación productiva, dominada por cultivos de exportación e industriales. Históricamente, el Soconusco constituyó un centro relevante para el cultivo del cacao, con un auge comercial y cultural desde la época prehispánica. Posteriormente, a partir del siglo XIX, el café se consolidó como el cultivo principal, impulsado por el pleno dominio legal de este territorio por México (tras la firma del

tratado de límites con Guatemala en 1882), la llegada de inversionistas extranjeros (debido a la Ley de Colonización) y la apertura de infraestructura clave, como el ferrocarril y la carretera costera, además de la construcción de obras hidráulicas de gran magnitud⁹ (del Carpio Penagos, 2017).

Desde los siglos XVIII al XX, políticas públicas y proyectos de desarrollo (como los promovidos por diversos programas de financiamiento nacional y mundial), estimularon la expansión de cultivos comerciales como el café (principalmente *C. arabica* y posteriormente *Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner) y el mango (*Mangifera indica* L.) y propiciaron la introducción de palma africana (*Elaeis* spp.)¹⁰ (Castellanos Navarrete, 2023; del Carpio Penagos, 2017; Mendoza-Hernández *et al.*, 2020).

La liberalización del mercado y el retiro de apoyos estatales en los años ochenta y noventa provocaron crisis y reestructuraciones en la cafecultura, con impactos directos en la superficie y la composición de los cafetales (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018; Montoya & Toledo, 2020).

En el caso del mango (principalmente la variedad ataulfo), la consolidación de este cultivo con un enfoque agroexportador, se debió a la propagación y dispersión masiva en marcos institucionales especialmente dedicados a este cultivo, lo que permitió el establecimiento de miles de árboles en la región (Infante *et al.*, 2011; Mendoza-Hernández *et al.*, 2020). Aunque cabe destacar, el mango manilla tuvo una excelente aceptación desde que arribó al país y a la región; tanto que, hasta hoy, algunos productores apenas comienzan a sustituirlo por el mango *ataulfo*. También se presentan las variedades “floridanás” (como Tomy Atkins), pero en menor medida.

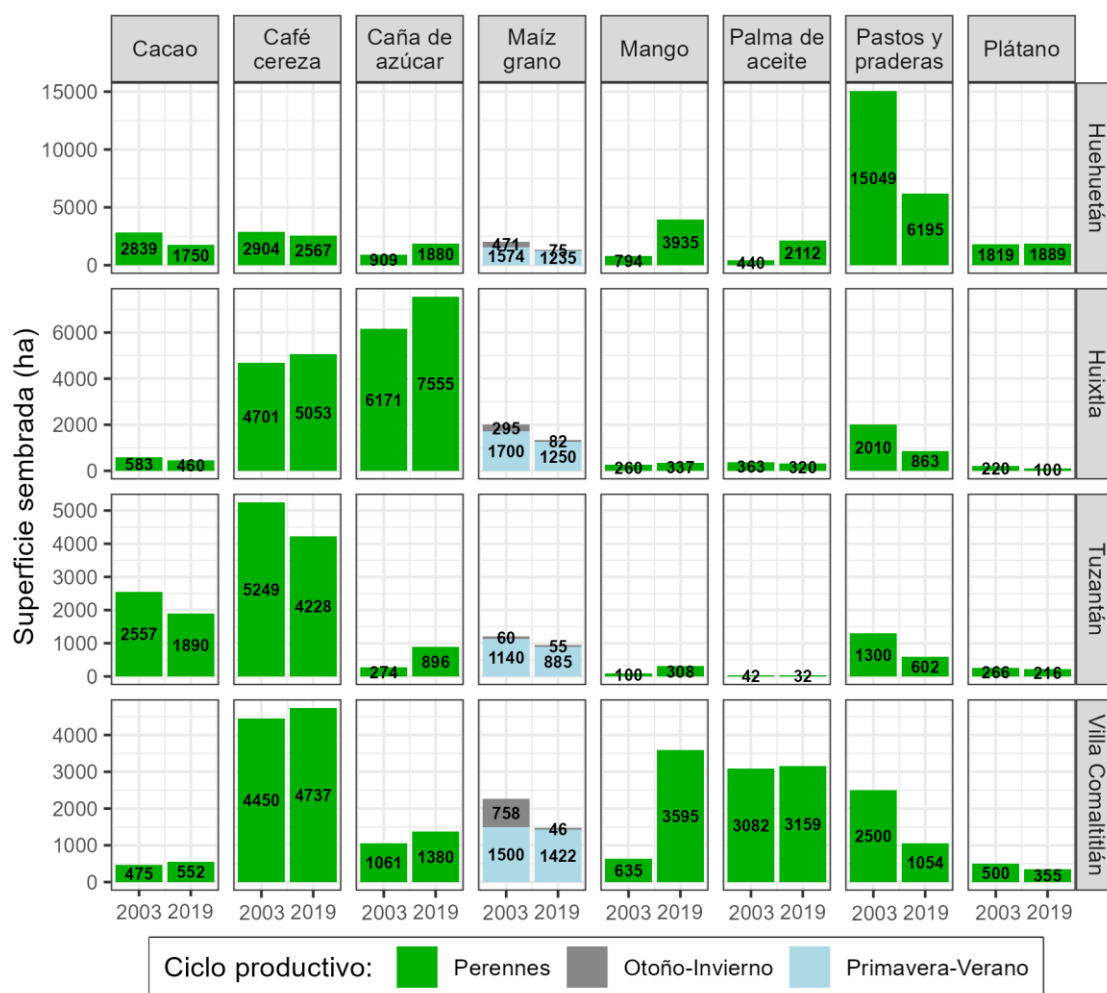
⁹ Incluidas obras de protección y control de ríos de los ríos Suchiate (1949), Huixtla y Pijijiapan, así como el plan “Gran Irrigación” de 1947-1952 en Suchiate y Cacahoatán -municipios fronterizos con Guatemala, más al sur- que consistió en construir puentes, bordos y canales, lo que sirvió para la irrigación de cultivos, principalmente de cacao. Además, el Programa Hidráulico de la Costa de Chiapas de los 80s, que se orientó a expandir la frontera agrícola mediante la desecación de humedales y construcción de drenes en la costa.

¹⁰ Los cruces de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y americana (*Elaeis oleifera* (Kunth) Cortés) son más propiamente llamados palma de aceite, los cuales se introdujeron a la región a partir de la década de 1990 (Castellanos, 2023).

Respecto a la palma africana, su historia en México revela la importancia del Estado en la promoción de alternativas agrícolas en general y en cuanto a este monocultivo en particular, que fue concebido como una herramienta para “modernizar” al campesinado, “civilizar” y explotar regiones consideradas de frontera agrícola, “subutilizadas” por definición (esto es, regiones que, al estar poco pobladas y desligadas del país, fueron sujetas a procesos de colonización agrícola por el Estado)¹¹; la palma africana se eligió como uno de los instrumentos para lograr tal fin: integrar a las poblaciones locales al desarrollo nacional y promover técnicas agrícolas modernas, así como “instruirlas” en agricultura industrial y en la lógica de acumulación de capital. Ello debido a que anteriormente predominaba el trabajo colaborativo no remunerado y la lógica de subsistencia familiar, por lo que se incluían cultivos básicos de forma amplia (Castellanos Navarrete, 2023).

La Figura 16 refleja el resultado contemporáneo de los procesos históricos ya enunciados: refiere los ocho cultivos principales (por superficie sembrada) en el área de estudio entre 2003 y 2019 (SIAP, 2022): se observa que el cacao fue más importante en Huehuetán, mismo que pasó de 2839 a 1750 hectáreas; le siguió Tuzantán, que pasó de 2 557 a 1 890 hectáreas, en tanto que en Huixtla pasó de 583 a 460 y en Villa Comaltitlán de 475 a 552. Dichos cambios se explican debido a la llegada al país de la enfermedad de la moniliasis en 2005 (la cual pudre el fruto y merma el rendimiento del cacao), ante un sistema muy vulnerable (Roma Ardón *et al.*, 2022), así como debido a cambios de enfoque del mercado y de la política pública. Ello provocó un debilitamiento del sector cacaotero al afectar de forma generalizada y agresiva en todas las regiones cacaoteras del país; con lo cual se redujeron los rendimientos, aumentaron los costos de mantenimiento y las limitaciones del cultivo.

¹¹ En las cuales la intervención estatal incluyó, entre otras cuestiones, la modificación de la hidrología mediante obras hidráulicas y esquemas de irrigación, para “sanear zonas insalubres” y aprovechar las riquezas naturales y el potencial agrícola del territorio. Ello expone a una situación de mayor vulnerabilidad al cambio climático a las poblaciones locales, pues los cuerpos de agua termorregulan el clima a nivel regional.



Sin incluir semilla de caña de azúcar

Figura 16. Comparación de la superficie sembrada de los ocho cultivos más sembrados en cuatro municipios del Soconusco, Chiapas (2003 y 2019).

Fuente: elaboración propia en Rstudio con datos del SIAP (2022).

No obstante, los cultivos más sembrados de 2003 a 2019 fueron (SIAP, 2022): los pastos y praderas en Huehuetán (disminución del 58.8%), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en Huixtla (aumento del 22.4%) y el café en Tuzantán (disminución del 19.5%) y Villa Comaltitlán (aumento del 6.5%). En café tales tendencias se explican por brotes de la roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en 2012-2013, por cambios estructurales de este sistema debido a lo anterior y a un sistema históricamente debilitado y desprotegido desde la década de 1990, que desde entonces afronta los efectos del cambio climático, por ejemplo, con heladas, reducción de la aptitud para el cultivo y fitopatógenos más agresivos (Libert-Amico & Paz-Pellat,

2018), análogo al caso del cacao; pese a ello, la superficie dedicada a café en Huixtla aumentó un 7.5%, pero en Huehuetán se redujo el 11.6%.

De tales ocho cultivos, aquellos que se redujeron en todos los municipios fueron: maíz grano (*Zea mays* L., en ambos ciclos) y pastos y praderas; el plátano (género *Musa*)¹² solo aumentó en Huehuetán (1819 a 1889 hectáreas) y se redujo en los demás municipios, si bien en ellos no era tan extensa su superficie. La reducción en superficie de pastos y praderas implica una menor área dedicada a la ganadería, que es principalmente extensiva, de doble propósito (producción de leche y vaca-cría), de bajos insumos y de cruzas cebuínas, aunque también existe ganadería bovina de forma importante.

En contraparte, aquellos cultivos que incrementaron su área sembrada de forma generalizada fueron caña de azúcar y mango; este último se presentó de forma más importante y con el mayor incremento (en al menos el 450%) en Villa Comaltitlán y Huehuetán con 3595 y 3935 hectáreas en 2019, respectivamente. La palma africana también fue más importante en Villa Comaltitlán y su área sembrada en todos los municipios prácticamente se ha conservado, excepto en Huehuetán, donde aumentó fuertemente (de 440 a 2112 hectáreas). Estos cambios resultaron coherentes con el impulso dado en el pasado a estos cultivos por proyectos de desarrollo, inversión pública y privada, y a la búsqueda de nuevas alternativas productivas frente a los cultivos tradicionales y la ganadería. La expansión de la palma africana inició en los años ochenta y noventa, el mango se extendió desde los sesenta hasta los noventa, y la caña de azúcar incrementó su presencia a partir de la puesta en marcha del ingenio en 1990 (Hernandez Solís & Castro Martínez, 2023). Tales tendencias continúan hasta la fecha.

Por otro lado, el volumen de producción (en 2003 y 2019) se comportó de forma diferente para tales cultivos (SIAP, 2022): este decayó para la mayoría (incluso en café

¹² La mayor parte del plátano referido por SIAP proviene de monocultivos (empresas privadas o “bananeras”), que representan una alternativa de trabajo para algunos de los habitantes más jóvenes. Aunque también es un componente aislado y poco extensivo en los SAF de la región.

y cacao), mientras que solo se incrementó en caña de azúcar, mango y palma africana. En tanto que, el valor (económico total) de la producción tuvo un comportamiento similar al volumen para todos los cultivos referidos, con la excepción del maíz y el plátano, que incrementaron su valor de forma generalizada (excepto plátano en Huixtla), a pesar de haber reducido su volumen; así pues, el mayor valor correspondió a la caña de azúcar de Huixtla, seguido por el mango y la palma africana de Villa Comaltitlán y Huehuetán, y el plátano de Huehuetán. Dicho comportamiento del volumen y valor de la producción, con caídas en cultivos tradicionales y de subsistencia, así como incrementos en cultivos más rentables, constituyó una consecuencia directa de los cambios estructurales ya enunciados.

Así pues, el estudio de Escobar Flores y Castillo Santiago (2021), que cubrió a siete municipios vecinos (dentro de la región del Soconusco), documentó cambios de uso del suelo entre 1990 y 2015 muy alineados con lo anterior: conversión de cultivos a plantaciones (1 789 hectáreas en la costa; 16 026 hectáreas en la planicie) y pérdida neta de vegetación natural (hidrófila -manglar y tular-) y bosques perturbados (incluidos SAF de café), aunado a la expansión de asentamientos urbanos.¹³

5.5.2. Regionalización agrícola

La regionalización agrícola (Figura 17) es la siguiente: la palma africana (polígonos grandes en los alrededores de la localidad Las Brizas, Villa Comaltitlán) y el SAF cacao en policultivo tradicional (polígonos más pequeños) se distribuyen en la parte media (planicie), al la par de los pastizales para ganadería y la caña de azúcar. El mango también se distribuye en la zona baja, en las inmediaciones de la localidad de las Brizas. En tanto que, los sistemas SAF cacao y café rústicos y especializados se localizan en la parte alta o sierra (al noreste de la escena). Los pastizales se distribuyen

¹³ Su estudio se centró en municipios ubicados más al sur, cercanos a la frontera con Guatemala (Mazatán, Tapachula, Tuxtla Chico, Frontera Hidalgo, Suchiate, Metapa y Cacahoatán), y no en los municipios objeto de la investigación. Ante la falta de estudios específicos sobre los cambios en el uso del suelo en el área de estudio se ha asumido que los procesos de reconversión de cultivos son similares dentro de la región. No obstante, resulta necesario llevar a cabo una investigación enfocada en esta área para identificar con precisión las transformaciones de la agricultura y sus causas.

casi de forma indistinta en cada zona, pero mayormente en los pies de monte y a la par de los demás cultivos.

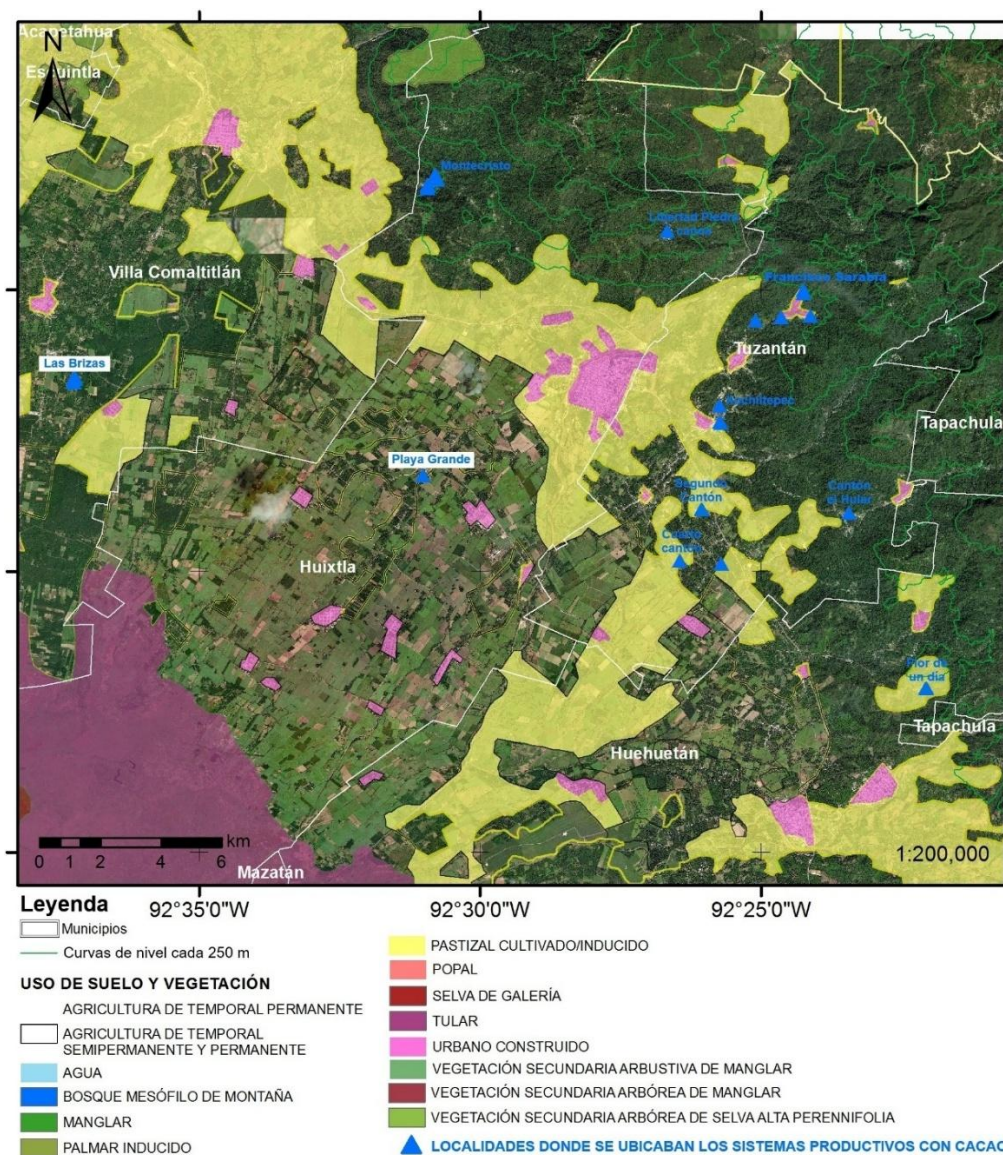


Figura 17. Regionalización agrícola en el área de estudio, en Soconusco, Chiapas.
Fuente: elaboración propia con base en ESRI (2022) e INEGI (2017).

5.5.3. Sistemas agroforestales que incluyen cacao en el Soconusco

Se clasificaron los SAF con cacao según su composición (ver Figura 18 y Figura 19) en: policultivo tradicional, policultivo comercial, SAF especializado (o con predominancia de árboles leguminosos y café) y sistema en restos de selva; el nivel

de manejo del cacao, en general correspondió con el orden (de mayor a menor) en que se han listado tales SAF. Mismos que a continuación se detallan.

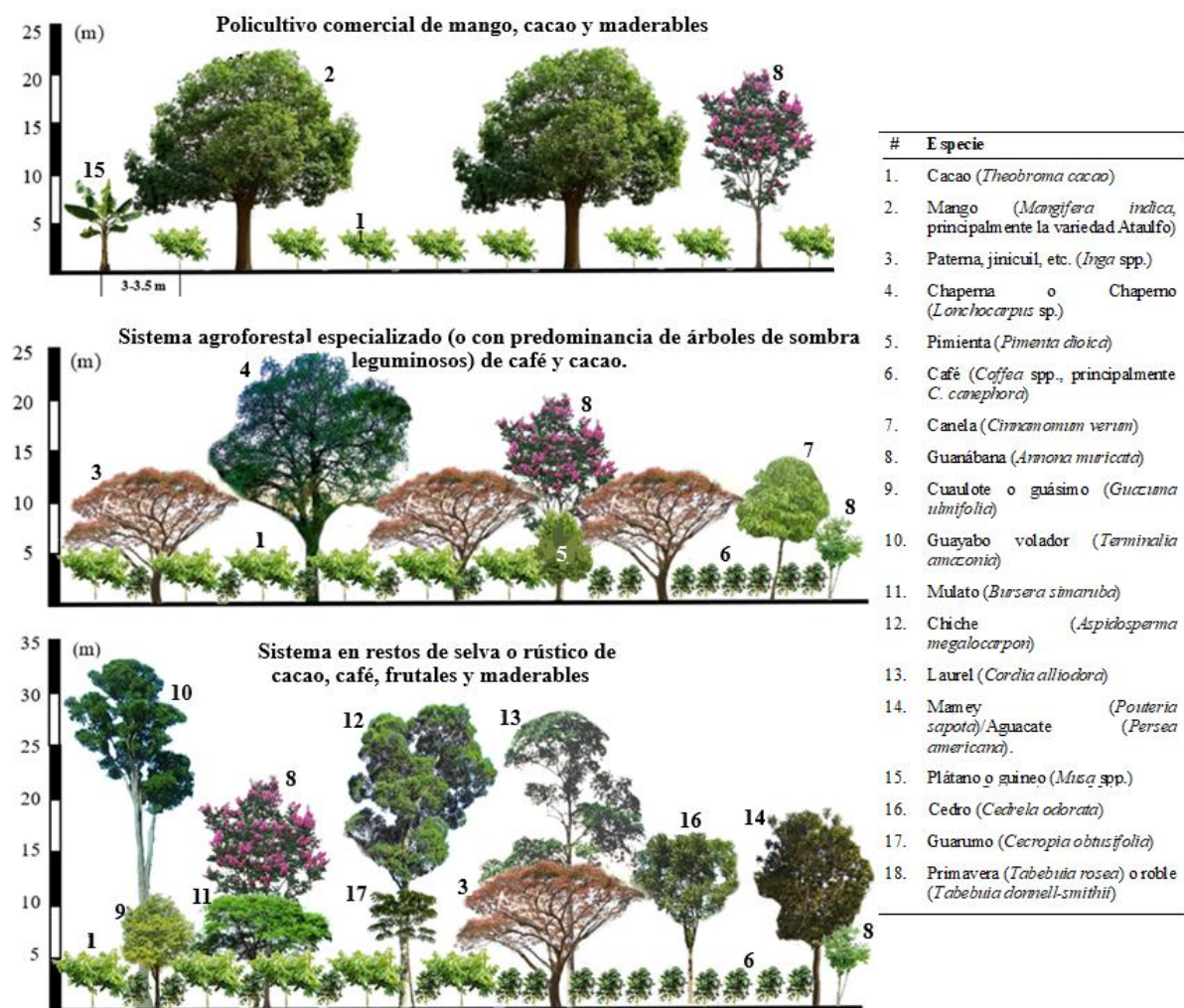


Figura 18. Diagramas de los sistemas agroforestales (en estado maduro) que incluyen cacao en el Soconusco.

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de campo.

Policultivo tradicional: enfoque en la diversificación de productos, por lo que en este es en donde se presentaban más especies de árboles de sombra. Este SAF (Figura 19A a 19C), se encontraría, en estructura y composición, entre el SAF homólogo presente en Tabasco (Morán-Villa *et al.*, 2022) y el de restos de selva que aquí se documenta (pero con mayor dominancia de árboles maderables y frutales); estos SAF en ocasiones presentaban heliconias en el sotobosque (comercializadas como ornamentales) y varios cultivos “menores” dispersos, entre ellos la piña (*Ananas*

comosus (L.) Merr.) y la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). En este sistema el cacao es el cultivo principal. Este SAF se presentó en los poblados de Segundo Cantón y Cuarto Cantón, Tuzantán; de igual modo se presentó en el Cantón el Hular, Tuzantán, pero con la presencia de café robusta (*C. canephora*) de forma dispersa; de hecho, en esa localidad incluso existían SAF exclusivamente de café.



Figura 19. Sistemas agroforestales con cacao en el Soconusco, Chiapas.
 . Nota: (A) Panorámica vertical de un árbol de chiche: *Aspidosperma megalocarpon* Müll. Arg. en Segundo Cantón, Tuzantán. (B) Guayabo volador: *Terminalia amazonia* (J.F. Gmel.) Exell en Cuarto Cantón, Tuzantán; junto a este aparece el cacaocultor de la Unidad Productiva 3. A y B son típicos de selvas húmedas maduras.
 (C) Policultivo tradicional en Playa Grande, Huixtla. (D) Policultivo comercial de mango y cacao en el Cantón de Las Brizas, Villa Comaltitlán. Créditos: AFSH.

Policultivo comercial: enfoque económico en hasta dos cultivos de plantación (normalmente agroindustriales), que proveen sombra al cacao. **Policultivo comercial de mango y cacao:** se combina mango como sombra y cacao principalmente, aunque en su primer arreglo temporal también se incluye a árboles maderables y plátano, así como varios cultivos alimenticios. Este caso específico se encontraba en el Cantón de las Brizas, Villa Comaltitlán, y se observó en varias comunidades aledañas; sin

embargo, fue más común observar al mango como monocultivo. A la par del anterior se presentaba el monocultivo de palma africana o de aceite, que como se dijo, se ha extendido notablemente durante las últimas décadas, lo que ha sido fomentado por programas públicos estatales y federales (Del Carpio Penagos, 2017).

En Soconusco la producción de mango depende de forma dominante del uso intensivo de agroquímicos para adelantar y aumentar el rendimiento, lo que genera elevados costos y afecta tanto al ambiente como a la salud humana; la producción se adelanta con el fin de obtener mejores precios para el producto (lo que sucede normalmente en enero). Ante esta situación, los productores enfrentan solo dos opciones: vender su cosecha a intermediarios (normalmente comercializadoras) o dejar que esta se pierda. Por ende, los productores de mango, a menos que formen parte de una cooperativa (quienes comercializan el producto), suelen vender su cosecha entera antes de que esta se produzca, mediante un acuerdo de "un tanto" con los intermediarios, quienes asumen el manejo agronómico y la comercialización del producto. De hecho, integrarse a una cooperativa representa otro reto, pues se requiere poseer de al menos 3 hectáreas de plantación. Como consecuencia de lo anterior, en algunos municipios el cultivo de mango está siendo desplazado por la palma africana, un cultivo que exige aún más recursos, especialmente agua y suelo fértil (Sánchez Osorio & Prado Ramírez, 2019).

Otros SAF que pueden clasificarse dentro de la categoría de **policultivo comercial** incluyen los siguientes: al sur de la región, existen SAF con cacao, donde el mango y el mamey (*Pouteria sapota* (Jacq.) H.E. Moore & Stearn) predominan como árboles de sombra, y también se fomenta el cultivo de heliconias con fines comerciales. Por otro lado, en Tuzantán se está dando un SAF emergente, que combina rambután (*Nephelium lappaceum* L.) con cacao, donde el rambután es el cultivo de mayor valor económico. Si bien el rambután se concentra mayormente en municipios fronterizos de la región: según datos del SIAP (2022) en 2019 Tuxtla Chico registró 475 hectáreas sembradas, Cacaoatán 123 y Tapachula 109.5.

Sistema en restos de selva o rústico de cacao, café, frutales y maderables: es un SAF mayormente presente en la sierras, donde se combinan árboles maderables

nativos (de ahí el nombre de restos de selva) y frutales nativos e introducidos (sobre todo la especie robusta) con café (sobre todo robusta) y cacao. Cuando domina chiche (*A. megalocarpon*) se les denomina chichales. Su proceso de establecimiento es bien conocido¹⁴. Este sistema se presentaba, por ejemplo, en Libertad Piedra Canoa y Montecristo, Huixtla y en Xochiltepec, Tuzantán. Cuando predominaban árboles leguminosos se les llamó **sistema especializado**, como se hace en SAF de café.

En Montecristo, aunque ya existían plantaciones seniles (más de 30 años) con productores de antaño (en su mayoría adultos mayores), sin mucho interés aparente por las generaciones consecutivas (que mayormente se centraban en café), actualmente productores jóvenes (30 a 40 años) han comenzado a interesarse en el cultivo de cacao, por lo que han establecido planta nueva (de 1 año en 2022); motivación que surgió a raíz de las políticas públicas para el campo del anterior y del actual gobierno (incluido PpB y Sembrando Vida) y de forma complementaria, por el precio relativamente elevado del cacao y la fuerte inestabilidad del precio del café. Casos similares de SAF se encontraron en Guadalupe Victoria y el Ejido Francisco Sarabia 1ª Sección, Tuzantán. Otro problema adicional en esta última localidad fueron las plagas como las aves —incluyendo loros (*Amazona autumnalis* (Linnaeus), conocidos localmente como “cuchas”, y *Amazona albifrons* (Sparman), llamadas “señoritas”), y el carpintero o “cheque” (*Melanerpes aurifrons* (Wagler)—, además de una diversidad amplia de mamíferos, con pérdidas indicadas como muy superiores a las producidas por enfermedades fúngicas como la moniliasis; lo anterior viene dado por la influencia en esas plantaciones, debido a la contigüidad de la vegetación secundaria de selvas, de la vida silvestre nativa (históricamente desplazada por actividades agropecuarias y deforestación). A lo que se añade la problemática de la

¹⁴ Inicialmente se despejan (“chaporro”) y aclaran las áreas a plantar (ya sean restos de selva o acahuals) procurando dejar una distancia similar (9 a 14 m) entre los árboles que fungirán como sombra (Del Carpio Penagos, 2017). Luego, las plantaciones de café o café y cacao son establecidas usando un distanciamiento semejante, según el sitio-específico lo permita. Una vez establecidas, las plantas van siendo renovadas conforme el productor observa el decremento en su productividad y/o sanidad. Si se presenta renuevo, se procura aprovecharlo en el lugar en donde emerge (incluso a veces se ponen tutores); o bien, tal renuevo es trasplantado a un lugar adecuado y libre. El injerto prácticamente no era utilizado, pero existía interés en aplicarlo.

falta de carreteras para poder extraer de forma eficiente los granos que allá se producen; incluso un productor de la tercera edad indicó que su mayor problema fitosanitario era “el raizado”, al referirse a la germinación del grano de cacao dentro del fruto tras rebasarse su periodo óptimo de cosecha. El pago por servicios ambientales por el mantenimiento de estos SAF podría aminorar las presiones ejercidas por la fauna nativa, así como los desafíos derivados de la lejanía geográfica entre los SAF y los hogares de los productores —una distancia que, en algunos casos, supera una hora o incluso hora y media de trayecto a pie.

En estos SAF de restos de selva o especializados el café robusta fue el más comúnmente reportado, aunque también se informó la existencia de café árabe, que es más apropiado para zonas de mayor altura. Cuando se cultiva exclusivamente cacao o café robusta, las plantas se establecen con un espaciamiento de 3×3 m o 3×4 m. En el caso del café arábica, la siembra se puede realizar hasta a la mitad de ese espaciamiento. Varios productores intercalan cafetos y cacao en patrones regulares. Aunque tales patrones son difíciles (sino imposibles) de encontrar en campo, tanto en árboles de sombra como con los cultivos; ello debido a las posiciones iniciales de los árboles de restos de selva (en caso de mantenerse), al terreno accidentado y a que el arreglo espacial responde al sitio-específico. La elección entre plantar café arábica o robusta depende en gran parte del trabajo que requiere cada uno. El café arábica, como la variedad catimor, tiene frutos que se abren fácilmente y caen al suelo, lo que obliga a cosechar seguido y hacer procesos más complejos como despulpar, lavar y secar. Aunque se vende a mejor precio, necesita más mano de obra. En cambio, el café robusta, que no se despulpa y solo se seca al sol, es más fácil de manejar y requiere menos trabajo, aunque su valor comercial es menor; este factor resulta decisivo, dado el envejecimiento de la fuerza laboral y la limitada disponibilidad de mano de obra joven. De igual modo, tal preferencia por el café robusta podría estar influenciada por la mayor susceptibilidad a la roya del café árabe; dicho fitopatógeno ha afectado gravemente la producción cafetalera en las últimas décadas, tanto a nivel mundial como nacional y regional (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018).

Asociaciones comunes en todos los SP: Aves de corral, diversos árboles frutales o plantas perennes de alto valor comercial (que en ocasiones pueden igualar o superar el ingreso por café o cacao), cuyos productos son en mayor medida para venta: como la canela (*Cinnamomum verum* J.Presl), la pimienta (*Piper nigrum* L.), la guanábana (*Annona muricata* L.), los cítricos (*Citrus* spp.), entre otros—y la venta ocasional de árboles maderables (principalmente en pie para leña o aserrío). Las aves de corral se destinan en su mayoría para consumo propio (con lo que se aminora el gasto en alimentos por carne) y en menor medida para la venta ocasional y como obsequios de familiares. La venta de árboles maderables funge como un ahorro más que como un ingreso fiable y constante, ya que se usan en momentos de emergencias.

5.5.4. Multifuncionalidad de las unidades productivas con cacao en el Soconusco

Todas unidades productivas (UP)¹⁵ operaban bajo un manejo tradicional o manual (y la mayoría era poco intensivo, incluso al nivel de recolección y no de cultivo), lo que refleja tanto la escala reducida como la limitada tecnificación del sistema. Resultado del proceso de la cuantificación de los ingresos, se muestra el ingreso agrícola (aquel calculado tras restar los costos intermedios a la venta de productos agrícolas) de las UP seleccionadas en la Figura 20. Los SP con mayores ingresos agrícolas fueron aquellos basados en ganadería y palma africana, con superficies de 7 y 4 hectáreas, respectivamente. En el caso de la ganadería, que es de doble propósito (18 hembras y 2 machos), los ingresos provienen en un 25% de la venta de leche y un 75% de la comercialización de cinco becerros anualmente. La UP 2 en Las Brizas, Villa Comaltitlán, que combinó palma africana con cacao y mango, generó un ingreso agrícola de \$86 277 MXN, lo que destaca la rentabilidad de los cultivos agroindustriales. Le continuó el cacao convencional¹⁶ en Flor de un día, Huehuetán

¹⁵ Se refiere al conjunto de SP de una misma familia. La unidad familiar se refiere la misma unidad productiva (agrícola), pero considerando todos los ingresos de la familia, incluso aquellos de índole distinto a lo agrícola.

¹⁶ El criterio entre nombrar “cacao convencional” o “cacao con manejo integrado” (donde este último representa un nivel avanzado de transición agroecológica) fue que se usaran al menos 80% de las innovaciones indicadas por Díaz-José *et al.* (2013), en especial el manejo cultural de remoción continua

con 3 ha, con poco más de \$55 mil MXN. No obstante, con solo 1.25 hectáreas le prosiguió el cacao con manejo integrado en Cuarto Cantón, Tuzantán y 1 hectárea de maíz, con más de \$50 mil MXN.

El caso anterior (UP 3) destaca que el cacao puede ser competitivo siempre que haya diversificación de SP y manejo integrado, aplicando principios agroecológicos y vinculación; este productor fue el que mayor rendimiento de cacao (800 kg de grano seco/hectárea) y menor incidencia de moniliasis reportó (de 5% a 20%, en tanto que los otros productores reportaron, en promedio, más del 40%); pese a ello, aún no implementaba certificaciones ni esquemas de trazabilidad o asociatividad más allá del programa PpB. Esta UP es la que más innovaciones usó (94%) y tiene una vinculación directa con el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP: la plantación solía ser un policultivo tradicional senil, prácticamente improductivo de 80 años, que el productor rescató, mediante renuevo por rebrotes basales, así como con manejo cultural riguroso (y agroecológico) e implementación de una gran diversidad de clones de cacao desarrollados por INIFAP; adicionalmente, usa riego para subsanar la demanda hídrica del cacao durante la época de secas. De hecho, este productor también incursionó en el cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* Andrews.), que aún no iniciaba su etapa productiva en ese entonces. Si bien el maíz apenas resultó rentable en términos monetarios, su persistencia obedece más a la necesidad de evitar el costo que implicaría comprarle a los intermediarios —quienes en ocasiones duplican el costo de producción, sin considerar la mano de obra—, así como al deseo de preservar el valor simbólico y la dignidad asociada al trabajo propio.

de frutos enfermos y el uso de variedades mejoradas o clones, y un rendimiento muy superior (mayor a 0.7 toneladas/hectárea).

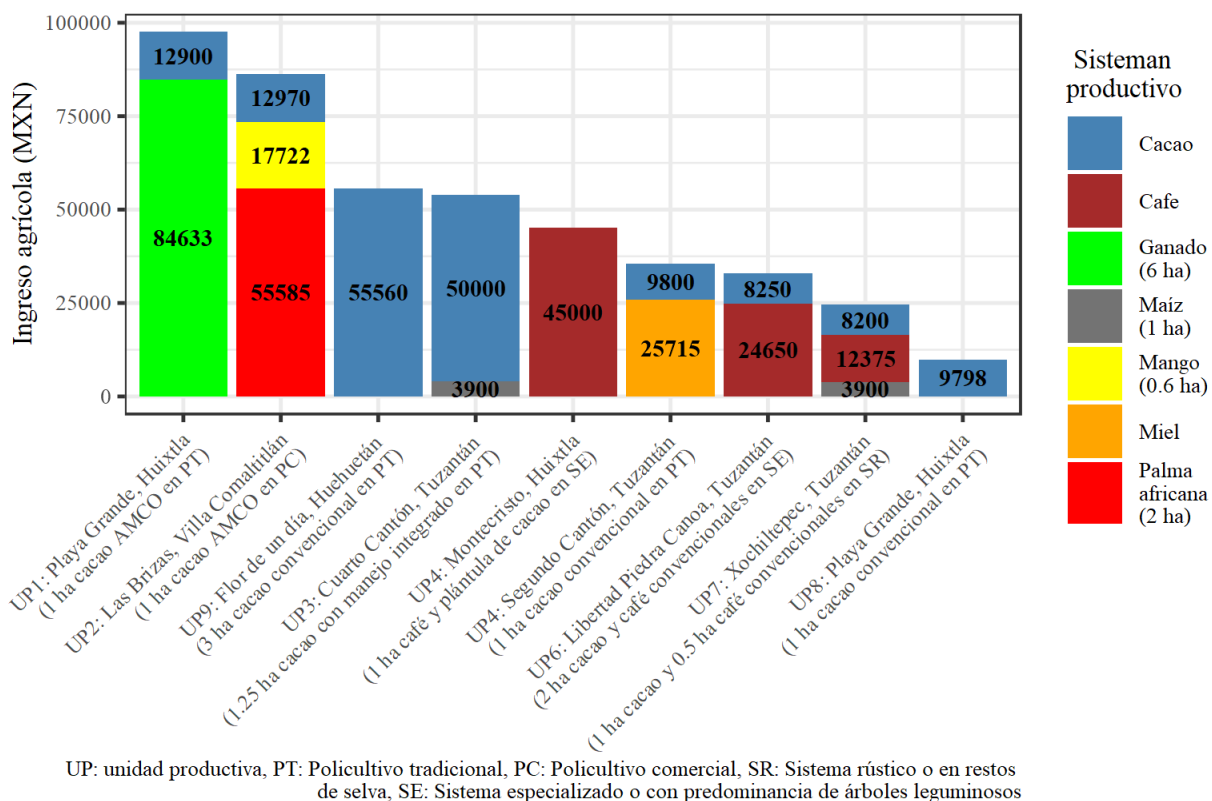


Figura 20. Ingreso agrícola por unidad productiva en el Soconusco, Chiapas, México.

Nota: Cacao AMCO, fue un proyecto de vinculación de una empresa privada, Agroindustrias Unidas de Cacao, S.A de C.V, que gestionó recursos para otorgar planta, vende planta y compra cacao en fresco selectivamente.

Fuente: elaboración propia en Rstudio con base en el trabajo de campo.

Dado que la ganadería implica mayor trabajo y no necesariamente más ingresos netos que la palma africana, en ello podría radicar el decremento de la superficie dedicada a pastos y pasturas que señaló el SIAP (2022). En el Cuadro 5 se muestran los ingresos por unidad familiar.

Por otro lado, el análisis de la multifuncionalidad de las unidades familiares (UF), evaluada mediante el análisis MCDA (Figura 21), destaca que las UF más multifuncionales combinaron ganadería y palma africana; ello se explica debido a sus altos ingresos agrícolas, la diversificación de SP y la contratación de jornales, además de recibir apoyos como Sembrando Vida (\$60 mil MXN anuales) y PpB (\$6 200 MXN anuales).

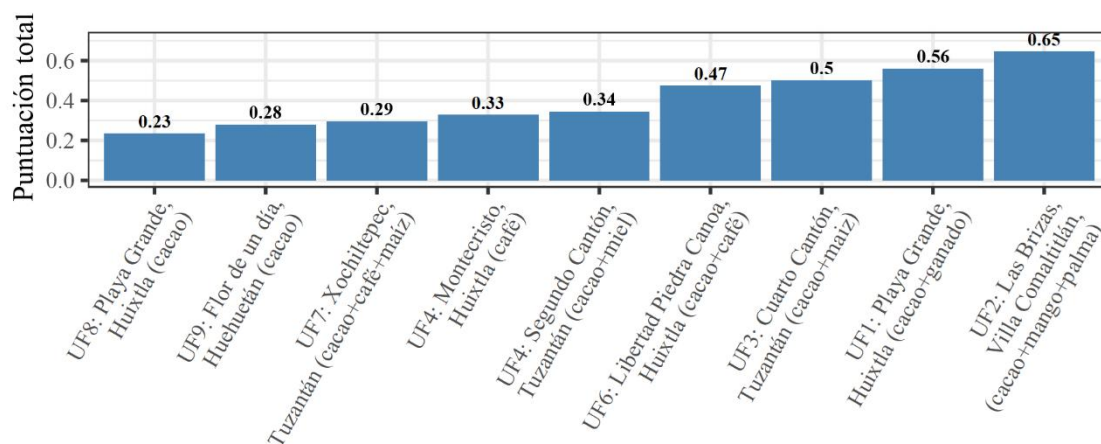


Figura 21. Resultado del análisis de decisión multicriterio por suma ponderada para seleccionar la unidad familiar más multifuncional.

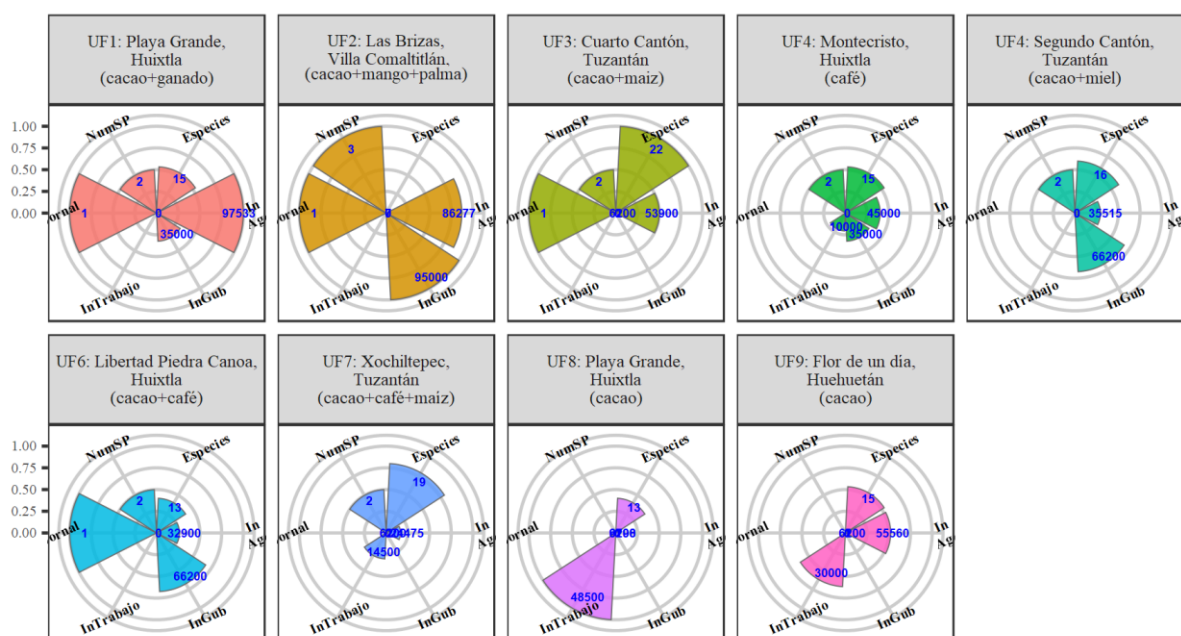
Fuente: elaboración propia en Rstudio con base en los cálculos.

Además, la UF 2 (Las Brizas) reportó un ingreso familiar anual de \$172 127 MXN, con 50% proveniente de subsidios. De hecho, si se observa a las UF con acceso a pensión o a Sembrando Vida se verá que, este es el mayor determinante del ingreso familiar. Sin embargo, el SAF de cacao con manejo integrado (UF 3) destacó como el más multifuncional a nivel de SP, pese a su menor superficie (1.25 hectáreas). Este sistema registró el mayor número de especies arbóreas, el mayor rendimiento por cacao y la autosuficiencia del productor, quien no trabajó fuera de su parcela y solo recibió \$6 200 de subsidios; quien, además, contrataba jornales; lo que implica que el cacao puede ser una alternativa atractiva, pero requiere de mayor esfuerzo del productor y apoyo institucional. Estos datos pueden ser complementados con la Figura 22: un gráfico de radar donde se presentan los indicadores considerados en la caracterización de la multifuncionalidad de las UF.

Cuadro 5. Ingresos anuales por unidad familiar (pesos mexicanos, MXN)

Unidad familiar (UF)	Ingreso por cacao	Ingreso agrícola de la UP	Producción para el Bienestar (PpB)	SV	Pensión (para el Bienestar)	EJ	Ingreso familiar anual
UF2: Las Brizas, Villa Comaltitlán	12,970	86,277	6,200	60,000	19,650	-	172,127
UF8: Playa Grande, Huixtla	9,798	9,798	6,200	-	-	30,000	45,998
UF1: Playa Grande, Huixtla	12,800	97,633	6,200	-	19,650		123,383
UF4: Segundo Cantón, Tuzantán	9,800	35,515	6,200	60,000			101,715
UF3: Cuarto Cantón, Tuzantán	50,000	53,900	6,200				60,100
UF6: Libertad Piedra Canoa, Huixtla	8,250	32,900	6,200	60,000	-	-	99,100
UF4: Montecristo, Huixtla	-	45,000	6,200	-	19,650	9,000	79,850
UF7: Xochiltepec, Tuzantán	8,250	24,475	6,200	-	-	13,500	44,175
UF9: Flor de un día, Huehuetán	55,560	55,560	6,200	-	-	35,000	

SV: Sembrando Vida. EJ: Empleo como jornalero. Fuente: elaboración propia a partir del trabajo de campo.



InAgr: Ingreso agrícola (pesos mexicanos: \$MXN), NumSP: número de sistemas productivos, Especies: Número de especies en el sistema agroforestal (SAF), Jornal: si contrata jornales (1=si, 0=no), InGub: ingreso por apoyos gubernamentales (\$MXN), InTrabajo: Trabajo asalariado fuera de la unidad familiar

Figura 22. Gráficos de radar de los indicadores de las unidades familiares.
Fuente: elaboración propia en RStudio con datos recabados durante el trabajo de campo.

La especialización en cultivos agroindustriales en el Soconusco está bien documentada, así como la capitalización y enfoque hacia el mercado por parte de los “pequeños productores” que los cultivan, aunque hay una marcada polarización en este sentido; tanto que el productor que posee 2 ha de palma estaría muy por debajo de la superficie que manejan los demás productores.

Así pues, Castellanos-Navarrete y Jansen (2018), basados en 250 encuestas en Huixtla y Villa Comaltitlán, señalan que los productores de palma varían según su sector (social o privado) y clase económica; los pequeños productores orientados al mercado (3.6 hectáreas en promedio) dedican el 89% de sus parcelas a palma y el 8% a otros cultivos comerciales (como caña de azúcar y plátano), mientras que seis grandes productores privados (486 hectáreas en promedio) combinan palma (92% de la parcela) con pastura y ganadería (350 cabezas). Por su parte, Hernandez Solís y Castro Martínez (2023) describen cómo las zonas bajas del Soconusco, anteriormente ocupadas por cultivos tradicionales como algodón, maíz y arroz, se transformaron en

cañaverales; que tales productores se agremian en dos organizaciones de 1 497 ejidatarios en total (75% ejidatarios y 25% propietarios privados), manejando 9.5 hectáreas en promedio con un rendimiento de 87 toneladas/hectárea, vendidas a \$1 115 por la tonelada; asimismo, se indicó que algunos de esos productores destinan parte de sus ganancias a la compra de más tierras (gracias a que la mayoría de los ejidos en la región se parcelaron) y varios de ellos también mencionaron sembrar de forma complementaria palma y mango.

De lo que se infiere que existe una marcada capitalización y diferenciación socioeconómica tras la proliferación de cultivos comerciales como el mango, la caña y la palma en la zona baja (planicie) de la región. Comparando la extensión de tierras y productividad de dichos productores con los SAF, se puede entender la vulnerabilidad de los SAF y la tendencia a desplazarlos o a optar por cultivos más rentables y menos multifuncionales. En contraste, los SAF café han sido golpeados por crisis climáticas y fitosanitarias fuertes. Así pues, Roma Ardón *et al.* (2022) confirman lo anterior: la llegada de la moniliasis en 2005 y condiciones estructurales adversas desmotivaron a los productores de cacao en Tuzantán, llevando al abandono de los SAF tradicionales¹⁷, a la venta de la parcela o a su conversión a potreros, caña de azúcar y palma, o a la introducción de café robusta.

Los SAF tradicionales, como el policultivo de Cuarto Cantón, ofrecen beneficios económicos, sociales y ambientales, alineándose con la multifuncionalidad agraria (Cairol *et al.*, 2009; Silva Pérez, 2010). Sin embargo, la transición agroecológica enfrenta retos ante la dominancia de monocultivos industriales (Castellanos-Navarrete & Jansen, 2018) y la vulnerabilidad de los SAF frente al cambio climático y las crisis fitosanitarias —como la moniliasis en cacao, la broca (*Hypothenemus hampei* (Ferrari)) y la roya del cafeto—. La alta dependencia de subsidios y la dominancia del trabajo fuera de la UP subrayan una fragilidad socioeconómica. Por lo tanto, son esenciales

¹⁷ Los SAF abandonados fungen como fuente primaria de inóculo de tal hongo y en ocasiones son sujetos a visitas esporádicas por los productores que buscan cacao, madera para aserrío o frutos para vender; ello ha implicado la pérdida de conocimientos bioculturales asociados al cacao (Roma Ardón *et al.* 2022).

políticas públicas integrales para fortalecer a los SAF, preservar su valor biocultural y mitigar los impactos ambientales de los monocultivos y del cambio climático. Al tiempo que, los SAF pueden facilitar la adaptación a este último (gracias, por ejemplo, a su rol de fijación de carbono, de termorregulación y de preservación de la biodiversidad); tales políticas deben equilibrar objetivos multidimensionales, teniendo en cuenta que los monocultivos de exportación se están fortaleciendo, al tiempo que estos también podrían usar prácticas agroforestales para aminorar sus externalidades negativas.

Entre las limitaciones del estudio se tiene que no se valorizó el ingreso por árboles, pimienta, canela o otros cultivos de alto valor comercial debido a que su producción es muy variable; además, el cálculo solo se basó en nueve productores, lo que limita su generalización, si bien la inferencia no abarcó a todos los demás productores; sin embargo, se citaron varios documentos que respaldan las afirmaciones aquí plasmadas. Futuros estudios podrían abarcar más regiones del Soconusco y explorar la dinámica de largo plazo de la multifuncionalidad con este u otros enfoques (considerando también, por ejemplo, la captura de carbono de cada SAF), así como la evolución de los SP ante las actuales políticas públicas para el campo. Los SAF donde domina mango y mamey no fueron considerados, por lo que será necesario analizarlos en estudios posteriores; también se recomienda investigar con este enfoque la zona norte de Chiapas y la región Selva; en donde, en general, existe menos investigación.

5.5.4. Conclusiones

En conjunto, prácticamente todas las UP analizadas pueden ser consideradas de subsistencia, dado su bajo nivel de capitalización, dependencia de apoyos gubernamentales y limitada inserción en cadenas de valor agroindustriales (al solo tratarse de “pequeños proveedores”). Los SP con mayores ingresos agrícolas fueron la palma africana (2 hectáreas) y la ganadería (6 hectáreas), seguidos por el cacao convencional de Huehuetán (3 hectáreas) y el cacao con manejo integrado de Cuarto Cantón (1.25 hectáreas); exceptuando estos últimos dos sistemas, se encontró que el cacao tiene un rol económico secundario frente a otros SP más rentables o respecto al empleo fuera de la UP. Debido a lo anterior, las dos UF más multifuncionales incluyeron palma y ganadería debido a mayores ingresos por poseer una mayor

superficie y a subsidios gubernamentales (al menos el 50% del ingreso en varios casos, lo que se repite con adultos de la tercera edad y con parcelas de mayor superficie); esta última les permitió acceder a Sembrando Vida (que requería 2.5 ha de terreno despejado). Lo que refleja, por un lado su dependencia ante ese ingreso, pero también su ventaja con respecto a las demás UP de menores dimensiones. Por otro lado, en la UP 3, de cacao con manejo integrado de Cuarto Cantón se presentó el SAF más multifuncional, gracias a su diversidad arbórea, alto rendimiento de grano y autosuficiencia, pese a no tener tanto ingreso por apoyos gubernamentales. Sin embargo, ese manejo requiere mucho esfuerzo físico del productor y un soporte institucional consistente. Lo que contrasta con el hecho de que actualmente solo subsisten dos asociaciones de productores de cacao en la región, lo que evidencia el debilitamiento organizativo y fallas estructurales.

Los SAF pueden potenciar la sostenibilidad y la multifuncionalidad agraria ante los desafíos socioambientales actuales (como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad); lo que contrasta con la tendencia hacia monocultivos más rentables pero con menos beneficios multidimensionales, ante productores industriales que buscan ampliar su capital y tierras (quienes, además, no ven en el SAF con cacao una alternativa económica atractiva). Además de su valor productivo, los SAF con cacao poseen componentes remanentes de las selvas originales, hoy prácticamente inexistentes en la región. Esta vegetación contribuye a la termorregulación local, haciendo que las unidades productivas sean menos vulnerables a las alteraciones climáticas; dicha función ecosistémica adquiere especial relevancia en la región, donde la hidrología ha sido profundamente modificada, lo que implica afectaciones a la resiliencia territorial y a los flujos hidrográficos naturales.

Finalmente, se recomienda fortalecer los programas actuales para el campo y hacer una reorientación de estos para adecuarse a tal realidad; así como considerarse el manejo integrado, la diversificación productiva, la vinculación y la asociatividad. Otra forma de fortalecer a los SAF sería, por ejemplo, mediante el pago por servicios ambientales y la mejora de la trazabilidad del grano.

5.7. Literatura citada

- Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2007). Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*, 16(1). <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/133>
- Arias González, J. (2014). Un vertiginoso viaje etnohistórico dentro de los “imaginarios alimentarios” en el simbolismo del cacao en México. *An. Antrop*, 48(1), 79–95. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0185-1225\(14\)70490-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0185-1225(14)70490-4)
- Cairol, D., Coudel, E., Knickel, K., Caron, P., & Kröger, M. (2009). Multifunctionality of Agriculture and Rural Areas as Reflected in Policies: The Importance and Relevance of the Territorial View. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 11(4), 269–289. <https://doi.org/10.1080/15239080903033846>
- Castellanos Navarrete, A. (2023). Un monocultivo de frontera: Historia de la palma africana como proyecto de modernidad capitalista en el sur de México (1948-2018). *Journal of Latin American Geography*, 22(1), 57–82. <https://doi.org/10.1353/lag.2023.a899554>
- Castellanos-Navarrete, A., & Jansen, K. (2018). Is Oil Palm Expansion a Challenge to Agroecology? Smallholders Practising Industrial Farming in Mexico. *Journal of Agrarian Change*, 18(1), 132–155. <https://doi.org/10.1111/joac.12195>
- Cochet, H., & Devienne, S. (2013). *AGRICULTURA FAMILIAR: Metodología para su estudio* (C. Márquez Rosano, Trans.).
- del Carpio Penagos, C. U. (2017). Soconusco, Chiapas. Transformaciones ambientales de origen antrópico. *Decumanus*, 2(2), 7–26. <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/decumanus/article/view/1991>
- Díaz-José, Ó., Porras-Umaña, V. H., & Aguilar Ávila, J. (2013). *El cacao (Theobroma cacao): avances y retos en la gestión de la innovación: Vol. Col. Trópi* (1a ed.). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo (UACH). <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/285>
- Escobar Flores, R. E., & Castillo Santiago, M. A. (2021). Cambios en la cobertura y uso del suelo en la región del Soconusco, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.755>
- ESRI. (2022). *World imagery*. Environmental Systems Research Institute. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9#!>
- Ferraton, N., Touzard, I., & du Rozier, É. C. (2006). *OBSERVAR Y ENTENDER UNA AGRICULTURA FAMILIAR CON EL ENFOQUE SISTÉMICO: Libreta 1 - Pasos y metodología para la realización de un estudio-diagnóstico* (E. Le Capitaine, Trans.). Supagro Montpellier.
- Fisher-Ortíz, R. A., Rodríguez-Robles, U., Aldasoro-Maya, E. M., Soto-Pinto, M. L., & Chávez-García, E. (2022). Sistemas agroforestales de cacao y resiliencia: factores potenciales ante el cambio climático en México. *Tropical and*

- Subtropical Agroecosystems*, 25(2), 1–25.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4121>
- Hernandez Solís, M. F., & Castro Martínez, S. C. (2023). *La influencia del ingenio azucarero en la economía local de la zona baja de Huixtla, Chiapas* [Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Facultad de Ciencias Administrativas y Tecnologías Digitales, Subsede Huixtla].
<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/4874>
- INEGI. (2017). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (continuo nacional). In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Autor.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- Infante, F., Quilantán, J., Rocha, F., Esquinca, H., Castillo, A., Ibarra Núñez, G., & Víctor Palacio, Y. (2011). Mango ataulfo: orgullo chiapaneco. *Biodiversitas*, 96, 1–5.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Autor.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. John Wiley & Sons.
- Leroux, L., Clermont-Dauphin, C., Ndiénor, M., Jourdan, C., Roupsard, O., & Seghier, J. (2022). A spatialized assessment of ecosystem service relationships in a multifunctional agroforestry landscape of Senegal. *Science of The Total Environment*, 853, 158707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158707>
- Libert-Amico, A., & Paz-Pellat, F. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*, 24(núm. especial), e2401914.
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914>
- Lundgren, B. O. (1987). Institutional aspects of agroforestry research and development. In H. A. Steppeler & P. K. R. Nair (Eds.), *Agroforestry: A decade of development* (pp. 43–51). International Council for Research in Agroforestry (ICRAF).
https://apps.worldagroforestry.org/Units/Library/Books/PDFs/07_Agroforestry_a_decade_of_development.pdf?n=28
- Mendoza-Hernández, C., Rosas-Quijano, R., Vazquez-Ovando, A., & Galvez-Lopez, D. (2020). Retos y controversias del mango Ataulfo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1633–1645.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2199>
- Montoya, D., & Toledo, V. M. (2020). Historia de la caficultura en Chiapas (1880-2010). Apuntes de una evolución social y ambiental. *Sociedad y Ambiente*, 23, 1–25.
<https://doi.org/10.31840/sya.vi23.2187>
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Márquez-Berber, S. R., & Valdés-Velarde, E. (2022). Composición florística y arreglo de sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(67). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3840>
- Nájera-Conrado, M. I. (2011). El mono y el cacao: la búsqueda de un mito a través de los relieves del grupo de la serie inicial de Chichén Itzá. *Estudios de Cultura Maya*, 39, 135–172.

- Roma Ardón, R. W., Damon, A. A., & Ortiz, W. S. (2022). EL POLICULTIVO DE CACAO (*Theobroma cacao* L) Y LA CULTURA QATO'OK DE TUZANTÁN, CHIAPAS, MÉXICO: UNA APROXIMACIÓN ETNOECOLÓGICA. *Ethnoscintia - Brazilian Journal of Ethnobiology and Ethnoecology*, 7(4), 14–32. <https://doi.org/10.18542/ethnoscintia.v7i4.12777>
- Rueda Vázquez, D. de A., & Vidal Fócil, A. B. (2022). Paisaje de café y cacao de Chiapas y Tabasco, México: Estrategia resiliente. *Journal of Tourism and Heritage Research*, 5(4), 122–133.
- Sánchez Osorio, E., & Prado Ramírez, R. (2019). Condiciones sociales de la producción del mango Ataulfo en la región del Soconusco, Chiapas, México. *Investigación En La Educación Superior - Hidalgo 2019, Academia J*, 2709–2714.
- Schwarz, G., Vanni, F., Miller, D., Helin, J., Pražan, J., Albanito, F., Fratila, M., Galioto, F., Gava, O., Irvine, K., Landert, J., Quero, A. L., Mayer, A., Monteleone, D., Muller, A., Rööös, E., Smyrniotopoulou, A., Vincent, A., Vlahos, G., & Zilāns, A. (2022). Exploring Sustainability Implications of Transitions to Agroecology: a Transdisciplinary Perspective. *EuroChoices*, 21(3), 37–47. <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12377>
- SIAP. (2022). *Datos Abiertos: Estadística de Producción Agrícola*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Silva Pérez, R. (2010). Multifuncionalidad agraria y territorio: Algunas reflexiones y propuestas de análisis. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales (EURE)*, 36(109), 5–33. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612010000300001>
- Silva, S. P. (2015). A Agricultura Familiar e suas Múltiplas Interações com o Território: uma análise de suas características multifuncionais e pluriativas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2076, 46. https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=25083
- Somarriba, E., Peguero, F., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., López-Sampson, A., Leandro-Muñoz, M. E., Jagoret, P., & Sinclair, F. L. (2021). Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9>
- Suárez-Venero, G. M., Avendaño-Arrazate, C. H., Ruíz-Cruz, P. A., & Estrada-de los Santos, P. (2019). Diversidad arbórea y carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Soconusco Chiapas, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 25(3), 315–332. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.12.093>
- Vejre, H., Abildtrup, J., Andersen, E., Andersen, P. S., Brandt, J., Busck, A., Dalgaard, T., Hasler, B., Huusom, H., Kristensen, L. S., Kristensen, S. P., & Præstholm, S. (2007). Multifunctional agriculture and multifunctional landscapes — land use as an interface. In Ü. Mander, H. Wiggering, & K. Helming (Eds.),

Multifunctional Land Use (pp. 93–104). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-36763-5_6

CAPÍTULO 6. DIAGNÓSTICO AGRARIO DE UNIDADES PRODUCTIVAS QUE INCLUYEN CACAO EN LA CHONTALPA, TABASCO Y SU CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO¹⁸

6.1. Resumen

En México, el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) se da en esquemas de agroforestería tradicional que le otorgan múltiples funciones —desde socioeconómicas hasta ambientales—; sin embargo, este sistema es vulnerable al cambio climático. Se realizó una caracterización razonada de unidades productivas con cacao en la Chontalpa, la principal región cacaotera de México. Ello se llevó a cabo mediante el diagnóstico agrario y el análisis de las innovaciones de los productores de cacao; de igual modo, se buscó explorar su capacidad de adaptación y sus estrategias de adaptación al cambio climático. Se realizaron revisiones de literatura, encuestas y entrevistas semiestructuradas. Se incluyeron a cuatro productores convencionales y a cuatro productores de cacao orgánico, sin ser exhaustivos en sus diferencias. Se encontraron diferencias entre los sistemas productivos y su rentabilidad, así como entre sus fuentes de ingreso: el control de las enfermedades y el rendimiento del cacao fue muy superior en los sistemas orgánicos. Además, fue común que los programas gubernamentales aportaran más del 50% de los ingresos. La baja rentabilidad e inversión en el cacao, mayormente con los productores de tipo convencional, y su baja capacidad de adaptación, sugieren la necesidad de potenciar las políticas entorno a este cultivo multifuncional.

Palabras clave: sistemas agroforestales, manejo agronómico, enfermedades del cacao, regionalización agrícola, historia agrícola.

6.2. Abstract

In Mexico, cacao (*Theobroma cacao* L.) is cultivated within traditional agroforestry systems that fulfill multiple roles—spanning socioeconomic, ecological, and cultural dimensions—yet these systems remain vulnerable to climate change. A reasoned characterization of cacao-producing units in Chontalpa, the main cacao-growing region in Mexico, was conducted. This was carried out through agrarian diagnosis and an analysis of innovations among cacao producers. Additionally, the study aimed to explore their adaptive capacity and adaptation strategies to climate change. Literature reviews, surveys, and semi-structured interviews were conducted. The study included four conventional producers and four organic cacao producers, without being exhaustive in their differences. Differences were found between productive systems and their profitability, as well as in livelihoods: disease control and cacao yield were

¹⁸ Sometido a: *Revista de Geografía Agrícola*.
Estado: Sometido.

significantly higher in organic systems. In addition, it was common for government programs to contribute more than 50% of producers' income. The low profitability and investment in cacao, especially among conventional producers, along with their limited adaptive capacity, suggest the need to strengthen policies surrounding this multifunctional crop.

Keywords: agroforestry systems; agronomic management, cocoa diseases; agricultural regionalization, agricultural history.

6.3. Introducción

El cacao soporta una agroindustria mundial multimillonaria: la del chocolate y los derivados de este grano (ICCO, 2012). Además, los sistemas agroforestales (SAF) de cacao (*Theobroma cacao* L.) representan uno de los sistemas agrícolas tradicionales más emblemáticos de México, Centroamérica y Suramérica, destacándose por su rica carga biocultural y su papel como importante fuente de agrobiodiversidad. Para el sureste del México, se trata de un legado que se remonta a Mesoamérica: desde las culturas olmeca y maya hasta nuestros días (Nájera-Conrado, 2011). Estos sistemas generan externalidades sociales, como el autoempleo familiar y la creación de jornales, así como funciones ambientales imprescindibles para la sociedad en su conjunto, incluyendo la conservación de la biodiversidad, la mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono y el equilibrio de ciclos naturales (Morán-Villa *et al.*, 2022; Salvador-Morales *et al.*, 2020). Esta relevancia se acentúa en regiones como la Chontalpa, donde las selvas prácticamente han desaparecido y los SAF, al desarrollarse en policultivos tradicionales, imitan estructural y composicionalmente la vegetación original (Salvador-Morales *et al.*, 2019). De acuerdo con una clasificación popular (Rice and Greenberg, 2000), a estos sistemas se les denomina como “agrobosques”, y en ausencia de manejo pueden evolucionar hacia vegetación secundaria. Su diversidad de especies frutales los ha llevado a ser conocidos como “selvas comestibles” (Espinosa Sánchez *et al.*, 2020), mientras que su variada composición y la presencia de árboles nativos los posicionan como relictos de vegetación arbórea original en paisajes dominados por monocultivos (Salvador-Morales *et al.*, 2020). Por tanto, algunos de los elementos arbóreos de estos SAF son especies típicas de selvas altas, de particular importancia ante el cambio climático (Santos-Hernández *et al.*, 2021). Es necesario precisar que este SAF se encuentra en

manos de pequeños productores o bajo esquemas de agricultura familiar de forma dominante (Espinosa Sánchez *et al.*, 2020).

En concordancia con lo anterior, la agroforestería implica el uso del mismo espacio para una multitud de tareas agropecuarias y forestales, así como la obtención de beneficios (bienes y servicios), de forma ordenada en el tiempo y el espacio (Casanova-Lugo *et al.*, 2016).

La presente investigación se centró en explorar razonadamente el estado actual de sistemas productivos que incluyen cacao en la Chontalpa, la región con mayor volumen y superficie de producción de cacao en México (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP, 2022), tomando casos representativos (dos grupos: productores convencionales orgánicos sin asociatividad y productores orgánicos agremiados) de Cárdenas y Cunduacán, Tabasco. Lo anterior, con base en el diagnóstico agrario (socioeconómico y productivo), análisis de las innovaciones agrícolas y los medios de vida campesinos. El diagnóstico, a su vez, sirvió para explorar la historia agrícola regional, la regionalización agrícola y la complementariedad económica de las unidades productivas (por ingreso agrícola y no agrícola); esto es, el conjunto de sistemas productivos de un mismo productor. Dicho método también sirvió para entender los factores de cambio y destacar oportunidades de mejora (recomendaciones de política pública). De igual modo, se buscó caracterizar la capacidad de adaptación ante el cambio climático de estos productores, ante la perspectiva de cambios en la incidencia de las enfermedades del cacao.

6.4. Materiales y Métodos

6.4.1. Área de estudio

El área de estudio en concreto, que comprendió partes de los municipios de Cárdenas y Cunduacán, Tabasco (Figura 25 y Figura 26), se encuentra en la subprovincia fisiográfica Llanuras y Pantanos Tabasqueños, dentro de la provincia Llanura Costera del Golfo Sur. La topoforma es una llanura aluvial, y en particular es una vega de río. Está dentro de la cuenca hidrológica RH30-D (Grijalva-Villahermosa). Esta área, a una altitud de 5 a 15 metros sobre el nivel del mar, presenta un relieve plano con agricultura,

que es propensa a inundaciones estacionales. El clima es cálido-húmedo de tipo Am(f), con lluvias abundantes en verano. La temperatura media anual oscila entre 26 y 28°C. La precipitación varía entre 1,500 y 2,000 mm anuales en Cunduacán, y entre 2,000 y 2,500 mm en Cárdenas. Geológicamente, la región está dominada por depósitos sedimentarios del Cenozoico, principalmente aluviales, que contribuyen a la fertilidad de los suelos: predominan los *Fluvisols*, de textura limo-arcillosa, fértiles y bien drenados, y los *Gleysols*, ácidos y saturados según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2001).

6.4.2. Métodos

El estudio se desarrolló mediante un enfoque mixto. Se empleó el diagnóstico agrario o rural (con base en Cochet y Devienne, 2013 y Uribe Gómez *et al.* 2015), el análisis de innovaciones agrícolas (con base en Díaz-José *et al.*, 2013) y de los medios de vida campesinos mediante entrevistas semiestructuradas y encuestas, así como una lista de verificación para el caso de las innovaciones agrícolas.

Según Cochet y Devienne (2013), el diagnóstico agrario tiene un enfoque en el sistema productivo completo y no se basa en la idea de la optimización (máxima ganancia en el menor lapso posible), sino más bien, en el enfoque de subsistencia familiar. Este busca abarcar las actividades agrícolas principales (es decir, las más representativas) al nivel regional, a modo de modelos regionales, desde un punto de vista de la complementariedad de los sistemas productivos (SP; esto es, sistemas agrícolas, pecuarios o forestales) al nivel de unidad productiva; y, en última instancia, busca calcular su ingreso neto. Para lo cual, parte de un muestreo razonado y de un conocimiento escencial y previo de la región. Los pasos generales del diagnóstico agrario se detallan en la Figura 23: análisis del paisaje (previo a la aplicación de los instrumentos), análisis histórico (historia agrícola regional, derivado de las entrevistas y de revisión exhaustiva de literatura) y económico (cálculo de indicadores económicos con base en las respuestas de las entrevistas), además de la integración del análisis al nivel del sistema productivo, la observación de interacciones entre unidades de producción (el conjunto de sistemas productivos) y puede llegar a la definición de aspectos críticos a resolver (recomendaciones de política pública).

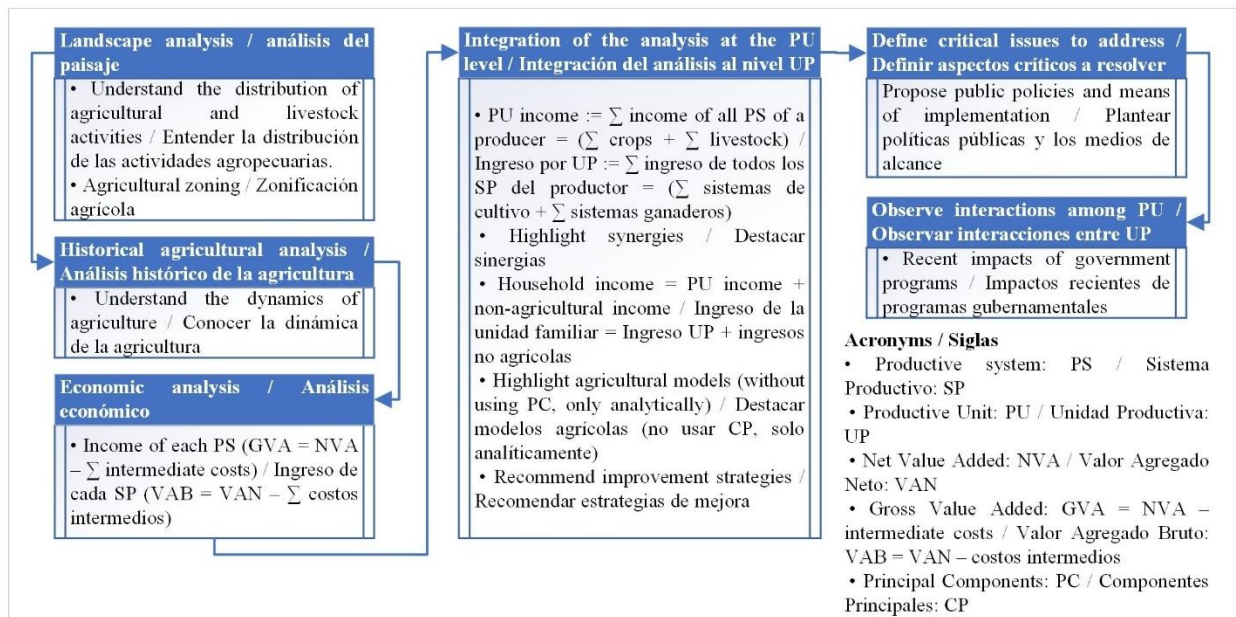


Figura 23. Pasos principales del diagnóstico agrario.

Fuente: elaboración propia con base en Cochet y Devienne (2013) y Uribe Gómez *et al.* (2015).

Por su parte, los medios de vida campesinos se conceptualizan como el conjunto de actividades, recursos y capacidades que conforman los medios de vida de los productores (Espinosa Sánchez *et al.*, 2020).

De igual modo, se buscó explorar la capacidad de adaptación de los productores de cacao (esto es, la capacidad potencial del sistema para ajustarse al cambio climático), con base en la propuesta de Maldonado-Méndez *et al.* (2022); la cual se basa en indicadores, mismos que fueron adaptados (con codificaciones propias) y aplicados mediante encuestas. Se consideraron las dimensiones, las dimensiones específicas y los indicadores que sugirieron tales autores, con adaptaciones personales, mismas que son detalladas en el Apéndice 5. Las seis dimensiones clave que recomiendan son: 1) recursos económicos, 2) recursos humanos, 3) infraestructura para la producción y mercado, 4) capital social, 5) recursos naturales y 6) institucionalidad. En concreto, se analizaron los indicadores siguientes; dimensión 1: diversificación de ingresos, tenencia de la tierra, acceso a crédito y seguros agrícolas; dimensión 2: educación, experiencia agrícola y capacitación; dimensión 3: tecnología para la producción y accesibilidad a carreteras; dimensión 4: organización; dimensión 5:

calidad del suelo (percibida por el productor), disponibilidad de agua y cobertura forestal; dimensión 6: capacidad institucional. Las respuestas fueron estandarizadas y codificadas, asignando un valor de 1 al resultado óptimo y 0 al mínimo posible. Por ejemplo, en el indicador I1, que mide la diversidad de fuentes de ingresos, el productor C-1 registró siete fuentes (el máximo absoluto de I1); para su valoración y codificación, este indicador fue normalizado dividiéndolo entre 7. Posteriormente, se obtuvo la estimación relativa de cada dimensión específica con el promedio de los valores relativos de cada indicador y luego, la estimación relativa de cada dimensión (general) con el promedio de los valores resultantes de cada dimensión específica. Finalmente, la capacidad de adaptación relativa se obtuvo como el promedio general de las seis dimensiones. Para ilustrar los resultados por dimensión se realizaron gráficos de radar por cada productor.

Por último, se sintetizaron las estrategias de adaptación al cambio climático implementadas por los productores, entendidas como el conjunto de prácticas, capacidades y respuestas mediante las cuales enfrentan impactos climáticos observados o se preparan para escenarios potenciales derivados del cambio climático (Hutchins *et al.*, 2015). Esta síntesis se construyó a partir de la observación participante y del análisis de los resultados globales, con énfasis en la perspectiva agroclimática y sus repercusiones directas sobre la producción y las principales enfermedades que afectan al cultivo de cacao.

Se trató de destacar el contraste entre dos tipos de productores. Así, se incluyeron a cuatro productores de cacao convencionales (con parcelas de pequeñas a medianas, de 1 a 9 ha) y a cuatro productores de una organización de cacao orgánico (con parcelas de 0.5 ha). Los nombres de los productores no se incluyen para asegurar su confidencialidad. Los instrumentos se incluyeron en un solo conjunto; su aplicación se llevó a cabo en agosto de 2022.

6.5. Resultados y discusión

6.5.1. Historia agrícola regional

En la Figura 24 se muestran los principales eventos que han marcado la historia del cacao en la Chontalpa. Para una línea del tiempo más detallada hasta antes del 2000, se debe consultar el Apéndice 8.

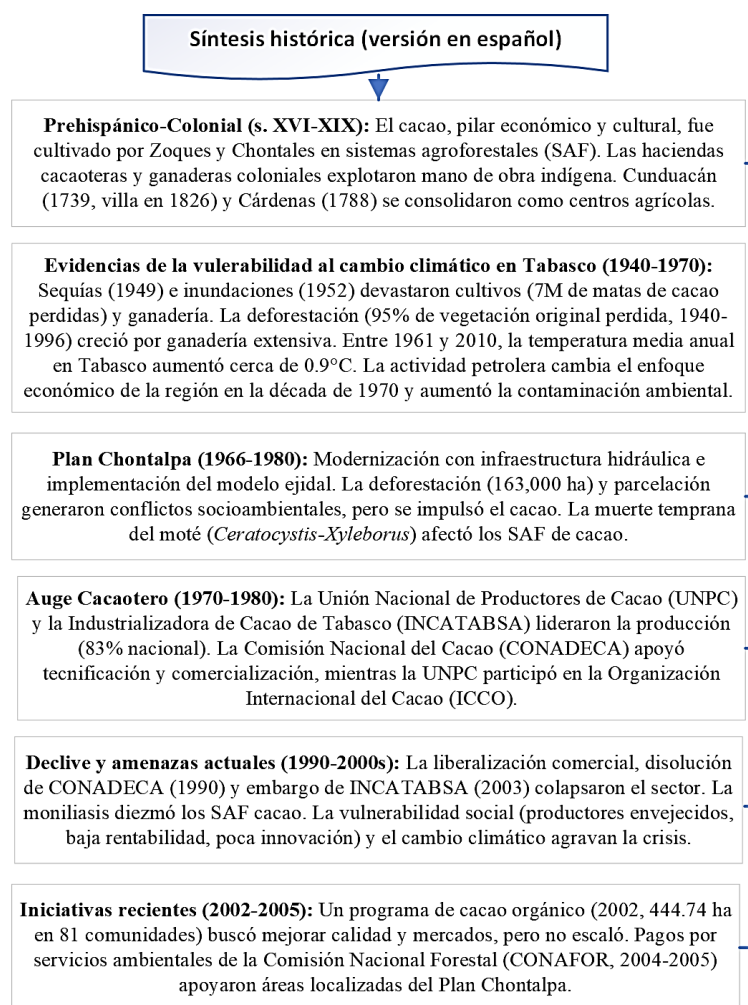


Figura 24. Síntesis histórica en torno al cacao en la Chontalpa

Fuente: elaboración propia con base en la revisión de literatura y el Apéndice 8.

El cacao actualmente se encuentra bajo una serie de amenazas, de tipo multidimensional (parasitológicas, socioeconómicas y ambientales) que atentan contra su viabilidad y, por ende, contra su futuro. Entre las amenazas parasitológicas de mayor relevancia se encuentran la moniliasis (causada por *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny), un hongo fitopatogénico, y la mancha negra,

causada por diferentes especies de oomicetes del género *Phytophthora*; ambas enfermedades pudren al fruto del cacao y son de impacto global en el país. Asimismo, *Phytophthora* no solo provoca la mancha negra, sino que también puede causar el marchitamiento parcial o total de la planta de cacao en cualquiera de sus etapas de desarrollo (Acebo-Guerrero *et al.*, 2012). La entrada de la moniliasis en 2005 (Phillips-Mora *et al.*, 2006) marcó un antes y un después en la cacaocultura mexicana, al provocar la pérdida de numerosos SAF por falta de estrategias de manejo, ante un contexto de alta vulnerabilidad social como se explica más adelante.

Existe alta vulnerabilidad del subsistema social, marcada por productores de edad avanzada, SAF envejecidos, bajo control de calidad de la plántula, limitada capacitación técnica, inadecuado manejo de los árboles de sombra (conocidos regionalmente como “madreado”) y del suelo, así como baja rentabilidad y escasa reinversión en el cultivo. A esto se suma una baja adopción de innovaciones agrícolas, poca organización, escaso valor agregado al cultivo y trazabilidad, minifundismo, etc. (Sántiz Tovilla *et al.*, 2023). Además, la contaminación ambiental y el cambio climático también amenazan la producción de cacao en México (Méndez Sánchez *et al.*, 2019; Pérez Sosa y Granados Ramírez, 2020).

Históricamente, la liberalización de mercados, la eliminación de controles de precios y la desaparición de paraestatales como la Comisión Nacional del Cacao (CONADECA) han intensificado estas condiciones de vulnerabilidad, fomentando mayor minifundismo, segregación social, migración y acaparamiento de propiedades y productos. De hecho, los SAF de cacao de propiedad privada o cercanos a áreas urbanas, son más susceptibles al cambio de uso de suelo (Oporto-Peregrino *et al.*, 2020), lo que ha reducido la superficie dedicada al cultivo y compromete su rol en la mitigación climática, y en los demás beneficios ambientales y socioeconómicos asociados al cacao. Esto acentúa la agricultura de infrasubsistencia y eleva el riesgo de caer en la pobreza (Chávez-García *et al.*, 2012), limitando inversiones en prácticas adaptativas como la asociación de productores, la diversificación de cultivos o la mejora de la cadena de valor.

En 2002, el Gobierno del Estado de Tabasco (a través de SEDAFOFOP) implementó un programa de reconversión productiva de cacao convencional a orgánico en el cual participaron 81 comunidades con 444.74 ha; tal programa buscó producir un cacao inocuo y de mayor calidad, abrir mercados internacionales y mejorar la calidad de vida de los productores (Priego-Castillo *et al.*, 2009). En dicho programa tuvo su origen la asociación de cacao orgánico que aquí se documenta. Sin embargo, el programa no se ha escalado a nivel estatal, seguramente debido a problemas de adopción y falta de financiamiento.

Dicho contexto ha llevado a un desaliento generalizado en el cultivo del cacao, que, si se suma a la disgregación social y al proceso de desterritorialización que ocurre en la región (Ramírez Martínez, 2021), apuntan hacia un futuro incierto. Lo anterior es aplicable a la producción convencional, pero con diferencias contrastantes en varios aspectos respecto a SAF manejados de forma agroecológica u orgánica (Castelán-Estrada y Chávez-García, 2019). En consecuencia, existe el riesgo de perder paulatinamente este sistema, junto con los valiosos servicios socioeconómicos y ecosistémicos que de él se derivan.

6.5.2. Regionalización agrícola

En la Figura 25 se muestra la regionalización agrícola. Los triángulos azules indican las ubicaciones de los productores encuestados y entrevistados. Río Seco presenta únicamente cuerpos de agua aislados entre ambas carreteras (Cárdenas-Comalcalco), sin continuidad funcional como cauce fluvial. El área que aparece en blanco no quiere decir que no haya ningún uso del suelo: es la forma en que quedó representado ese espacio con base en información provista por la Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable de Tabasco (OEIDRUS, 2023); de hecho, este parece corresponder a un uso agrícola (y en menor medida vegetación secundaria), principalmente pastizales y parcelas no georreferenciadas por OEIDRUS.

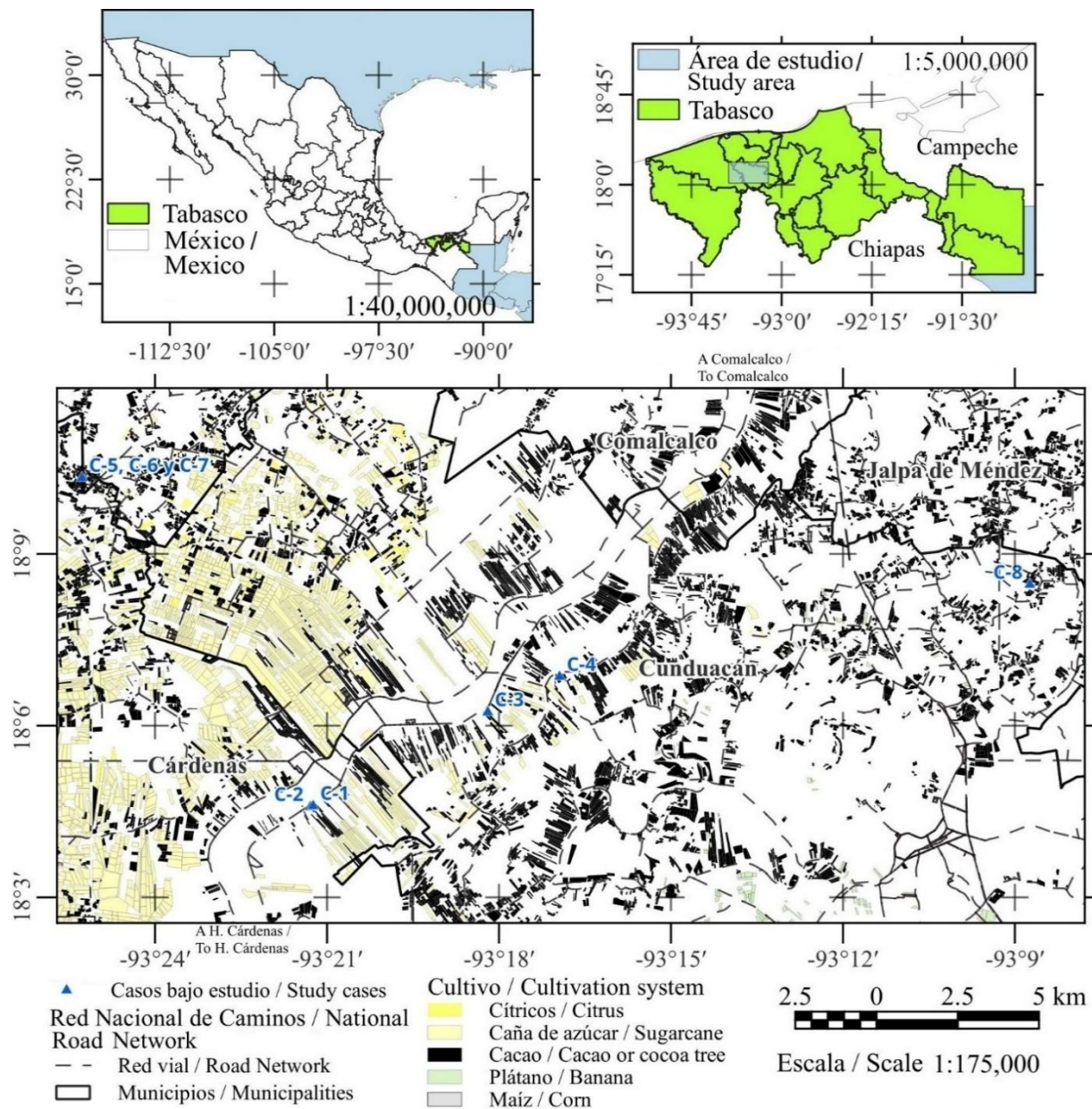


Figura 25. Regionalización agrícola en el área de estudio.

Fuente: elaboración propia en Qgis 3.32.3 con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, (2017a; 2017b) y OEIDRUS (2023).

De hecho, en la Figura 26 se puede ver claramente lo anterior de forma espacialmente continua: los colores verde fuerte corresponden a SAF de cacao, el azul a cuerpos de agua, los rosa-rojizos a terrenos recién labrados destinados a caña de azúcar y en menor medida a cultivos anuales, los verde claros son caña de azúcar en etapas avanzadas y los colores claros (blanco a amarillo) son pastizales destinados a la ganadería. Este paisaje se caracteriza por una distribución heterogénea de usos del

suelo y refleja el entramado de mosaicos agrícolas y la transición entre SAF, monocultivos y potreros.

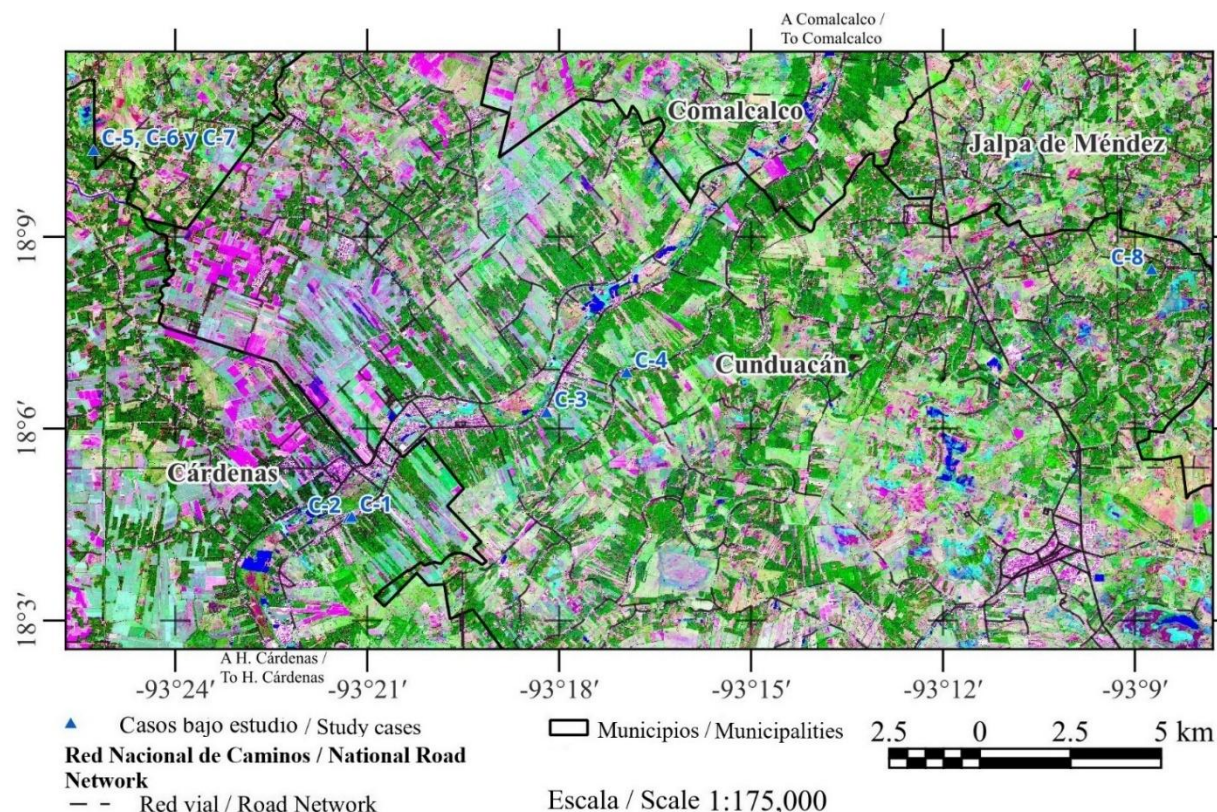


Figura 26. Imagen satelital en falso color (SWIR, NIR y verde) del área de estudio en 2011.

Fuente: elaboración propia con datos del INEGI (2017a; 2017b) y una imagen satelital del SPOT 5 HRG (Centre National d'Études Spatiales, 2025) del 28 de marzo del 2011, ortorectificada y fusionada (imágenes multiespectral y pancromática) en ENVI 5.6 y mapeada en Qgis 3.32.3.

6.5.3. El sistema agroforestal cacao

Carrasco (1989), señala que en Tabasco el SAF cacao más importante por extensión (90% de superficie cultivada) era el que se daba bajo la sombra de leguminosas: moté, chipilcoite (guachipilin o chipilin), cocohite y samán (*Samanea saman*); *S. saman* se usó como recomendación de la desaparecida CONADECA y tras la emergencia fitosanitaria de la muerte temprana del moté, que cambió tal composición de los SAF en la década de 1980 (Córdova Ávalos *et al.*, 2001), sobre todo en áreas del Plan Chontalpa; tal enfermedad se le atribuyó al complejo hongo-insecto barrenador *Ceratocystis cacaofunesta* Engelbrecht & Harrington – *Xyleborus* spp. (Cibrián-Tovar

et al., 2007); además, *C. cacaofunesta* es el agente causal del ‘mal del machete’ en cacao. Carrasco (1989), indica que el SAF cacao y coco (*Cocos nucifera*) es el que le seguía en extensión (7% de superficie cultivada) y representaba un sistema característico del borde costero. Mientras que con el 3% de superficie sembrada restante, se encontraba el SAF cacao y otros cultivos: hule (*Hevea brasiliensis*), mango, cítricos y pimienta gorda.

Al ser el cacao una especie umbrófila, requiere de sombra (Vázquez-Yañes *et al.*, 1999). Aunque en el extranjero, se tienen ciertos clones que presentan tolerancia al sol como el CCN-51 de Ecuador; los cuales se siembran en monocultivo, producen más, aunque con menor calidad y no presentan externalidades positivas adicionales como los policultivos que se presentan en el país, aunado a que quedan más expuestos a la variabilidad climática. Los SAF tradicionales de cacao (Figura 27, Figura 28 y Figura 29), por su parte, se conforman de una serie de estratos verticales (de tres a cuatro): árboles de sombra, árboles de porte arbustivo o palmas, cacao y el estrato herbáceo (arvenses competidoras); además se aprovechan, frutos, maderas, medicinas, etc., a la vez que se producen una serie de externalidades ambientales positivas de una forma espaciotemporal dinámica.

Para su establecimiento, se hace una planeación en diferentes fases (Figura 27 y Figura 28):

- Producción de plántula: de forma dominante se prefiere realizar mediante “pie franco”, plántula germinada de semilla y producida directamente en la parcela con sustrato de residuos del “quebradero” (lugar donde se hace el beneficiado), en bolsa de plástico; la variedad producida correspondió de forma dominante a “guayaquil” y a una mezcla del complejo neocriollo, trinitario regional y forastero, ya que en ninguna parcela se reportó la presencia de una variedad en específico. Algunas de las cuales correspondían a variedades heredadas de la CONADECA.
- Establecimiento: a la primer sombra se le denomina “chichihua” y se compone de plátano (*Musa* spp., que tardan unos 8 a 12 meses en comenzar la

producción) y achiote (*Bixa orellana* L.), que es usado como complemento alimenticio. Para aprovechar el espacio, y previo a que se cierre el dosel del SAF, en ocasiones se siembra milpa (maíz: *Zea mays* L., frijol: *Phaseolus* spp., etc.).

Para evitar la pérdida de plátano por exceso de humedad y la consecuente mayor propensión de enfermedades (como la sigatoka negra, causada por *Pseudocercospora fijiensis* (M. Morelet) Deighton sinonimia de *Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet), en algunos casos se recurre a plantarles sobre camellones.

- Posteriormente se introducen los árboles de sombra deseables y se replanta cacao cuando este no prospera, se vuelve improductivo o muere por patógenos, a la par que se va eliminando la chichihua; así, hasta obtener la estructura y composición buscadas, en la región tales cuestiones han sido previamente estudiadas (Morán-Villa *et al.*, 2022; Ramírez-Meneses *et al.*, 2013; Zequeira-Larios *et al.*, 2021).

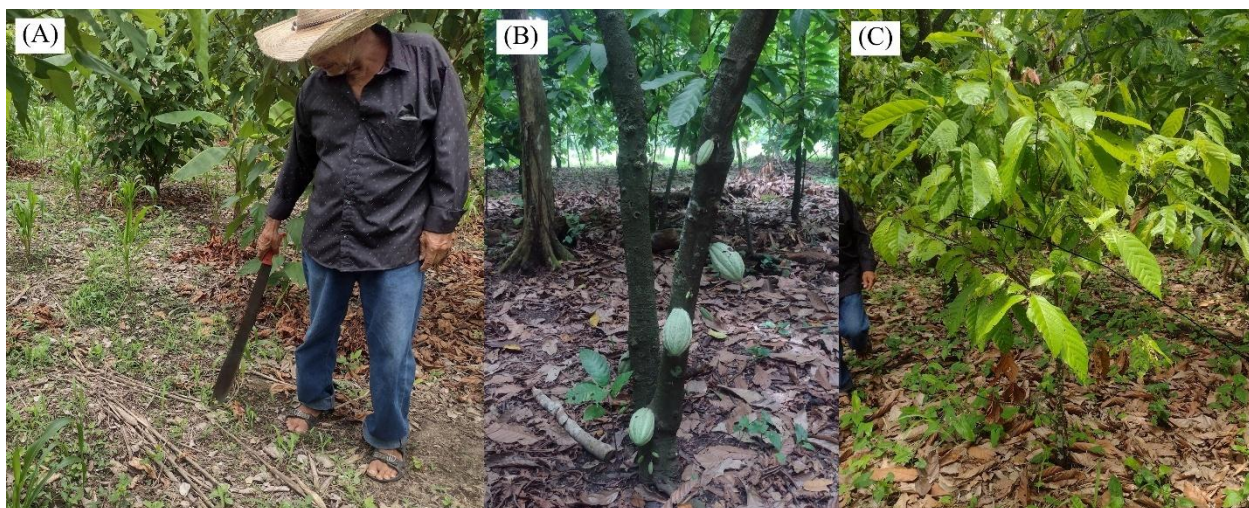


Figura 27. El sistema agroforestal cacao en la Chontalpa (Huimango, 2ª sección, Cunduacán).

(A) Primer sombra del cacao o “chichihua”, que consiste en milpa, achiote y plátano; el productor señala el lugar donde será plantado el renuevo de cacao. (B) Sistema maduro, en producción: frutos de 2 meses aproximadamente. (C) Renovación de plantas: planta de 2 años de haber sido plantada.

Fuente: créditos AFSH.

La producción del cacao inicia tras unos 3 años y medio a 4 años del establecimiento y se mantiene estable hasta los 30-35 años, aunque con manejo los SAF pueden mantenerse productivos por más tiempo, aunado a que es posible su rehabilitación (recambio paulatino de plantas); pese a ello, los mayores costos en el SAF son la renovación y la rehabilitación (Somarriba *et al.*, 2021; Wiegel *et al.*, 2020). En algunos casos se reportaron parcelas de hasta 70 años, pero también hubieron de 15 años.

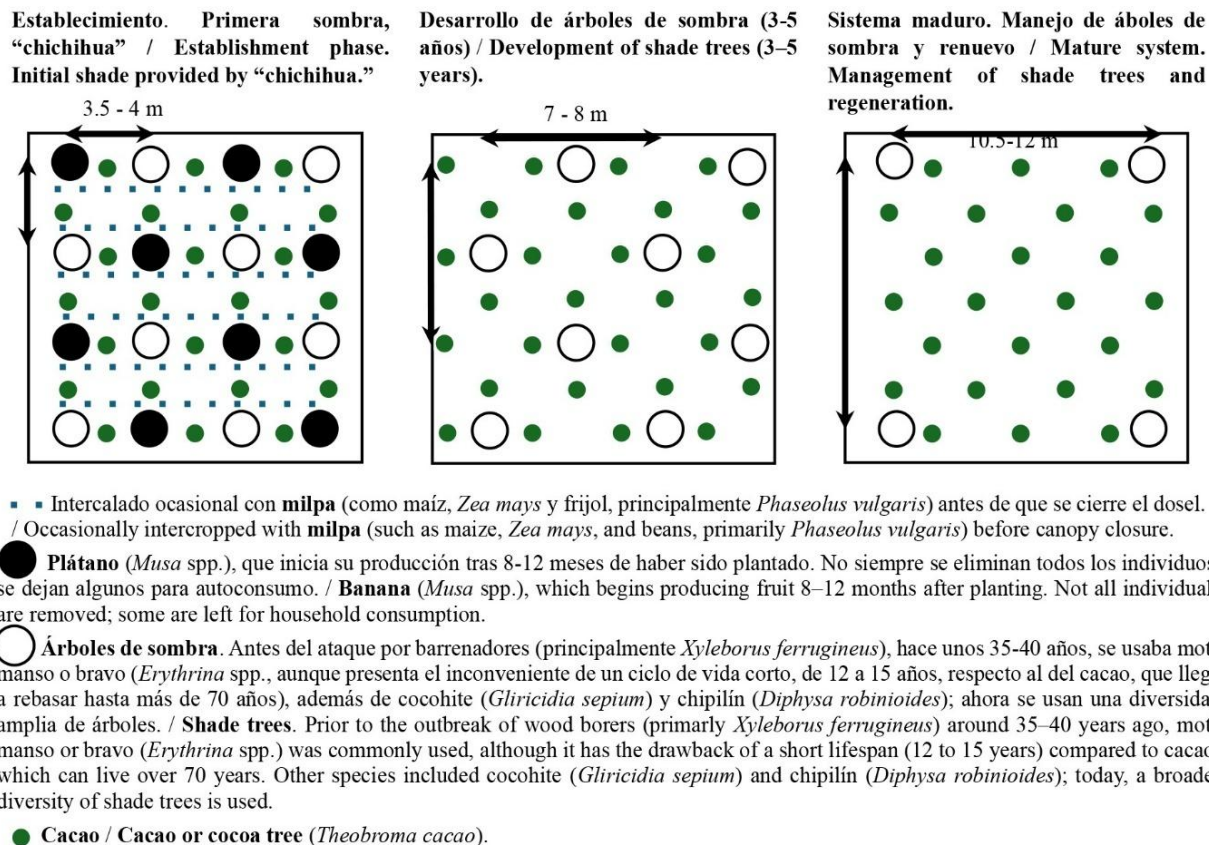


Figura 28. Etapas y arreglos espaciales del sistema agroforestal cacao en la región de la Chontalpa, Tabasco.

Fuente: Elaboración propia con base en el trabajo de campo.

Los árboles de sombra, además del sombreado que proveen al cacao, presentan funciones adicionales, dependiendo de su naturaleza. Algunos de los más comúnmente reportados por los productores, aparte de los ya mencionados, fueron el cedro (*Cedrela odorata* L.) con fines maderables y que prefieren más como madera preciosa respecto a la caoba (*Swietenia macrophylla* G.King), que indican, tarda más tiempo en desarrollar; a pesar de ello, en la región Chontalpa las plantaciones de caoba poseían el mejor crecimiento, de ocho evaluadas en Tabasco (Pérez González *et al.*,

2012). Además, el cedro alcanza dimensiones diamétricas de cerca de 50 cm a una edad informada de 12-15 años, con lo que se evidencia su potencial productivo y viabilidad. Por su puesto que la producción maderable es en parte para autoconsumo (construcción, elaboración de cajas para la poscosecha del cacao y leña) y el excedente se usa para la venta, aunque a precios bajos (a 15 pesos mexicanos pie tablar⁻¹ para el caso de la madera aserrada de cedro).

En estos SAF se presentan más de 27 especies arbóreas, que varían según la etapa de desarrollo o edad de la plantación (Morán-Villa *et al.*, 2022). Pero se informaron diferencias sustanciales respecto a los árboles no frutales: por ejemplo, las especies características de vegetación secundaria de selva —como el palo mulato (*Bursera simaruba* (L.) Sarg.), el guásimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) y el guarumbo (*Cecropia obtusifolia* Bertol.)— a algunos productores no les agradan y evitan plantarlas (aunque, debido a su dispersión natural, más bien las controlan), ya que indican que presentan un carácter desecante. Además, se refirieron otras especies alimenticias, tales como el café (seguramente *Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner, el café robusta), el cuajilote (*Parmentiera aculeata* (Kunth) L.O.Williams) y el pan de sopa (*Artocarpus altilis* (Parkinson) Fosberg). Para el caso del café, se informó que en tiempos anteriores era utilizado como cerco vivo o límite entre parcelas, pero que dejó de utilizarse.

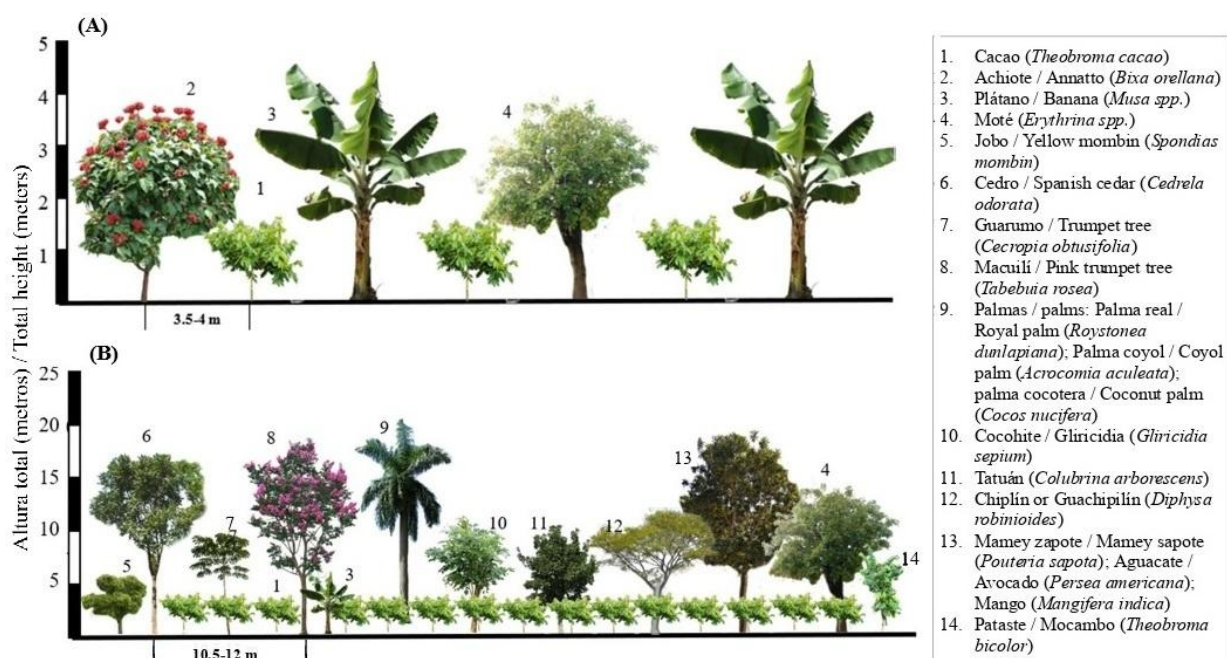


Figura 29. Perfiles del sistema agroforestal cacao en la Chontalpa, Tabasco. (A) Primera sombra o “chichihua”. (B) Sistema maduro típico (10-60 años). Las especies usadas como sombra pueden diferir entre sistemas específicos y se irán cambiando con el tiempo según el criterio de cada cacaocultor.

Fuente: Elaboración propia con base en el trabajo documental y de campo.

En el caso de la diversidad biológica, se visualizaron aves, reptiles (como iguanas verdes, *Iguana iguana*, y otras especies); y, en al menos dos casos, se reportó la presencia de monos (posiblemente, monos saraguatos, *Alouatta palliata*). De los cuales incluso se ha evidenciado su potencial ecoturístico en este tipo de SAF (Valenzuela-Córdova *et al.*, 2015). De hecho, históricamente diferentes especies de monos han estado ligados al cacao en la historia y la mitología mesoamericana, sobre todo como dispersores y en algunos casos, como plagas del cultivo (Nájera-Conrado, 2011).

Sin embargo, algunos productores reportaron que en el pasado se dio un cambio de uso de suelo de selva (nombrada localmente como “montaña”) por SAF de cacao, lo que representó externalidades negativas en su momento (debido a que ello implicó degradación o eliminación de la cubierta forestal original).

Patosistema. El control de malezas se da con machete, pero en un caso, con un productor de cacao convencional (C-3), se encontró el uso de glifosato; la maleza más importante es la lengua de vaca (*Dieffenbachia seguine* (Jacq.) Schott). Las plagas no se han informado como un problema, a excepción de la ardilla (posiblemente ardilla de vientre rojo, *Sciurus aureogaster* F.Cuvier), que afecta por igual a ambos tipos de productor y que incluso afecta al coco. Todos los productores informaron que la mancha negra del cacao no es un problema mayor: se conocen dosis, frecuencia y forma de aplicación del caldo bordelés u oxiclورو de cobre para su control, como lo refieren trabajos previos (Acebo-Guerrero *et al.*, 2012; Córdova Ávalos *et al.*, 2001). La moniliasis se informó como el principal agente fitopatogénico del cacao. En el sistema orgánico la pérdida por robo se percibió como el factor que más mermaba la producción de cacao. Para los casos de los productores que no se encuentran dentro de una organización de cacao orgánico, la moniliasis se reportó con mayores tasas de afectación (hasta el 80% respecto a 5-10% en sistema orgánico): ya sea porque no se

hace un manejo adecuado, o bien, porque los cacaotales contiguos y no manejados actúan como fuentes de inóculo y complican el control de la moniliasis. Más aún, la forma alargada de las parcelas sobre Rio Seco (y en general en la región), aumenta la zona de contacto entre parcelas (véase la Figura 25 y la Figura 26), lo que podría favorecer un mayor contagio. Lo anterior (uso indiscriminado de agroquímicos y control ineficiente de los patógenos), además de generar externalidades negativas (como contaminación), también genera descontento comunitario.

Por otro lado, el hecho de que se prefiera sembrar matas provenientes de “pie franco”, una práctica que también es difundida por el programa Sembrando Vida (SV), podría limitar la adopción de variedades mejoradas genéticamente (clones) con tolerancia a las enfermedades (moniliasis y mancha negra) y mejor calidad de grano. Dichas variedades tienen baja aceptación, en parte, debido a su costo elevado (\$45 en viveros locales) y poca difusión; así pues, en el vivero "Los Pinos" de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP), ubicado entre Cárdenas y Cunduacán, aún no se ofrecían los últimos clones que ha desarrollado el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Para superar esto, se recomiendan parcelas demostrativas a nivel local y subsidios para facilitar su adopción.

También, se informó que el pataxte (*Theobroma bicolor*) es más propenso y débil a la moniliasis que el mismo cacao; y que, debido a su mayor altura (10-12 m), puede complicar su manejo, pero que vale la pena continuar con la especie por la alta calidad del fruto y de sus productos derivados (como chocolate y bebidas).

6.5.4. Datos generales de los productores

Tal cual lo indica la literatura, la producción de cacao se encontró en manos de productores de edad avanzada (de 47 a 78 años); con diversidad de edades en sus plantaciones, pero tendientes al envejecimiento (de 15 a 70 años, aunque con renovación con semilla del mismo cacaotal). Los ocho productores poseen amplia experiencia en el cultivo de cacao, pues llevan toda su vida sembrándolo: todos ellos heredaron la actividad y la parcela de sus padres.

Los sistemas orgánicos demuestran mayor efectividad en el manejo agronómico, alineándose con estrategias de adaptación como la reducción de insumos (agroquímicos y dinero) y la promoción de sinergias ecológicas, aspectos que sí están tomando en cuenta SV y Producción para el Bienestar (PpB). Entre los productores convencionales, persiste el paradigma de que lo orgánico o agroecológico no puede igualar la productividad convencional; y fue con ellos donde se notó el desinterés, desánimo y manejo nulo o inadecuado del SAF cacao. Además, los productores convencionales extendían muy poco la cadena de valor: venden su cacao en baba o en fresco (grano con mucílago) a los intermediarios locales, quienes hacen el proceso de poscosecha restante o ra reventa del producto. Por su parte, los productores de cacao orgánico, aunque también algunos presentaban edad avanzada y todos poseían parcelas pequeñas (0.5 ha de superficie con cacao), constituyen el caso contrario e ideal: buena organización, vinculación con mercados diferenciados e instituciones académicas, asesoramiento, promoción del renuevo generacional y manejo adecuado. Incluso se dijo que algunas personas en Huimango, Cunduacán, tras probar sin éxito otros cultivos, han vuelto a sembrar cacao (dando prioridad a las variedades de ascendencia criolla debido a su mejor precio en el mercado, si bien presentan menor rendimiento que las otras variedades). Los productores de cacao orgánico extendían más el proceso de postcosecha (Figura 30), aunque a pequeña escala: se hacía el lavado, fermentado, secado y tostado del grano; de igual modo, se elaboraban chocolates para consumo local y el productor C-8 elaboraba algunos productos que combinan miel con cacao. A la vez que este tipo de organizaciones de producción orgánica sirven como escuelas campesinas de otros productores de cacao (Córdova-Avalos *et al.*, 2016). Y de forma general, son varias las actividades que se realizan, la multifuncionalidad de la tierra y los múltiples bienes que se obtienen en el marco de estas organizaciones. Por ende, la política pública debería enfocarse en fortalecer y replicar este tipo de asociaciones.



Figura 30. Proceso de poscosecha del cacao en la Chontalpa, Tabasco. (A) Grano tostado. (B) Caja de fermentación de madera de cedro, aunque también puede ser de madera de macuilís (*Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC.). (C) “Pozol”, bebida típica del sureste mexicano que consiste en una mezcla de maíz y cacao tostado y molido. Fuente: créditos AFSH.

Innovaciones agrícolas

La mayor cantidad de innovaciones fue reportada por los productores de cacao orgánico (Apéndice 7, 44 innovaciones de 48 en promedio), quienes alcanzaron los mayores rendimientos: 600 a 750 kg ha⁻¹ de grano seco, frente a los 220 kg ha⁻¹ estimados para productores convencionales (equivalente a 550 kg de cacao en baba), quienes aplicaron menos del 40% del total de innovaciones. Esto representa un contraste de 172 a 241%, pero se ha reportado que puede llegar hasta 491% en sistemas con manejo integrado (Ortíz-García *et al.*, 2015; Torres de la Cruz *et al.*, 2011). Asimismo, la incidencia de moniliasis se reportó en 5–10% en sistemas orgánicos, comparado con 30–80% en convencionales, lo que implica un contraste de 67 a 93.7%. Los precios de venta también fueron superiores en sistemas orgánicos. Tales comportamientos, de rendimiento y precio superiores en sistemas orgánicos, han sido informados previamente en varios estudios. Otro caso documentado se dio en Cunduacán con la variedad Carmelo (de tipo neocriolla, normalmente con menores rendimientos), donde el rendimiento de grano seco alcanzó alrededor de 1 t ha⁻¹ en sistemas reconvertidos a orgánicos al octavo año de transición, con proyecciones de incrementos mayores (Córdova-Avalos *et al.*, 2016).

Esas innovaciones incluyen a las actividades referentes al manejo integrado del cultivo y de sus plagas y enfermedades, los cuales pueden ayudar a ser más resiliente, productivo y sustentable al sistema.

Aunque se promueve la inclusión social de jóvenes y mujeres en la actividad cacaotera, ninguna de las unidades productivas estuvo encabezada por mujeres. Esta ausencia no debe interpretarse como falta de participación, ya que existen casos documentados de liderazgo femenino exitoso en el sector (Martínez-Salvador y Martínez-Salvador, 2020). En consecuencia, la contribución de las mujeres en el proceso productivo del cacao —tanto en labores agrícolas como en la gestión organizativa y comercial— debería ser considerada en estudios posteriores, especialmente en aquellos que busquen visibilizar dinámicas de género y fortalecer su representatividad en el diseño de políticas públicas, aunado a que ello puede facilitar la transición hacia modelos de producción más sostenibles.

6.5.5. Políticas públicas

Históricamente, los programas gubernamentales han desempeñado un papel crucial en la sostenibilidad de estos sistemas. Iniciativas como Procampo-Procampo Productivo (1994-2019) y el programa Trópico Húmedo (2002-2013), que incluyó el subcomponente Empresas de la Innovación (2009-2012) con cultivos como el cacao, fortalecieron la productividad rural mediante apoyos directos, transferencia tecnológica y, en el último caso, la reconversión agroecológica. Actualmente, SV, PpB y Pensión para el Bienestar hacen lo propio: pues aportaron más del 50% de los ingresos en varios casos (Figura 31). No obstante, el alcance de SV se ve limitado por la falta de claridad en sus objetivos, diferencias políticas locales, la indiferencia de algunos beneficiarios y la ausencia de posesión legal de terrenos acordes a esa política, lo que restringe su efectividad en toda la población objetivo (Martínez Espinoza, 2023).

Además, el programa SV enfrentó desafíos iniciales para integrar SAF ya establecidos, como los de cacao, debido a su requisito original de contar con 2.5 ha despejadas por productor, lo que debió fomentar prácticas de deforestación y exclusión de productores con SAF ya establecidos, como sucedió en otras partes del país. Posteriormente se

flexibilizó el requisito de superficie: se permitió la asociación entre dos o más productores para reunir las 2.5 ha. Por su parte, PpB no exige un mínimo de terreno. Ambos programas son mutuamente excluyentes entre secciones de parcelas, pero no entre productores, permitiendo a algunos combinarlos si cumplían con los requisitos. SV incluye apoyos económicos mensuales (5,000 pesos al mes en 2022), entrega de insumos, acompañamiento técnico y establecimiento de viveros comunitarios, con énfasis en agroforestería y autosuficiencia alimentaria; mientras que PpB consiste en un pago anual directo (en 2022 fue de 6,200 pesos), además de asesoría técnica y entrega de insumos en especie, como fertilizantes o bioinsumos, según el cultivo y la región. Durante el trabajo de campo, se identificó que algunos productores no recibieron ningún apoyo, mientras otros accedieron a uno o ambos, reflejando una cobertura desigual. Otros apoyos gubernamentales incluyeron iniciativas como un apoyo único de \$2,500 y la entrega de bombas aspersoras a nivel municipal en Cárdenas, así como subsidios estatales al precio del cacao a través del programa Impulso a la Producción de Cacao en el Estado de Tabasco. Estos programas han demostrado utilidad al ofrecer asesoramiento técnico e incentivos a la producción, con lo que han contribuido a la mejora de los procesos productivos y más recientemente, en incrementar el valor agregado del grano.

Sin embargo, el monto aportado por PpB es comparativamente menor que SV, lo que limita su impacto económico general y genera diferencias entre productores que solo accedieron a PpB. Además, ambos programas poseen insuficiente cobertura, especialmente en asesoría técnica (agroecológica). El impacto de estos programas podría ampliarse mediante una difusión e implementación más extensivas, especialmente si se orientan hacia nuevos productores y se flexibilizan las especies permitidas, especialmente las maderables. Asimismo, su efectividad aumentaría si se articulan con programas que atiendan necesidades locales específicas y se fomenta el desarrollo de cadenas de valor largas, con énfasis en la comercialización directa.

Si bien ya existen iniciativas como el Chocolate del Bienestar —distribuido en las Tiendas del Bienestar—, resulta necesario fortalecer y diversificar estas y otras alternativas. Aunque existe el intento por reactivar la agroindustria cacaotera a nivel

nacional, se han tenido alcances limitados hasta el momento: en 2019 se anunció la reactivación de INCATABSA; no obstante, la situación actual sigue marcada por desafíos estructurales (Somos Más Tabasco, 2023).

6.5.6. Rentabilidad de los sistemas productivos

En la Figura 31 se presenta el ingreso total de seis productores seleccionados, elegidos por representar casos contrastantes y por haber proporcionado información más clara y completa; solo se excluyeron al productor convencional C-2 con 9 ha de cacao y 12 ha en total, así como al productor de cacao orgánico C-7 con 0.5 ha de cacao. El desglose se realiza según las distintas fuentes de ingreso identificadas de cada unidad productiva, lo que permite visualizar la heterogeneidad en las estrategias económicas y su relación con las demás variables analizadas. De forma complementaria, en el Apéndice 6 se detallan los cálculos de este proceso.

La rentabilidad varió entre subsistemas: como se dijo antes, el ingreso por cacao dependió de la modalidad productiva y las innovaciones productivas; el maíz fue el menos rentable, pero se mantiene para evitar comisiones de intermediarios (que incluso duplican sus costos de producción). Un sistema productivo complementario con el productor C-8 fue la miel.

El productor C-1 destacó con los mayores ingresos familiares, complementados con fuentes externas (pensión, reciclaje, venta de agua), lo que posteriormente se refleja en su mayor capacidad adaptativa (véase la sección siguiente).

Como se señaló en la sección anterior, la ausencia de procesos de poscosecha limita la extensión de la cadena de valor y repercute directamente en la rentabilidad del sistema. Esta condición, persistente tanto entre los productores convencionales como en el ámbito agroindustrial regional, ha obstaculizado la consolidación de esquemas más rentables y justos. Lo que ha perpetuado un modelo de baja rentabilidad familiar y concentración de beneficios en los intermediarios (Escobedo-Avila *et al.*, 1997; Trinidad *et al.*, 2016). Pese a estas limitaciones, los SAF persisten gracias a sinergias entre sistemas productivos, el autoconsumo (subvalorado en evaluaciones

económicas, según Somarriba *et al.*, 2021) y recursos de programas sociales agrícolas y no agrícolas.

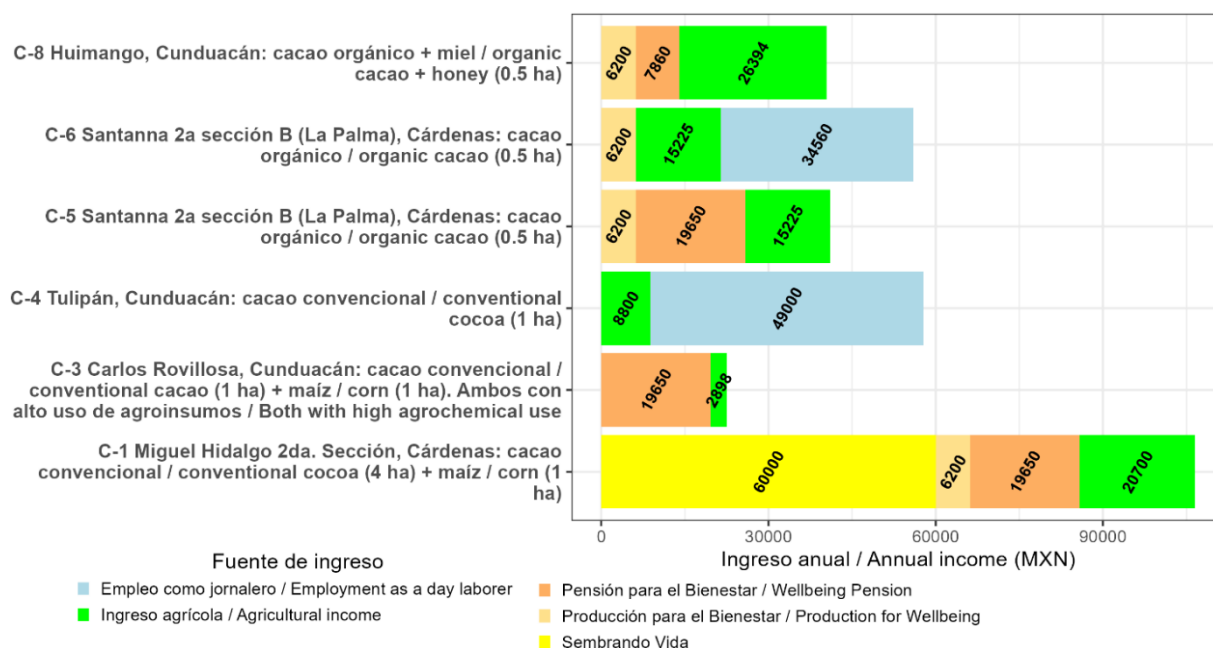


Figura 31. Ingreso anual de los productores de cacao con diferentes sistemas productivos en la Chontalpa, Tabasco.

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de campo y los cálculos económicos.

Los medios de vida campesinos incluyeron apoyos gubernamentales por vejez, subsidios agrícolas (SV o PpB), autoconsumo de productos del cacaotal-huerto familiar, trabajo asalariado (e.g., corte de caña a \$60/tonelada para los productores más jóvenes y empleo en un autolavado), alquiler de tierras a ingenios azucareros, y actividades complementarias como reciclaje, venta de agua de pozo, apicultura a pequeña escala o avicultura para autoconsumo. Su sostenibilidad es incierta, con trabajos periódicos y poco redituables, y apoyos potencialmente transitorios.

En el siguiente apartado se analiza cómo estos factores inciden en la capacidad adaptativa de las unidades productivas.

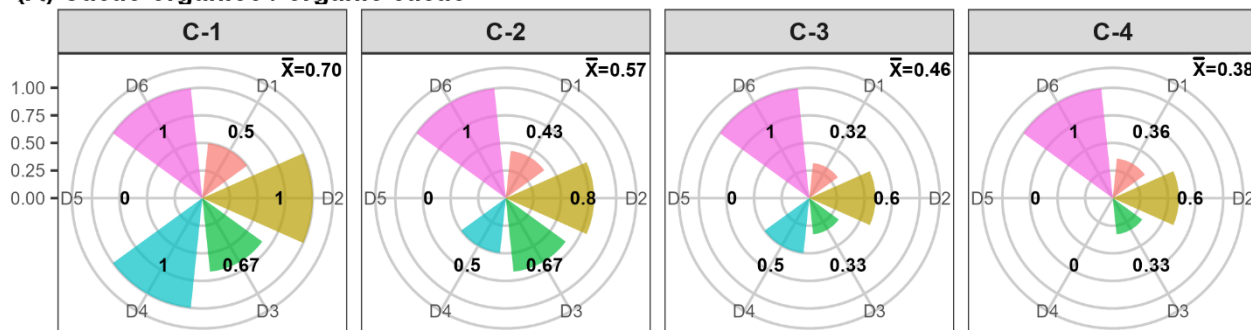
6.5.7. Capacidad de adaptación al cambio climático

La capacidad de adaptación muestra matices contrastantes según el tipo de productor (Figura 32). Los máximos niveles se obtuvieron para los productores de cacao orgánico (con más innovaciones y organización, en general) y el productor C-1 (con

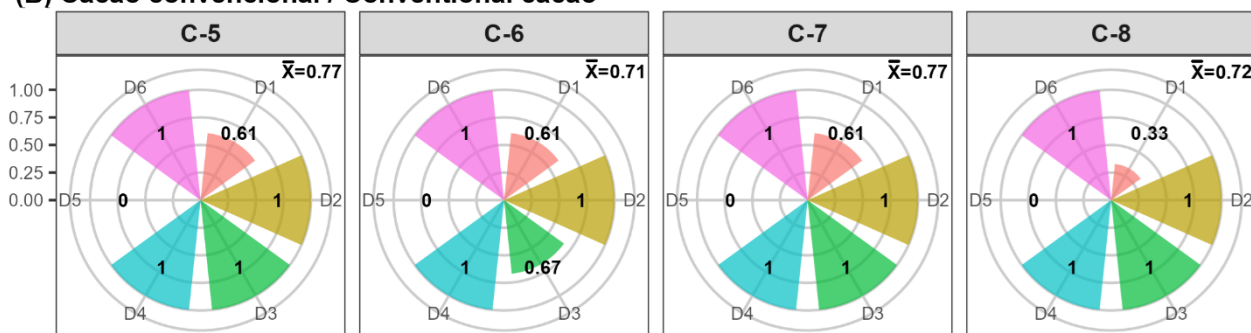
más fuentes de ingresos, recursos humanos e infraestructura). Un diferenciador clave fue el acceso a parcelas de gran tamaño (>2.5 ha), lo cual permitió al productor C-1 —excañero y actualmente cacaotero— incorporarse desde un principio al programa SV. Además, el ingreso complementario que el productor C-1 recibe a través del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) se debe a su historial como proveedor de caña al ingenio azucarero, conforme a la normativa IMSS–empresa cañera. Esta trayectoria productiva prolongada le permitió acceder a una pensión por jubilación —seguro de retiro—, lo que representa una fuente estable de ingresos que fortalece su resiliencia económica.

La existencia de tal seguro del IMSS ayuda a explicar, en parte, la conversión de cacaotales hacia cultivos como la caña de azúcar, impulsada no solo por la mayor rentabilidad percibida, sino también por el respaldo histórico de programas sociales —como Trópico Húmedo y diversas iniciativas de financiamiento gubernamental— orientados al fortalecimiento de este sector. Además, dicho sector cuenta con una estructura organizativa e institucional más consolidada, lo que facilita el acceso a apoyos y mercados; una dinámica organizacional muy parecida a la ganadería.

(A) Cacao orgánico / organic cacao



(B) Cacao convencional / Conventional cacao



Dimensión / Dimension

■ D1. Recursos económicos / Economic resources

■ D2. Recursos humanos / Human resources

■ D3. Infraestructura para la producción y comercialización / Infrastructure for production and marketing

■ D4. Capital social / Social capital

■ D5. Institucionalidad / Institutional framework

■ D6. Recursos naturales / Natural resources

Figura 32. Gráficos de radar de la capacidad de adaptación al cambio climático de los productores de cacao entrevistados de la Chontalpa, Tabasco.

Fuente: Elaboración propia con base en el trabajo documental y de campo.

La dimensión de recursos naturales resultó alta para todos los productores (se asignó un valor igual a uno en todos los casos), al contar con una cobertura forestal sobre toda la parcela (como consecuencia de la naturaleza del sistema). Por tanto, en estudios posteriores o análogos (de otros cultivos) se sugiere considerar a la captura de carbono o la biodiversidad del sistema como un indicador más sensible. En tanto que, la parte institucional fue la dimensión más baja en todos los casos; es posible que esto suceda al considerar solo a un indicador (percepción del productor sobre la capacidad de las instituciones municipales para hacer frente al cambio climático), y que este a su vez se vea influenciado por diferentes inclinaciones ideológicas o apreciaciones del productor. Sin embargo, la naturaleza de la modalidad de la producción (como convencional u agroecológica; monocultivo o policultivo) ni el tamaño de la parcela son reflejados en la apreciación, los cuales resultan

imprescindibles para adaptarse al cambio climático, por lo que deberán ser agregados, o bien, deberán considerarse de forma complementaria en análisis similares.

En el contexto del cambio climático, esta baja capacidad adaptativa generalizada —evidenciada por la resistencia a innovaciones agrícolas, dependencia de subsidios y presiones para cambio de uso de suelo— sugiere la urgencia de políticas que potencien aún más la agroecología, la adopción de variedades mejoradas (pero conservando variedades locales) y la extensión de cadenas de valor para fortalecer la resiliencia de estas unidades productivas.

Estrategias de adaptación: Las estrategias de adaptación observadas incluyeron la diversificación de ingresos, de especies arbóreas y cultivos (incluso al nivel varietal en cacao), la siembra en camellones para plátano, el mantenimiento de drenes, la conservación de la humedad mediante mulch, la conservación y fomento de sombra. También se realizaban aplicaciones ocasionales de fertilizantes foliares para mitigar el estrés térmico. No obstante, el riego en cacao se evita debido a la contaminación del agua del río, agravada por actividades de agricultura industrial adyacente, como los monocultivos de caña de azúcar. En este mismo sentido, los productores han optado por seleccionar especies arbóreas que, según su percepción, no presentan un carácter desecante, lo que contribuiría a mantener la humedad edáfica y a reducir el impacto del calor. A nivel comparativo, alternativas como seguros agrícolas y variedades mejoradas de cacao con resistencia a sequías —propuestas en otros contextos regionales (Hutchins *et al.*, 2015)— requieren programas de mejoramiento multiobjetivo, aunque su implementación en el corto plazo enfrentaría barreras en la región (dado que ni siquiera se han difundido de forma amplia aquellos clones con tolerancia a las enfermedades desarrollados por INIFAP). Otras estrategias ampliamente documentadas en la literatura (Hutchins *et al.*, 2015) incluyen el fortalecimiento de capacidades locales (comercio justo, mejora organizacional y formación técnica), el mantenimiento de sombra nativa y la conectividad paisajística, el manejo integrado de recursos hídricos (incluyendo la mejora de la infiltración y el almacenamiento de agua), y la diversificación productiva en el sentido amplio. De

hecho, el uso racional e integral de las innovaciones agrícolas (Apéndice 7) puede mejorar sustancialmente la capacidad adaptativa del sistema.

6.5.8. Limitantes estructurales

La edad avanzada de los productores y la dependencia de programas como la Pensión para el Bienestar refuerzan la vulnerabilidad estructural del sistema productivo, evidenciando la necesidad de replantearlo. Si bien, existe inclusión familiar en temporadas de alta demanda laboral (época de lluvias), una limitante adicional es la escasez de mano de obra agrícola, lo que se ve agravado por lo anterior: si bien los productores de la tercera edad poseen un conocimiento profundo del cultivo — resultado de décadas de experiencia—, la continuidad de estos SAF se beneficiaría de la incorporación activa de nuevas generaciones. Pues para que esta actividad sea rentable se requiere de un manejo agroforestal integrado (Ortíz-García *et al.*, 2015), el cual demanda un esfuerzo físico considerable, pues incluye prácticas manuales como la fertilización, la renovación-rehabilitación constante del SAF, la eliminación de frutos enfermos (para reducir el inóculo de los fitopatógenos), la poda del cacao y de los árboles de sombra, con el fin de modificar el microclima y hacerlo menos favorable para el desarrollo de las enfermedades. Además, estas actividades resultan esenciales para mitigar impactos climáticos como el aumento de temperaturas y precipitaciones erráticas (ante microclimas cálidos y húmedos de SAF no manejados), que favorecen plagas y enfermedades, pero su implementación se ve limitada por el enunciado problema de falta de mano de obra. Ese manejo integrado debería ser soportado por políticas públicas diferenciadas y específicas al cultivo.

Al respecto de lo anterior, sí se presentaron dos productores jóvenes (<50 años, C-4 y C-6), pero esta actividad más bien cumple un rol complementario a su trabajo asalariado fuera de la unidad productiva. Además, se informó que los hijos de los cacaoteros son los que normalmente cambian de cultivo o bien, estos buscan otras opciones de ingreso, ya sea como jornaleros agrícolas o en otro sector productivo (de hecho, los sectores petrolero y terciario son fuente de empleo muy común entre este grupo poblacional).

Así pues, resulta evidente la necesidad de programas que promuevan —o amplíen de manera estructurada— los trabajos de manejo agroecológico y la adopción de nuevas técnicas y tecnologías derivadas de la investigación científica nacional. En particular, se requiere mayor impulso a la validación y difusión de variedades desarrolladas en territorio nacional, así como a prácticas que permitan elevar tanto la calidad como la cantidad del grano mexicano, en condiciones competitivas y agroecológicas. El pago por servicios ambientales para los SAF cacao, ya sea con programas federales o dentro de mercados de carbono voluntarios, sería otra forma de fortalecer económicamente a este sistema y asegurar su permanencia (Mata Zayas *et al.*, 2022; Palma-López *et al.*, 2011). Otra alternativa consiste en apostar por la inserción en el mercado del cacao fino de aroma, una categoría especializada y de alta calidad que representa poco porcentaje del comercio mundial, pero que se comercializa a precios diferenciados y con mayor valor agregado; este tipo de cacao, caracterizado por su perfil sensorial complejo y atributos genéticos específicos, ofrece una vía para diferenciarse del cacao convencional, tanto en términos de calidad como en trazabilidad ambiental (Zequeira Larios y Beauregard Solís, 2024).

6.6. Conclusiones

El cultivo de cacao en la Chontalpa, que se enmarca en SAF de policultivo tradicional y que, por tanto, cumple múltiples funciones socioeconómicas y ambientales, enfrenta vulnerabilidades multidimensionales. Mediante el diagnóstico agrario se identificaron diferencias notables entre unidades productivas convencionales y orgánicas, con un mejor control de enfermedades y rendimientos superiores en los sistemas orgánicos, lo que resalta su potencial para una mayor resiliencia general y climática en particular. Sin embargo, la baja rentabilidad general, particularmente en los sistemas convencionales, y la limitada capacidad de adaptación al cambio climático subrayan la necesidad de fortalecer políticas públicas dirigidas a este cultivo multifuncional.

El diagnóstico reveló una capacidad de adaptación al cambio climático marcadamente superior en los sistemas orgánicos comparados con los convencionales, lo que ratifica las diferencias en manejo agronómico y rentabilidad, así como sus implicaciones en la resiliencia ecológica. Además, se identificaron como factores discriminantes el nivel de

ingreso y la diversificación de fuentes económicas: dentro del grupo convencional, aquellos productores con ingresos suficientes y múltiples fuentes de ingreso mostraron una capacidad de adaptación superior debido a que la estabilidad financiera también incide en la resiliencia climática. Estas disparidades se extienden a fuentes de ingresos (buena parte de tipo gubernamental), acceso a terrenos de cultivo, seguros agrícolas escasos, eventos climáticos como inundaciones recurrentes (por ejemplo, en casos como C-3; e incluso sequías históricas), organización comunitaria deficiente, si bien las asociaciones de cacao orgánico son la excepción.

Los productores convencionales resultaron más vulnerables a las subidas de precios de agroquímicos durante las crisis anteriores (COVID-19 y Guerra Rusia-Ucrania), lo que refuerza la necesidad de transitar hacia SAF más agroecológicos, resilientes y rentables. Para potenciar esta transición y fortalecer la capacidad adaptativa, es imperativo diseñar políticas públicas contextualizadas que aseguren la incidencia efectiva de programas gubernamentales en pequeños y medianos productores; con lo cual se promuevan innovaciones, subsidios para variedades mejoradas, diálogo de saberes (que antes era llamado extensionismo agrícola o transferencia tecnológica), el pago por servicios ambientales, la extensión de cadenas de valor y el acceso a mercados diferenciados. Para lo cual sería imprescindible recuperar las experiencias de las asociaciones de cacao orgánico.

Aunque estos sistemas pueden ser sensibles a perturbaciones extremas, su diseño multiestrato y su capacidad para integrar árboles, cultivos y demás biodiversidad les permite amortiguar parte de los efectos de la variabilidad climática. Al favorecer el secuestro de carbono, conservar la biodiversidad y estabilizar los microclimas locales, los SAF contribuyen activamente a la mitigación y adaptación al cambio climático. Además, las estrategias de adaptación al cambio climático que se documentaron pueden servir como punto de partida para la adaptación de estos sistemas al cambio climático.

6.7. Literatura citada

- Acebo-Guerrero, Y., Hernández-Rodríguez, A., Heydrich-Pérez, M., El Jaziri, M., and Hernandez-Lauzardo, A. N. (2012). Management of black pod rot in cacao (*Theobroma cacao* L.): A review. *Fruits*, 67(1), 41–48. <https://doi.org/10.1051/fruits/2011065>
- Carrasco Linares, L. R. (1989). El cacaotal: importante sistema agroforestal del sureste mexicano (problemáticas y perspectivas). En UANL (Ed.), *Simposio agroforestal en México: sistemas y métodos de uso múltiple del suelo* (Memorias T). Universidad Autónoma de Nuevo León. http://cdigital.dgb.uanl.mx/la/1020082492/1020082492_MA.PDF
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A. T. y Díaz-Echeverría, V. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269–284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- Castelán-Estrada, M., y Chávez-García, E. (2019). Evaluación campesina del manejo agroecológico de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 12(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1438>
- Centre National d'Études Spatiales, C. (2025). *SWH Data Site*. <https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60>
- Chávez-García, E., Stephan, R., y Galmiche-Tejeda, Á. (2012). Lógica de manejo del huerto familiar en el contexto del impacto modernizador en Tabasco, México. *Cuadernos de desarrollo rural*, 9(68), 177–200.
- Cibrián-Tovar, D., Alvarado Rosales, D., y García Díaz, S. E. (2007). *Enfermedades forestales en México*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://books.google.com.mx/books?id=5VEmAQAAMAAJ>
- Cochet, H., y Devienne, S. (2013). *AGRICULTURA FAMILIAR: Metodología para su estudio* (C. Márquez Rosano, Trad.).
- Córdova Ávalos, V., Sánchez Hernández, M., Estrella Chulím, N. G., Macías Layalle, A., Sandoval Castro, E., Martínez Saldaña, T., y Ortiz García, C. F. (2001). Factores que afectan la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el ejido Francisco I Madero del Plan Chontalpa Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 34(17), 93–100.
- Córdova-Avalos, V., Guerrero-Peña, A., Bucio-Galindo, A., Córdova-Avalos, A., Hinojosa-Cuéllar, J. A., Izquierdo-Reyes, F., y Hernández-Echeverría, C. (2016). ESCUELA DE PRODUCCIÓN ORGÁNICA DE CACAO CRIOLLO (*Theobroma cacao* L. var. Carmelo), EN TABASCO, MÉXICO. *Agro productividad*, 9(12), 63–67.
- Díaz-José, Ó., Porras-Umaña, V. H., y Aguilar Ávila, J. (2013). *El cacao* (*Theobroma cacao*): avances y retos en la gestión de la innovación: Vol. Col. Trópi (1a ed.). Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma

- Escobedo-Avila, M. A., García-Mata, R., Portillo-Vázquez, M., y González-Romero, V. (1997). Costos de producción de cacao en Comalcalco, Tabasco. *Agrociencia*, 31(1), 91–99.
- Espinosa Sánchez, M. A., Hurtado Escoto, B. E., Estrada Ledesma, N. R., Espinoza Magaña, I. P., and Contreras Contreras, A. E. (2020). El agroecosistema cacaotero y los medios de vida campesinos en Comalcalco. *Ixaya. Revista Universitaria de Desarrollo Social*, 10(18), 37–68. <http://revistaixaya.cucsh.udg.mx/index.php/ixa/article/view/7613>
- Hutchins, A., Tamargo, A., Bailey, C., and Kim, Y. (2015). Assessment of climate change impacts on cocoa production and approaches to adaptation and mitigation: a contextual view of Ghana and Costa Rica. [https://elliott.gwu.edu/sites/g/files/zaxdzs2141/f/World Cocoa Foundation.pdf](https://elliott.gwu.edu/sites/g/files/zaxdzs2141/f/World+Cocoa+Foundation.pdf)
- ICCO. (2012). *The world cocoa economy: past and present*. <https://www.icco.org/wp-content/uploads/2019/07/EX-146-7-World-Cocoa-Economy-2012-edited-1.pdf> (Consultado el 8 de octubre de 2025)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017a). *Red Nacional de Caminos (RNC)* 2017. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463171836>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017b). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (continuo nacional)*. Autor. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=88946359845>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2001). *Síntesis de información geográfica del estado de Tabasco* (Primera edición). INEGI. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223939/702825223939_1.pdf
- Maldonado-Méndez, M. de L., Romo-Lozano, J. L., y Monterroso-Rivas, A. I. (2022). Determinant Indicators for Assessing the Adaptive Capacity of Agricultural Producers to Climate Change. *Atmosphere*, 13(7), 1114. <https://doi.org/10.3390/atmos13071114>
- Martínez Espinoza, M. I. (2023). Política social y pobreza en la 4T. *Revista Mexicana de Sociología*, 85(núm. especial), 41–69.
- Martínez-Salvador, L. E., y Martínez-Salvador, C. (2020). Innovación social en organizaciones cacaoteras en Tabasco, México. Aproximaciones desde la gobernanza y la participación femenina en la agricultura. *Estud. soc. Rev. aliment. contemp. desarro. reg*, 30(55), e20939. <https://doi.org/https://doi.org/10.24836/es.v30i55.939>
- Mata Zayas, E. E., Moguel Ordoñez, E. J., Jiménez Pérez, N. del C., Gama Campillo, L. M., Valenzuela Córdova, B., Cadenas Madrigal, C., y Anacleto Rosas, A. D. (2022). *Servicios Ecosistémicos de los Agroecosistemas de Cacao y Oportunidades Vinculadas con los Mercados de Carbono: El Modelo de la Hacienda La Luz, Comalcalco, Tabasco*.

- https://tabasco.gob.mx/sites/default/files/users/sbstabasco/Informe_final_Hacienda_La_Luz_Feb2022.pdf
- Méndez Sánchez, J. A., López Hernández, E. S., y López Martínez, S. (2019). Deficiencia Productiva Del Sistema Cacao, A Causa De PEMEX: Percepción o Realidad. *Journal of Basic Sciences*, 5(15), 124–133. <http://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Márquez-Berber, S. R., y Valdés-Velarde, E. (2022). Composición florística y arreglo de sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(67). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3840>
- Nájera-Conrado, M. I. (2011). El mono y el cacao: la búsqueda de un mito a través de los relieves del grupo de la serie inicial de Chichén Itzá. *Estudios de cultura maya*, 39, 135–172.
- OEIDRUS. (2023). *Sistema de Información Geográfica: padrones georreferenciados*. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable-Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca (SEDAFOP) de Tabasco. https://campotabasco.gob.mx/?page_id=1810 (Consultado el 15 de octubre de 2023).
- Oporto-Peregrino, S., Hidalgo-Mihart, M. G., Collado-Torres, R. A., Castro-Luna, A. A., Gama-Campillo, L. M., and Arriaga-Weiss, S. L. (2020). Effects of land tenure and urbanization on the change of land use of cacao (*Theobroma cacao*) agroforestry systems in southeast Mexico. *Agroforestry Systems*, 94(3), 881–891. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00453-w>
- Ortíz-García, C. F., Torres-de-la-Cruz, M. y Hernández-Mateo, S. (2015). Comparación de dos sistemas de manejo del cultivo de cacao en presencia de *Moniliophthora roreri* en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 191–196. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.2.191>
- Palma-López, D. J., Vázquez Navarrete, C. J., Mata Zayas, E. E., López Castañeda, A., Morales Garduza, M. A., Chablé Pascual, R., Contreras Hernández, J., y Palma-Cancino, D. Y. (2011). *Zonificación de Ecosistemas y Agroecosistemas Susceptibles de Recibir Pagos por Servicios Ambientales en la Chontalpa, Tabasco*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32032.85760>
- Pérez González, G., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., y Etchevers Barra, J. D. (2012). Caracterización dasométrica e índice de sitio en plantaciones de caoba en Tabasco, México. *Madera y bosques*, 18(1), 7–24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000100002&lang=es
- Pérez Sosa, E., y Granados Ramírez, G. R. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, 3, 39–67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C. F., López, A. P., Hernández, J., and Aime, M. C. (2006). First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot (moniliasis

- disease) of cocoa in Mexico. *Plant Pathology*, 55(4), 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01418.x>
- Priego-Castillo, G. A., Galmiche-Tejeda, A., Castelán-Estrada, M., Ruiz-Rosado, O., y Ortiz-Ceballos, A. I. (2009). Evaluación de la sustentabilidad de dos sistemas de producción de cacao: estudios de caso en unidades de producción rural en Comalcalco, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 25(1), 39–57. <https://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v25n1/v25n1a3.pdf>
- Ramírez Martínez, M. Á. (2021). Migración y desterritorialización: el caso de los productores de cacao de la Chontalpa tabasqueña. En A. V. Parra González (Ed.), *Políticas públicas en defensa de la inclusión, la diversidad y el género III: migraciones y derechos humanos* (1a ed., pp. 607–615). Ediciones Universidad de Salamanca. <https://doi.org/https://doi.org/10.14201/0AQ0298>
- Ramírez-Meneses, A., García-López, E., Obrador-Olán, J. J., Ruiz-Rosado, O., y Camacho-Chiu, W. (2013). Diversidad florística en plantaciones agroforestales de cacao en Cárdenas, Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, 29(3), 215–230. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15429688001>
- Rice, R. A., and Greenberg, R. (2000). Cacao cultivation and the conservation of biological diversity. *Ambio*, 29(3), 167–173. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.3.167>
- Salvador-Morales, P., Cámara-Cabral, L. del C., Martínez-Sánchez, J. L., Sánchez-Hernández, R., y Valdés-Velarde, E. (2019). Diversidad, estructura y carbono de la vegetación arbórea en sistemas agroforestales de cacao. *Madera y Bosques*, 25(1). <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511638>
- Salvador-Morales, P., Martínez-Sánchez, J. L., Cámara Cabral, L., y Zequeira Ramos, C. (2020). Estructura y carbono específico en una cronosecuencia de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao* L. en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632131>
- Sántiz Tovilla, R., Nadal, A., Salvatierra Izaba, B., Nazar Beutelspacher, D. A., y Bello Baltazar, E. (2023). Análisis de los factores que limitan a los pequeños productores en el desarrollo de la actividad cacaotera en México. *Agroalimentaria*, 29(56), 39–63. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.338855>
- Santos-Hernández, A. F., Monterroso-Rivas, A. I., Granados-Sánchez, D., Villanueva-Morales, A., and Santacruz-Carrillo, M. (2021). Projections for Mexico's tropical rainforests considering ecological niche and climate change. *Forests*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/f12020119>
- Somarriba, E., Peguero, F., Cerda, R., Orozco-Aguilar, L., López-Sampson, A., Leandro-Muñoz, M. E., Jagoret, P., and Sinclair, F. L. (2021). Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 64. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9>
- Somos Más Tabasco. (2023). *INCATABSA: Una historia de décadas de esfuerzos por mantener viva la tradición chocolatera*. <https://somosmas.news/incatabsa-una-historia-de-decadas-de-esfuerzos-por-mantener-viva-la-tradicion-chocolatera-de-tabasco/> (Consultado el 6 de octubre de 2025)

- Torres de la Cruz, M., Ortiz García, C. F., Téliz Ortiz, D., Mora Aguilera, A., and Nava Díaz, C. (2011). Temporal progress and integrated management frosty por rot (*Moniliophthora roreri*) of cocoa in Tabasco, México. *Journal of Plant Pathology*, 93(1), 31–36. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4454/jpp.v93i1.270>
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., y Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 2(1), 53–71. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5680>
- Uribe Gómez, M., Cruz León, A., Romo Lozano, J. L., Lara Bueno, A., Valdivia Alcalá, R., Portillo Vázquez, M., y Juárez Ramón, D. (2015). Importancia del diagnóstico rural para el desarrollo de un modelo agroforestal en las comunidades campesinas de la sierra de Huautla. *Ra Ximhai*, 11(5), 197–208. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46142593011>
- Valenzuela-Córdova, B., Mata-Zayas, E. E., Pacheco-Figueroa, C. J., Chávez-Gordillo, E. J., Díaz-López, H. M., Gama, L., y Valdez-Leal, J. D. (2015). POTENCIAL ECOTURÍSTICO DEL AGROSISTEMA CACAO (*Theobroma cacao* L.) CON MONOS SARAGUATOS (*Alouatta palliata* Gray) EN LA CHONTALPA, TABASCO. *Agro productividad*, 8(5), 3–10.
- Vázquez-Yañes, C., Batis-Muñoz, A. I., Alcocersilva, M. I., Gual-Díaz, M., y Sánchez-Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Instituto de Ecología (UNAM), Ed.; México). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11004.54407>
- Zequeira Larios, C., y Beauregard Solís, G. (Coords.). (2024). *El cacao tabasqueño: de los olmecas a nuestro tiempo*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://pcientificas.ujat.mx/index.php/pcientificas/catalog/view/272/245/2866>
- Zequeira-Larios, C., Santiago-Alarcon, D., MacGregor-Fors, I., and Castillo-Acosta, O. (2021). Tree diversity and composition in Mexican traditional smallholder cocoa agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 95(8), 1589–1602. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00673-z>

CAPÍTULO 7. DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DEL CACAO Y DOS DE SUS ENFERMEDADES PRINCIPALES EN UNA AMÉRICA TROPICAL MÁS CÁLIDA CON ÉNFASIS EN MÉXICO¹⁹

7.1. Resumen

Antecedentes. *Phytophthora* spp. y *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny son fitopatógenos que causan pérdidas considerables en el cacao (*Theobroma cacao* L.) en México, e incluso en América tropical. **Objetivo.** En este trabajo se buscó estimar los nichos ecológicos y de distribución potencial actual y futura de *T. cacao*, *M. roreri* y *Phytophthora capsici* Leonian en estas regiones para evaluar los posibles impactos del cambio climático (CC: escenarios SSP3 GFDL y SSP5 HADGEM a los horizontes 2041-2060 y 2081-2100) y proponer estrategias de adaptación ante estas proyecciones. **Metodología.** Se realizó la modelación con los softwares de aprendizaje automático *Maxent* y *Kuenm*, empleando capas de variables bioclimáticas y altitud, en tanto que los registros geográficos se obtuvieron de GBIF, el inventario forestal de México, de la literatura científica y de registros propios. Los modelos se calibraron según su complejidad, significancia y poder predictivo con *Kuenm*; luego, los modelos de distribución se reclasificaron a un umbral de 0.2. Para el análisis, se compararon escenarios y especies. **Resultados y discusión.** Para *T. cacao* se encontró una distribución potencial (DP) actual de 12.2% a nivel México, en tanto que el escenario más pesimista fue HADGEM 2081-2100, que proyectó pérdidas de DP de -5.4% del territorio nacional, así como ganancias a mayores altitudes. Las pérdidas se darían principalmente en regiones costeras (incluidas las áreas de cultivo actual). GFDL señaló impactos netos menores (reducción de DP nacional de 2.6%) en general, aunque en Soconusco las pérdidas serían equiparables y también habría ganancias a mayores alturas. Pese a ello, en ambos horizontes *M. roreri* y *P. capsici* seguirían coexistiendo con *T. cacao*, y en el horizonte largo se diferenciarían: a altitudes mayores ya no habría DP para *M. roreri* y *P. capsici*, pero sí para *T. cacao*. **Conclusiones.** Es necesario fortalecer la capacidad de adaptación del cultivo actual, y es posible que sea necesario migrar las zonas de cultivo a altitudes medias en el largo plazo. Cuestiones análogas se proyectaron para los demás países de América tropical, por lo cual se hace necesaria una vigilancia epidemiológica transfronteriza, y estrategias de manejo integrado de riesgos fitopatológicos, políticas públicas consistentes y el rediseño de sistemas agroforestales para afrontar tal escenario.

Palabras clave: adaptación al cambio climático; cambio climático; interacción clima-fitopatógeno; migración altitudinal; riesgo fitosanitario; sistemas agroforestales.

¹⁹ Sometido a: Pendiente de envío.
Estado: Sin someter.

7.2. Abstract

Background. *Phytophthora* spp. and *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny are phytopathogens that cause considerable losses in cacao (*Theobroma cacao* L.) in Mexico, and even across tropical America. **Objective.** This study aimed to estimate the ecological niches and the current and future potential distribution of *T. cacao*, *M. roreri*, and *Phytophthora capsici* Leoninan in these regions to assess the possible impacts of climate change (CC: GFDL SSP3 and HADGEM SSP5 scenarios for the horizons 2041–2060 and 2081–2100) and propose adaptation strategies in response to these projections. **Methodology.** Modelling was carried out using the machine learning software *Maxent* and *Kuenm*, employing layers of bioclimatic variables and altitude, while geographic records were obtained from GBIF, Mexico's forest and soil inventory, scientific literature, and original records. Models were calibrated according to their complexity, significance, and predictive power using *Kuenm*. Then, the distribution models were reclassified at a threshold of 0.2. For the analysis, scenarios and species were compared. **Results and Discussion.** For *T. cacao*, a current potential distribution (PD) of 12.2% at the national level was found, while the most pessimistic scenario was HADGEM 2081–2100, which projected PD losses of –5.4% of the national territory, as well as gains at higher altitudes. Losses would mainly occur in coastal regions (including current cultivation areas). GFDL indicated smaller net impacts (national PD reduction of 2.6%) overall, although in Soconusco the losses would be comparable and there would also be gains at higher elevations. Nevertheless, in both horizons *M. roreri* and *P. capsici* would continue to coexist with *T. cacao*, and in the long-term horizon they would differentiate at higher altitudes there would no longer be PD for *M. roreri* and *P. capsici*, but there would be for *T. cacao*. **Conclusions.** It is necessary to strengthen the adaptive capacity of current cultivation, and it may be necessary to migrate cultivation zones to mid-altitudes in the long term. Analogous issues were projected for other tropical American countries, making transboundary epidemiological surveillance necessary, along with integrated management strategies for phytopathological risks, consistent public policies, and the redesign of agroforestry systems to face such a scenario.

Keywords: agroforestry systems; altitudinal migration; climate change adaptation: climate change; climate-pathogen interaction; phytosanitary risk.

7.3. Introducción

El impacto del cambio climático (CC) sobre la biósfera ha sido estudiado desde hace tiempo, el cual se encuentra entrelazado con su salud y funcionalidad (Malhi *et al.*, 2020). Existe evidencia que fundamenta el proceso acelerado de calentamiento del planeta (Usher, 1989), el cual afecta a los ecosistemas marinos y terrestres debido al cambio en las condiciones de temperaturas medias anuales y en la variabilidad climática, al tiempo que tiene efectos sobre la acidificación del océano y en el aumento en el nivel del mar (Malhi *et al.*, 2020; IPCC, 2021). De igual modo, el cambio de estas

condiciones, que en muchos casos pueden ser adversas, afectan a los sistemas de producción agrícola (Monterroso-Rivas *et al.*, 2015), incluidos los Sistemas Agroforestales (SAF) de cacao (*Theobroma cacao* L.) (de Sousa *et al.*, 2019; Delgado-Ospina *et al.*, 2021). Dichas afectaciones no solo giran en torno a la reducción de la producción por cambios en los ciclos de cultivo, al nivel fisiológico (Lahive *et al.*, 2019; Ríos-Bolívar *et al.*, 2022), sino que también favorecen la incidencia de plagas y enfermedades (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Jung *et al.*, 2020; Marelli *et al.*, 2019). Aunado a que el CC puede afectar la idoneidad climática de los árboles más comúnmente utilizados como sombra en SAF de cacao en Mesoamérica, lo que comprometería la funcionalidad ecológica y productiva de estos sistemas (de Sousa *et al.*, 2019). Aunque menos comunes que los SAF en América, los monocultivos de cacao han ganado terreno en Sudamérica (por ejemplo, con variedades como CCN51) (Benjamin *et al.*, 2025). Si bien presentan rendimientos superiores, que pueden superar las 2.5 toneladas por hectárea, los monocultivos serían más vulnerables al CC debido a su menor capacidad de amortiguamiento ecológico y mayor exposición a eventos extremos, sobre todo por vientos intensos, sequías prolongadas y temperaturas elevadas (Nicholls *et al.*, 2013; Niether *et al.*, 2020); aunado a que se emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero debido al uso intensivo de agroquímicos. Además, cabe señalar que, al tratarse de sistemas sin cultivos alternos, los monocultivos de cacao presentan un mayor riesgo de pérdida económica ante eventos climáticos extremos o fitosanitarios, además de no contribuir a la seguridad alimentaria local, ni a la conservación de la biodiversidad y requerir mayor inversión económica y mano de obra. En contraste, los SAF proveen alimentos alternos —por ejemplo, frutos, tanto locales como introducidos— que diversifican la dieta y fortalecen la resiliencia socioecológica (Morán-Villa *et al.*, 2022; Nicholls *et al.*, 2013). Además, los SAF proveen protección contra plagas y enfermedades (Murillo-Cuevas *et al.*, 2020; Niether *et al.*, 2020). En este contexto, las estrategias de mitigación (reducción de impactos a nivel nacional e internacional) y adaptación (adecuación local o regional) al CC han comenzado a tomar la merecida importancia durante los últimos años (Bunn *et al.*, 2019; Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Hebbbar *et al.*, 2016).

La importancia de los SAF de cacao radica en que, debido a que se dan en esquemas de policultivo (Cruz González *et al.*, 2013), son una forma de agricultura multifuncional. Por lo que, al igual que las otras modalidades de esta, proveen de múltiples productos y servicios, incluidos los servicios ecosistémicos (Casanova-Lugo *et al.*, 2016), que se reflejan en beneficios de carácter económico, social y ambiental (Niether *et al.*, 2020). Además de lo anteriormente indicado, generan ingresos económicos, empleos y arraigo cultural al nivel de agricultura familiar (pues la mayoría de los SAF se encuentran en manos de pequeños productores, que en México poseen parcelas de 1.5 a 2 hectáreas en promedio). También proveen la protección del suelo y de la biodiversidad como externalidades hacia el conjunto de la sociedad (Niether *et al.*, 2020). Además, estos sistemas son pieza clave para avanzar hacia el desarrollo sostenible (FAO, 1999). Aunado a que, los SAF sirven como estrategia de mitigación al CC, dado que capturan y fijan carbono (Trinidad *et al.*, 2016), conservan buena parte de la biodiversidad (en algunos casos en menor medida que en cuanto a bosques referente a especies nativas (Estrada *et al.*, 1997; Muñoz *et al.*, 2005), pero también en cuanto a la agrobiodiversidad) y termorregulan microclimas; a la vez que merman la presión por bienes materiales (leña, madera, frutos, etc.) sobre los bosques naturales. E incluso se han mostrado como alternativas a los cultivos ilícitos (Castro-Nunez *et al.*, 2020). Sin embargo, el cultivo de cacao está en peligro en México, prácticamente desde cualquier dimensión: social, agronómica y económica, así como en las diferentes fases de la cadena productiva (Sántiz Tovilla *et al.*, 2023); esto es debido a procesos que expresan la pérdida de importancia del cultivo del cacao: debido a un sistema organizativo de los productores muy atomizado y a que muchos de ellos son de edad avanzada, SAF con poco, inadecuado o nulo manejo, que se traduce en rendimientos reducidos, y que en el contexto de precios bajos se genera un sistema poco rentable, donde se extiende muy poco el proceso de poscosecha, además de que no existe una agroindustria nacional consolidada, por lo que el beneficio de la venta de productos más elaborados no llega a los pequeños productores. Aunado a que se debe importar gran cantidad de cacao cada año, pues hay un déficit en la producción nacional. Tales condiciones son análogas a la mayoría de los países de

América donde este grano se cultiva, solo con casos excepcionales de aquellos países donde su balanza comercial es superavitaria o donde hay políticas efectivas de fomento agrícola, suficiente extensionismo y tamaños de parcelas más grandes (ej. Colombia, Perú, Ecuador, Brasil).

Además, los lugares donde mayormente se cultiva el cacao en México (regiones de la Chontalpa en Tabasco y el Soconusco en Chiapas) son muy vulnerables a los impactos, ya evidenciados (Hernández *et al.*, 2016) del CC debido a la deforestación histórica de vegetación original, en especial la selva alta en el sureste del país (Marín Olán, 2022; Santos-Hernández *et al.*, 2021) y a modificaciones de las cuencas con proyectos hidroeléctricos e hidráulico-agrícolas (Arrieta-Fernández, 1992; del Carpio Penagos, 2017).

A nivel mundial, se ha estimado que las pérdidas anuales de cacao por enfermedades fitopatogénicas ascienden a más de 40%, que se concentran en los géneros *Rhizoctonia* (*Oncobasidium* o *Ceratobasidium*), *Moniliophthora*, *Phytophthora* y *Badnavirus/Nepovirus* (Bailey & Meinhardt, 2016). De hecho, las enfermedades (en relación con el clima, que les es idóneo) han moldeado la distribución actual de las zonas cacaoteras y su productividad a nivel mundial (Aguilar-González, 2018; Bailey & Meinhardt, 2016; Díaz-Valderrama *et al.*, 2020). En México, las dos especies de mayor relevancia son: *Phytophthora* spp., que causa la mancha negra y pudrición del fruto, así como canchros y la marchitez de la planta en cualquier etapa de desarrollo. La otra es *Moniliophthora roreri* (Cif.) H.C. Evans, Stalpers, Samson & Benny, agente causal de la moniliasis (*frosty pod rot*), enfermedad que pudre al fruto y cuyo control es complicado y altamente demandante de mano de obra (Bailey *et al.*, 2018; Ortiz-García *et al.*, 2015). Ambas especies son de impacto generalizado en el país y se presentan en gran parte de los países de América, si bien las pérdidas en grano por la mancha negra son inferiores que las producidas por la moniliasis (Hernández-Gómez *et al.*, 2015; Torres-de la Cruz *et al.*, 2023). De hecho, a nivel mundial las pérdidas estimadas por *M. roreri* son de apenas del 1.5%, pero esto tiene que ver más con que la producción en América es muy inferior (~15% del total) respecto a la del resto del mundo; más aún, la producción de México es inferior, con menos de 30 mil toneladas

(SIAP, 2022), respecto a la mayor parte de los países Sudamericanos. Sin embargo, a nivel mundial el género *Phytophthora* ocasiona pérdidas mucho mayores (estimadas en ~20%), que se reflejan más por su impacto en África y Asia, donde se concentra, por mucho, la producción mundial de cacao (~70% en África y ~12% en el Sudeste Asiático y territorios insulares de Oceanía (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; FAO, 2022).

Como antecedentes se tienen las siguientes cuestiones. Un estudio que evaluó cómo el CC puede influir en la distribución de la moniliasis y el cacao fue el de Bucker Moraes *et al.* (2012) a nivel de Brasil, el cual encontró reducciones para la moniliasis, aunque no para el cacao (que de hecho aumentaría su distribución). Aun así, se proyectaron áreas de coexistencia de condiciones idóneas para ambas especies en el futuro. Resultados similares se proyectaron para Ecuador continental con escenarios de CC más recientes (Plasencia-Vázquez *et al.*, 2022). Por otro lado, *Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime & Phillips-Mora, especie emparentada con *M. roreri* (Díaz-Valderrama *et al.*, 2020), que causa pérdidas del 10% de la producción mundial (Delgado-Ospina *et al.*, 2021), presente en Suramérica y aún ausente en América Central y el resto del mundo, es el agente causal de la escoba de bruja. Un estudio reciente (Ferrer-Sánchez *et al.*, 2022) a nivel del Ecuador continental proyectó una posible ampliación del rango de este patógeno bajo el escenario más pesimista (RCP 8.5 para 2050–2070), mientras que en el escenario optimista (RCP 4.5 para 2050–2070) se proyectó una mayor estabilidad. Además, se reportó alta idoneidad para *M. perniciosa* en el futuro para partes de América Central, lo que podría implicar riesgos de dispersión ante CC (Másmela-Mendoza, 2019) hacia países de América Central y por tanto, hacia México. Por otro lado, *Phytophthora megakarya* Brasier & M.J. Griffin, especie altamente agresiva y causante de la mancha negra del cacao en África, aún no reportada en América, ha sido modelada por Obiakara *et al.* (2020) con Maxent, quienes reportaron condiciones idóneas en regiones cacaoteras de América, incluyendo México suroccidental, Panamá y el Caribe.

El potencial de establecimiento de tales especies fitopatogénicas refuerza la necesidad de implementar una vigilancia epidemiológica inter y transcontinental consistente y constante (Delgado-Ospina *et al.*, 2021; Obiakara *et al.*, 2020). Tal urgencia se

sustenta en casos recientes que evidencian la capacidad de dispersión de agentes patógenos hacia regiones previamente no afectadas, e incluso nuevas relaciones ecológicas. Por ejemplo, *Rizoctonia theobromae* (P.H.B.Talbot & Keane) Oberw., R.Bauer, Garnica & R.Kirschner, que ha sido reconocido históricamente como el agente causal de la muerte del rallado vascular (*Vascular Streak Dieback*, VSD), una de las enfermedades más devastadoras del cacao en el Sudeste Asiático, que causa necrosis vascular, defoliación y debilitamiento de brotes (Bailey & Meinhardt, 2016). Tal fitopatógeno fúngico, que representa pérdidas estimadas en la producción mundial de cacao del 2% (Delgado-Ospina *et al.*, 2021), se había mantenido confinado a su nicho ecológico original, sin evidencia de dispersión hacia otros continentes. Sin embargo, ha sido recientemente (2023-2025) detectado en cultivos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en Brasil y la Guyana Francesa (Centro Internacional para la Agricultura Tropical, CIAT, 2025; Pardo *et al.*, 2024), donde se le asoció con síntomas compatibles con la escoba de bruja de la yuca (*Cassava Witches' Broom Disease*, CWBD), tal relación apenas está siendo esclarecida (Gil-Ordóñez *et al.*, 2024). Si bien anteriormente la CWBD (en yuca) había sido asociada con otros fitopatógenos, como fitoplasmas y se había presentado desde 2005 en Wallis y Futuna, aunado a su más reciente emergencia, desde el 2009 en el sudeste asiático (CIAT, 2025), no se sabía que podía estar asociada con *R. theobromae*. Lo que representa un caso de “patógeno de nuevo encuentro”: esto es, una nueva relación hospedero-patógeno en un ecosistema distinto al original: en particular, la presencia simultánea de *R. theobromae* y fitoplasmas en yuca sugiere una posible asociación etiológica aún no completamente resuelta (Gil-Ordóñez *et al.*, 2024). La expansión geográfica y funcional de este fitopatógeno transcontinental, confirmada por la declaratoria de emergencia fitosanitaria de la yuca en los estados de Pará y Amapá, Brasil (Ministerio da Agricultura e Pecuária, MAPA, 2025), plantea un riesgo latente (posibilidad de transferencia) para los SAF de cacao en América. Este hongo es altamente patogénico, capaz de inducir enfermedades vasculares sistémicas que provocan debilitamiento progresivo y muerte de plantas. Aunado a que su diagnóstico, aislamiento y manejo agronómico son particularmente complejos, lo que dificulta su

contención. En ese sentido, si este patógeno infecta al cacao americano, es muy plausible su eventual diseminación hacia la mayoría de los países productores, donde podría ocasionar pérdidas significativas, tal como ocurrió en décadas pasadas con la expansión paulatina de la moniliasis. Esta posibilidad se ve reforzada por la compatibilidad fisiológica entre las especies involucradas y la frecuente coexistencia de cultivos de yuca y cacao en los territorios afectados de Brasil. Más aún, la expansión intencionada y exitosa de *Moniliophthora perniciosa* hacia las plantaciones de Brasil (Evans & Waller, 2010), así como la reciente incursión de la moniliasis (primer foco en 2021, y brotes localizados en 2022 y 2024), también en Brasil (Walendorff & Fantin, 2024), evidencian la importancia de atender las advertencias fitosanitarias y de fortalecer los modelos predictivos de riesgo de expansión. Si bien estos eventos no suelen ocupar titulares mediáticos, una vez que se presentan de forma más generalizada, su impacto agronómico y económico es profundo, y su omisión en la agenda científica y política puede derivar en escenarios de riesgo.

Lasiodiplodia theobromae (Pat.) Griffon & Maubl., por su parte, es un hongo fitopatógeno relevante en cacao y capaz de hospedarse en más de 500 especies vegetales de naturaleza diversa. Se trata de un parásito oportunista que vive como endófito en los tejidos vegetales, pero que se torna patogénico cuando el hospedante entra en situación de estrés —ya sea por factores abióticos o fisiológicos—. Mismo que provoca síntomas como muerte de puntas, ramas laterales, canchales e incluso la muerte del árbol (Bautista-Cruz *et al.*, 2019; Cibrián-Tovar *et al.*, 2007). Qiu *et al.* (2016) desarrollaron un modelo eco-climático (CLIMEX) para esta especie en Australia, para lo cual calibraron datos experimentales de temperatura y estrés hídrico. Proyectaron una alta idoneidad en regiones cálidas y secas. Aunque el estudio se centró en vides, los parámetros ecológicos obtenidos son extrapolables a sus otros hospederos, dada la plasticidad ecológica de *L. theobromae*. Este tipo de modelado, basado en CLIMEX, es distinto al enfoque de Maxent, ya que CLIMEX se fundamenta en datos fisiológicos experimentales (modelado semi mecanístico) que permiten proyecciones robustas en escenarios de CC. Sin embargo, Ireland y Kriticos (2019), mediante un análisis bibliométrico comparativo, evidenciaron que las enfermedades de plantas (45 especies

estudiadas) estuvieron significativamente menos representadas en los modelos CLIMEX frente a las plagas artrópodos (135 especies); además, reportaron un *odds ratio* (probabilidad) igual a 0.42 de que un fitopatógeno tenga un modelo publicado. Este hallazgo de subrepresentación de los fitopatógenos lo atribuyeron a desafíos técnicos, epistemológicos y logísticos. Por ejemplo, a la escasa disponibilidad de datos de distribución y otras razones interdependientes: el estudio de los fitopatógenos presenta retos adicionales que lo hacen metodológicamente más exigente, pues su naturaleza microscópica dificulta la detección e identificación en campo (e incluso mediante micro o macromorfología), y su identificación suele requerir bastante expertiz e incluso de técnicas moleculares, pese a que los ciclos de vida de ambos grupos (fitopatógenos y plagas artrópodos) son igualmente complejos; además, los paradigmas experimentales para evaluar la virulencia, dispersión y respuesta de los fitopatógenos a factores climáticos están menos estandarizados.

En este contexto, el modelado de nicho ecológico (ENM) se torna como una herramienta valiosa para predecir la distribución espacial y temporal de enfermedades fitopatógenas, en el cual se integran datos ambientales, de ocurrencia y en su caso, fisiológicos. Lo que facilita la vigilancia fitosanitaria, prevención de brotes y la zonificación de riesgos (Escobar & Craft, 2016; Wisz *et al.*, 2013). Sin embargo, enfrenta limitaciones como una escasa integración entre disciplinas (Garrett *et al.*, 2011), la escasez de datos georreferenciados (sobre todo para especies poco conocidas), la dificultad para modelar interacciones complejas entre especies y los factores abióticos, la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas futuras (sobre todo la precipitación) y la subrepresentación de enfermedades vegetales en modelos que simplifican dinámicas ecológicas complejas, lo que puede llevar a predicciones imprecisas (Escobar & Craft, 2016; Garrett *et al.*, 2011). En el caso particular del cacao, el consenso destaca la necesidad de calibrar modelos a múltiples escalas (pero sobre todo a nivel local) e integrar datos del cultivo, los patógenos y los vectores (de ser ecológicamente relevantes), para identificar zonas aptas para el cultivo, pero no para sus enfermedades, con lo que se promuevan estrategias de adaptación como el manejo integrado (Flood, s.f.; Garrett *et al.*, 2011; Ortiz-García *et*

al., 2015). Estos consensos subrayan la relevancia de herramientas como *Maxent* y *Kuenm* para actualizar proyecciones en el cacao y sus enfermedades en el contexto americano y mexicano. *Kuenm*, un paquete en R desarrollado por Cobos *et al.* (2019), es un avance metodológico significativo, al optimizar y calibrar modelos correlativos de *Maxent*, un algoritmo de aprendizaje automático ampliamente utilizado para predecir distribuciones de especies a partir de datos de presencia y variables ambientales, fundamentado en estadística condicional bayesiana (Elith *et al.*, 2011; Phillips *et al.*, 2017). *Kuenm* facilita la calibración sistemática de parámetros de los modelos de *Maxent* —como el factor de regularización, combinaciones de funciones de respuesta y umbrales de selección— que genera cientos de modelos candidatos, incluso con diferentes conjuntos de covariables ambientales y seleccionando los óptimos mediante criterios estadísticos robustos (por ejemplo, significancia parcial, complejidad y tasas de omisión), lo que minimiza el riesgo de sobreajuste y mejora la transferibilidad de las proyecciones a escenarios futuros de CC, con lo que se superan algunas de las limitaciones de los modelos *Maxent* estándar, que requieren ajustes manuales, y por ende, son propensos a sesgos subjetivos (Cobos *et al.*, 2019; Muscarella *et al.*, 2014). Esta importancia radica en su capacidad para manejar incertidumbre en datos escasos o georreferenciados limitados, comunes en las especies de fitopatógenos, incluidas las que aquí se analizan.

Debido a lo anterior, resulta necesaria la evaluación de los posibles impactos del CC en este cultivo tan emblemático de América Tropical en general y de México en particular —el país más septentrional dentro del cinturón cacaotero, —especialmente porque los modelos climáticos evolucionan constantemente, el clima presenta alta variabilidad interanual, y los resultados de las proyecciones para el cultivo han sido contradictorias (Másmela-Mendoza, 2019; Quiroz-Antúnez *et al.*, 2022; Rivera-Aguirre *et al.*, 2021). Por otro lado, no se han identificado estudios con un enfoque similar —centrado en el cacao y sus enfermedades, mediante técnicas robustas de aprendizaje automático ante escenarios de CC—, a pesar de que este tipo de análisis resulta útil para la planeación de políticas públicas y la formulación de estrategias de adaptación al CC.

Algunas especies requieren la presencia de otras para coexistir, ya sea al mismo tiempo o en momentos diferentes (Olusayo Okeniyi *et al.*, 2021). Las interacciones entre varias especies son clave para determinar el nicho ecológico de una especie y, por lo tanto, su rango de distribución (Soberon & Peterson, 2005). De ahí viene la importancia de considerar varias especies (antagónicas y simbióticas) de un cultivo dentro de un mismo estudio.

Por lo anterior, en el presente artículo se buscó estimar los modelos correlativos de Maxent del cacao, *M. roreri* y *Phytophthora capsici* Leonian para la proyección del espacio que estas especies pueden y podrán ocupar a futuro (con CC) en América tropical en general y en México en particular para la proposición de estrategias de adaptación ante tales escenarios. La hipótesis de investigación fue que las variables bioclimáticas de mayor influencia en estas especies serán aquellas que presentan los valores extremos (temperatura del mes más cálido, precipitación del mes menos lluvioso, etc.). Además, que las áreas de distribución potencial de estas especies se mantendrán intactas en cada uno de los escenarios climáticos considerados, es decir, que no se proyectarán cambios en la idoneidad debido al CC en ninguna de las especies consideradas.

7.4. Materiales y Métodos

7.4.1. Especies

Theobroma cacao

Se trata de un árbol tropical perennifolio de pequeña talla, perteneciente a la familia Malvaceae, subfamilia Sterculioideae, que en condiciones de cultivo alcanza entre 4 y 7 metros, mientras que en estado silvestre puede superar los 20 metros (Vázquez-Yañes *et al.*, 1999). Desde el punto de vista edafoclimático, *T. cacao* se desarrolla óptimamente bajo condiciones tropicales cálidas y húmedas, con temperaturas medias entre 20-30 °C, humedad relativa superior al 70%, y precipitaciones anuales entre 1,500 y 2,500 mm, distribuidas de forma uniforme (estación corta de hasta 2 meses y medio); los suelos deben ser profundos (>60 cm y de preferencia >1 m) y estar libres de rocas, bien drenados (pero no arenosos) y fértiles. Además, el cacao es sensible a heladas, sequías, vientos fuertes y requiere sombra parcial para un desarrollo

fisiológico y microclimático adecuado: en los primeros años del 60 al 70% y posteriormente de 30-40%, de otro modo se agravan las enfermedades (Mendoza-López *et al.*, 2018; Suárez *et al.*, 2013; Suárez-Venero *et al.*, 2021; Vázquez-Yañes *et al.*, 1999). Al respecto, según Suárez *et al.* (2013), los factores climáticos (precipitación y temperatura anuales) y edáficos (tipo y profundidad del suelo) son los de mayor influencia. A través del método Delphi, tales autores establecieron rangos óptimos como precipitación entre 1,800-2,200 mm y temperatura media anual entre 22–26 °C, con suelos muy profundos (>100 cm) y agrupamientos de suelos óptimos, por ejemplo, en fersialíticos, ferralíticos y *Fluvisols*. Desde una perspectiva agroecológica, el cultivo exitoso de cacao se basa en SAF que combinan cacao con árboles de sombra y otras especies, lo que contribuye a mantener la biodiversidad, mejorar la fertilidad del suelo y conservar el agua. Prácticas como el manejo nutricional mediante enmiendas orgánicas, medición y optimización de la fertilidad edáfica son esenciales para sostener la productividad y la sanidad del cultivo (López Báez *et al.*, 2015).

Phytophthora capsici

El género *Phytophthora* agrupa oomicetos hemibiotróficos que alternan entre fases biotróficas (nutrición a partir de células vivas) y necrotróficas (destrucción de tejidos) durante el proceso de infección (Perrine-Walker, 2020). En *T. cacao*, estas especies infectan principalmente a frutos, tallos y raíces mediante zoosporas móviles, capaces de nadar en el agua, que penetran los tejidos vegetales en condiciones de alta precipitación y temperaturas altas y estables (comunes en climas cálido-húmedos, donde crece el cacao), lo que provoca enfermedades como la mancha negra (atribuida a diferentes especies del género a nivel mundial, con *P. megakarya* como la de mayor impacto por afectar las plantaciones de África occidental). Además, *Phytophthora* spp. pueden causar la muerte de hasta el 10% de los árboles de cacao cada año, principalmente por el desarrollo de canchros en el tallo y procesos de marchitamiento progresivo (resultante de la obstrucción causada por los canchros, la infección de raíces finas y la colonización de tejidos corticales) (Guest, 2007; Perrine-Walker, 2020). *Phytophthora palmivora* (E.J. Butler) E.J. Butler, considerada una especie críptica por su alta variabilidad genética y diversidad de hospedantes (Chávez-Ramírez *et al.*,

2021; Cibrián-Tovar *et al.*, 2007; Perrine-Walker, 2020), es otra de las especies más comúnmente reportadas en cacao a nivel mundial; al igual que otras especies del género que afectan este cultivo —como *P. megakarya*, *P. capsici* y *Phytophthora citrophthora* (R.E.Sm. & E.H.Sm.) Leonian—y que presenta un ciclo de vida complejo, caracterizado por múltiples fuentes de inóculo primario, incluyendo esporangios, zoosporas (de vida prolongada), clamidosporas, micelio y tejidos infectados (Guest, 2007; Perrine-Walker, 2020; Surujdeo-Maharaj *et al.*, 2016). Esta diversidad de estructuras infectivas, junto con sus múltiples mecanismos de diseminación (salpicaduras por la lluvia, insectos vectores, roedores, herramientas contaminadas, entre otros), permite la generación de epidemias explosivas (Guest, 2007; Torres-de la Cruz *et al.*, 2023). El patógeno coloniza mazorcas, cojines florales, corteza y raíces, estableciendo reservorios persistentes de inóculo; además, bajo condiciones específicas, este patógeno puede formar estructuras sexuales (oosporas), aunque este fenómeno es raro en ambientes naturales debido a que requiere la presencia simultánea de los tipos compatibles: A1 y A2, siendo el tipo A2 predominante en el cultivo de cacao a nivel mundial (Perrine-Walker, 2020). Su capacidad para infectar a todas las partes del árbol de cacao en cualquier etapa de desarrollo, junto con la poca resistencia de los genotipos comerciales (Guest, 2007) y un manejo agronómico inadecuado, contribuyen a la ubicación del género como la principal causa fitopatogénica de pérdida de la cosecha mundial de cacao (Delgado-Ospina *et al.*, 2021).

En México, la implicación de *Phytophthora capsici* como agente causal de la mancha negra en cacao ha sido cuestionada en varios estudios. Por el contrario, en Tabasco se ha identificado de manera consistente a *P. tropicalis* como el oomiceto responsable (Chávez-Ramírez *et al.*, 2021), aunque persisten divergencias taxonómicas y debates en la literatura respecto a si *P. capsici* y *P. tropicalis* podrían representar la misma especie o complejos de especies muy cercanos; de hecho, en un principio se creyó que tal aislamiento correspondía a *P. palmivora*, pero luego se hizo la identificación micro y macromorfológica y se notó que no correspondía con dicha especie (Chávez-Ramírez *et al.*, 2021). No obstante, en la base de datos *Global Biodiversity Information*

Facility (GBIF, 2025), una de las principales fuentes de información de estudios de modelación de la distribución de las especies (SDM, por sus siglas en inglés)-ENM, solo se obtuvieron dos Registros Geográficos (RG) de *P. tropicalis* (ambas en Brasil hasta julio de 2025), lo que subraya la necesidad de estudios regionales que clarifiquen su distribución e impacto real sobre el cultivo. En tanto que, *P. palmivora* y *P. capsici* presentaron comparativamente más RG en GBIF. De igual modo, *P. palmivora* ha sido confirmada sucesivas veces mediante técnicas moleculares en países sudamericanos como Colombia (Rodríguez-Polanco *et al.*, 2020) y más recientemente en Tabasco y Chiapas, México (Yzquierdo-Álvarez *et al.*, 2025).

Moniliophthora roreri

Es un basidiomiceto hemibiotrófico que inicia su ciclo de infección con una fase biotrófica prolongada durante la cual crece intercelularmente sin causar necrosis visible. Esta fase es seguida por una etapa necrotrófica, caracterizada por la muerte celular del hospedero y la esporulación del hongo (Albores Flores *et al.*, 2022; Bailey *et al.*, 2018). Su infección se inicia con la germinación de los conidios sobre los frutos, penetrando a través de estomas o heridas, seguida de una colonización interna que culmina en necrosis tisular y una esporulación masiva visible como un micelio blanco (pseudoeostroma) sobre la superficie del fruto (Albores Flores *et al.*, 2022; Phillips-Mora & Wilkinson, 2007). Tales características facilitan su identificación macromorfológica. Aunque históricamente se ha especulado sobre una posible fase sexual de este hongo, no se han identificado estructuras sexuales funcionales en condiciones naturales; estudios recientes (Ali *et al.*, 2015; Minio *et al.*, 2023) confirman que la dispersión de *M. roreri* hacia regiones septentrionales ocurre principalmente mediante clonación (incluida América central), lo que ha generado una notable homogeneidad genética en dichas poblaciones. Este patrón genético sugirió un centro de origen en la región noroccidental de Sudamérica, específicamente en el Valle Alto del Magdalena, Colombia, desde donde se ha expandido hacia otras regiones (Ali *et al.*, 2015), incluyendo América Central y México. Su impacto económico es severo, pues sus conidios mantienen viabilidad durante periodos prolongados, aunado a que su dispersión se da de diversas formas (incluso por el viento y por la propia ropa de los

trabajadores) y se presenta en epidemias sucesivas conforme se da la fructificación del cacao (Torres-de la Cruz *et al.*, 2020). Además, este fitopatógeno puede destruir completamente los frutos infectados, por lo que representa una de las principales amenazas para la producción de cacao en América tropical (Díaz-Valderrama *et al.*, 2020). Aunado a su potencial de expansión en el futuro hacia otras regiones inter y transcontinentales (Másmela-Mendoza, 2019).

7.4.2. Modelado del nicho ecológico

Registros geográficos y variables bioclimáticas

Registros geográficos

Para *T. cacao* los datos de presencia o RG se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, INFyS (CONAFOR, 2025), de la GBIF (GBIF, 2025) y Motamayor *et al.* (2008). Estos últimos autores hicieron un análisis exhaustivo sobre las diferencias genéticas a nivel de especie en América. Los RG de los agentes causales de las enfermedades se obtuvieron de literatura científica y de GBIF. Previo a su descarga, la información de GBIF se filtró por país y coordenadas geográficas. Se revisó la información para eliminar datos duplicados, así como aquellos fuera del rango natural de la especie: incluyendo a áreas de bosque o de agricultura y excluyendo lagos, océanos y países donde no han sido reportadas. En los casos de información secundaria sin coordenadas explícitas, se realizaron aproximaciones geográficas (con base en información de *Google Maps*) cuando se incluía referencia a localidades, veredas o parcelas específicas. Aunque debido a que la información bioclimática utilizada se genera con un espaciamiento de 5 km, se asumió una tolerancia geográfica equivalente en la georreferenciación, lo que permite integrar registros con precisión relativa sin comprometer la validez espacial del análisis. Luego, para reducir el sesgo de muestreo que a menudo ocurre con este tipo de datos (de solo presencia), se redujo su autocorrelación espacial, como recomiendan algunos autores (Aiello-Lammens *et al.*, 2015), mediante su adelgazamiento o poda (*thinning*) con su filtrado aleatorio con una cuadrícula a un espaciamiento de 5 km desde RStudio (R Core Team, 2024).

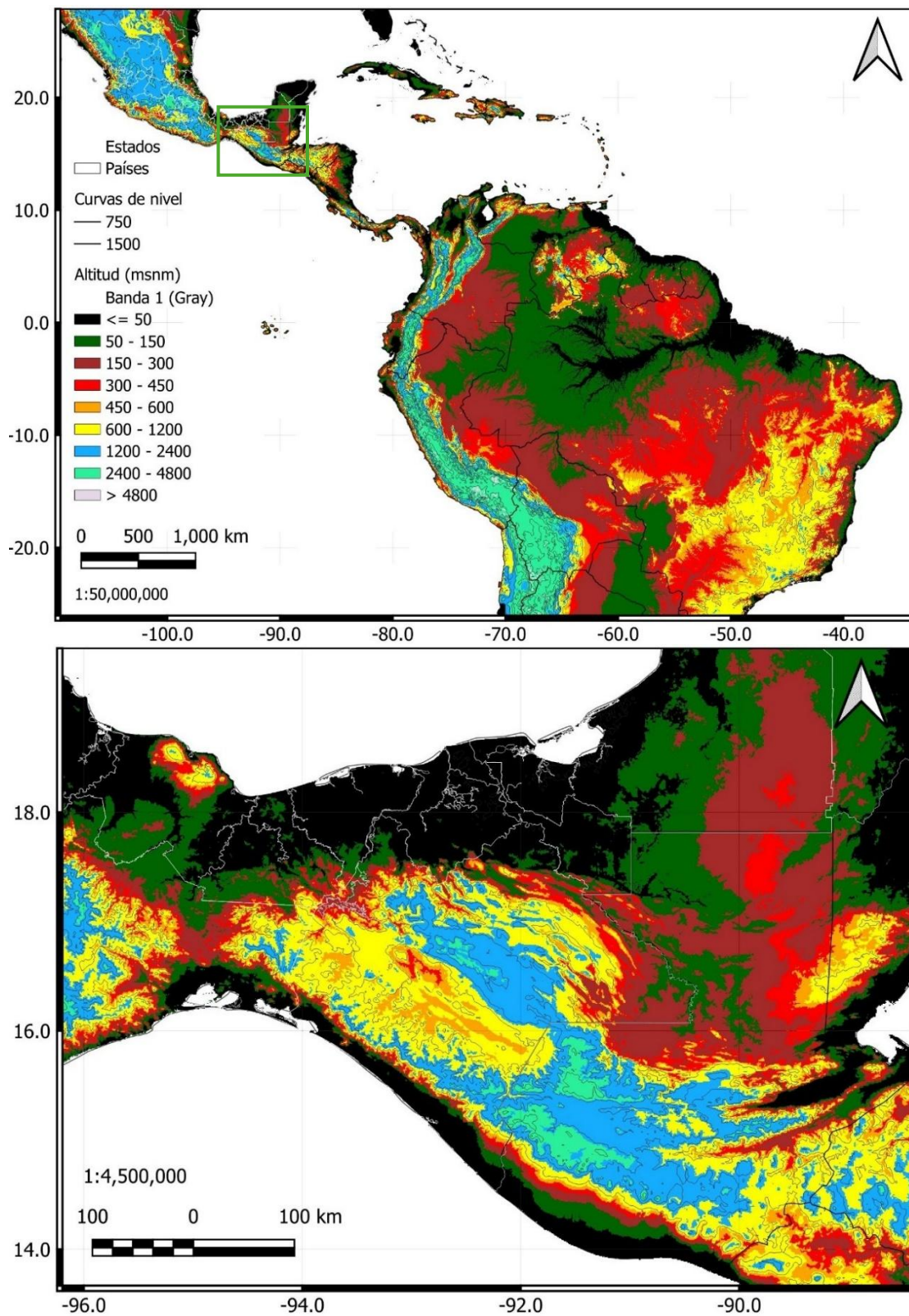


Figura 33. Altitud del área de estudio. A) América tropical. B) Sureste de México. Fuente: elaboración propia en QGis con base en la capa “Elev” de WorldClim 2.1.

Posteriormente, las bases de datos de RG se dividieron en grupos espacialmente no correlacionados con ENMeval, un paquete de RStudio, usando la función *get.randomkfolds* con cuatro *kfolds*, los RG ya depurados y 5000 puntos aleatorios de fondo (Muscarella *et al.*, 2014), para ser utilizados en las siguientes fases de modelado: entrenamiento (75% de RG, tres de los grupos reagrupados) y prueba (25% de RG, el grupo restante). Mientras que en la evaluación final de los modelos se utilizó información recabada en campo, RG propios o independientes de los RG previamente enunciados.

En la Figura 33 se presenta la altitud del área en estudio, con fines de expresar la gran variabilidad que se encuentra en esta. Lo cual será relevante en el análisis posterior.

El Cuadro 6 resume los registros geográficos utilizados para cada especie, diferenciando su origen (GBIF, literatura científica y RG propios), así como las etapas de depuración y selección final para evaluación. Se destaca el alto volumen inicial para *T. cacao*, y el refinamiento progresivo aplicado a todas las especies, así como algunas aclaraciones taxonómicas y criterios de muestreo espacial. De igual modo, en las siguientes tres figuras se observa la distribución de los RG recabados.

Cuadro 6. Registros geográficos de cada especie según su fuente y fase de procesamiento

Especie	GBIF	Fuentes secundarias (literatura científica)	Tras su pre-procesamiento (limpieza y <i>thinning</i>)	RG de evaluación final
<i>Theobroma cacao</i>	853	950 en Motamayor et al. (2008) y 40** en el INFyS	680	79***
<i>Moniliophthora roreri</i>	124	302	177	24+
<i>Phytophthora capsici</i> *	41, pero solo 24 usados.	46	41	10+

*Es casi seguro que *P. tropicalis* sea la especie que afecta al cacao en el país. **Referido al nivel de sitios (unidades de muestreo secundaria) y no al conglomerado (unidad de muestreo primaria), que fue 27. ***Incluidos puntos aleatorios dentro de SAF cacao en Tabasco y Chiapas, 30 en cada caso.

*Incluidos RG propios, recabados durante trabajos de campo.

En estudios anteriores no se habían incluido de forma amplia los RG de *T. cacao* de México y el análisis a nivel regional, por ende, la relevancia de este capítulo. En la

Figura 34 se nota una buena representación, no solo del país, incluso de las demás áreas. De hecho, se nota que los RG de cada fuente difieren enormemente, lo que se debe a su naturaleza: mientras que el INFyS se trata de un inventario forestal, GBIF incluye datos botánicos y de plataformas de ciencia ciudadana (como Naturalista) y Motamayor *et al.* (2008) trató de destacar la variabilidad genética del cacao, por lo que sus RG fueron más distantes y exhaustivos sobre la cuenca del Amazonas; lo cual le sirvió a tales autores para establecer el centro de origen del cacao en esa región.

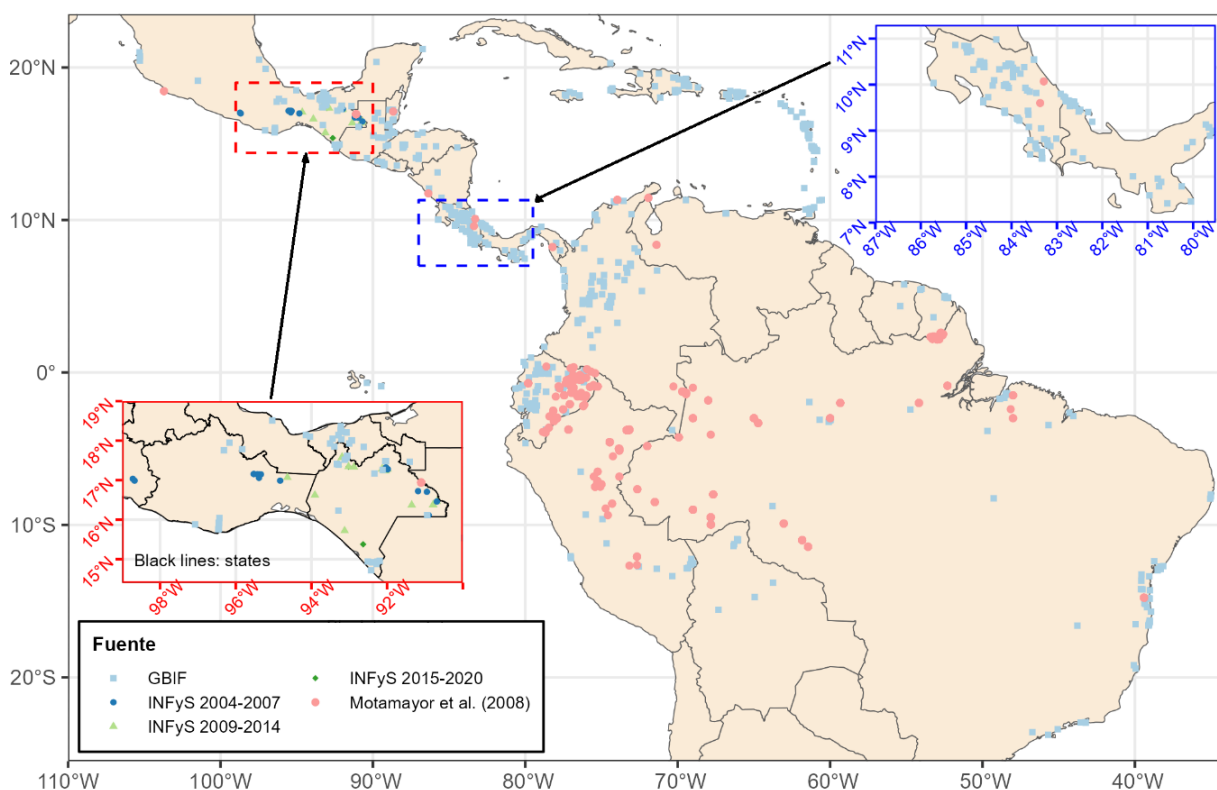


Figura 34. Registros geográficos de *Theobroma cacao*.
Fuentes: CONAFOR (2025), GBIF (2025) y Motamayor *et al.* (2008).

Al respecto del INFyS, se realizaron cálculos de indicadores ecológicos con los datos de los sitios de muestreo de *T. cacao*; ello con el objetivo de caracterizar el tipo de sistema muestreado—ya sea natural o cultivado. Pues, aunque en algunas de esas ubicaciones existen SAF, los registros oficiales de las parcelas de cacao en Chiapas no reportan polígonos dentro de algunos de esos sitios, ni incluso cercanos a estos. Lo cual se consideró relevante, ya que dichas áreas se ubican en la zona de amortiguamiento de una reserva natural (Selva Lacandona) y presentan condiciones

agroclimáticas contrastantes respecto a las demás zonas de producción, lo que las hizo interesantes de analizar.

Para el caso de *M. roreri* (Figura 35), los RG provinieron de diferentes fuentes, dado que los estudios han sido más localizados, excepto por dos de Sudamérica: los más amplios (Ali *et al.* 2015 y Phillips-Mora *et al.* 2007).

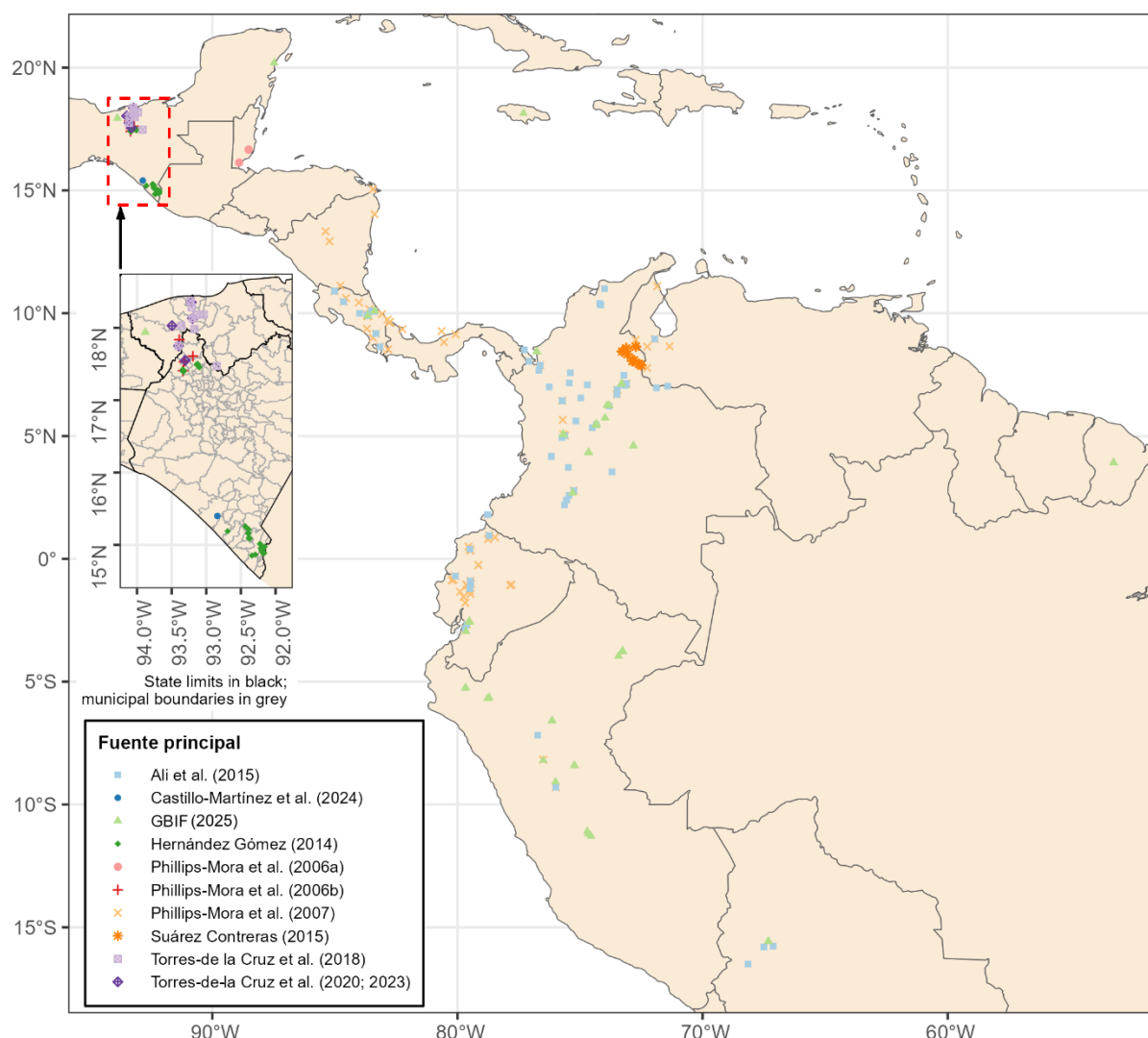


Figura 35. Registros geográficos de *Moniliophthora roreri*.

Fuentes: Ali *et al.* (2015), Castillo-Martínez *et al.* (2024), GBIF (2025), Hernández-Gómez (2014), Phillips-Mora, Cawich *et al.* (2006), Phillips-Mora, Coutiño, *et al.* (2006), Phillips-Mora y Wilkinson (2007), Suárez Contreras (2015), Torres-de la Cruz *et al.* (2020, 2023), Torres-de-la-Cruz *et al.* (2018).

Si bien el número de RG disponibles para *P. capsici* puede considerarse limitado, su distribución abarca diversas regiones del país (ver Figura 36), así como algunos puntos

en Sudamérica. Esta amplitud espacial, aunque basada en pocos registros, contribuye a representar adecuadamente su posible rango ecológico. Se tenía la alternativa de fusionar RG de *P. palmivora* con los de *P. capsici*, o bien, tomar RG fuera de América de *P. capsici* para tener más información geográfica, pero se decidió proceder así para evitar tener respuestas posiblemente inexistentes o muy sesgadas hacia un espacio ambiental muy distinto al que se encuentra en América tropical respectivamente.

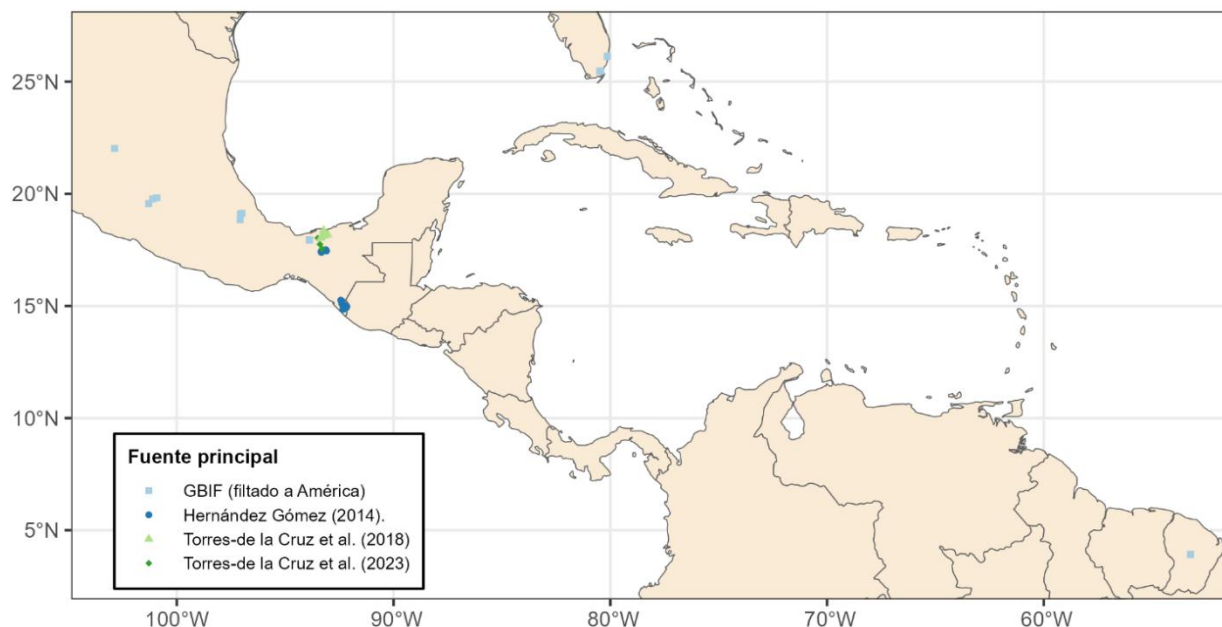


Figura 36. Registros geográficos de *Phytophthora capsici/tropicalis*.

Fuentes: Hernández-Gómez (2014), Torres-de la Cruz *et al.* (2023) y Torres-de-la-Cruz *et al.* (2018).

Variables bioclimáticas

Con respecto a las variables bioclimáticas, se consideraron las 19 variables que indican Booth *et al.* (2014) y O'Donnell & Ignizio (2012). Mismas que son ampliamente utilizadas en el modelado y son biológicamente significativas al combinar precipitación y temperatura a lo largo del año y no solo usar los promedios anuales (Hijmans *et al.*, 2005). Además de que los escenarios de CC tienen disponible el conjunto de tales variables y estas están armonizadas en archivos individuales por escenario y en formato Geotiff (WorldClim, s.f.). En particular, las variables bioclimáticas se obtuvieron de WorldClim v2.1 (WorldClim, s.f.), que ofrece superficies climáticas interpoladas a alta resolución (desde 30 segundos) a partir de datos de estaciones meteorológicas y covariables satelitales (Fick & Hijmans, 2017).

Para proyectar la idoneidad climática de las especies en estudio bajo condiciones futuras se utilizaron los escenarios denominados SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*, o trayectorias socioeconómicas compartidas) del conjunto, *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*, CMIP6 (WorldClim, s.f.). Estos escenarios integran trayectorias de desarrollo socioeconómico con proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que permite evaluar impactos climáticos bajo diferentes contextos socioeconómicos globales y regionales (O'Neill *et al.*, 2016).

Los SSP son narrativas integradas que describen posibles futuros socioeconómicos globales hasta el año 2100; así, cada SSP contempla variables como crecimiento poblacional, urbanización, uso del suelo, tecnología, gobernanza y cooperación internacional. A partir de estas trayectorias, se derivan escenarios de emisiones que alimentan modelos climáticos globales. A diferencia de los antiguos RCP (*Representative Concentration Pathways*), que solo representaban concentraciones de gases en la atmósfera, los SSP vinculan explícitamente las emisiones con sus causas socioeconómicas (Riahi *et al.*, 2017). Por ejemplo: SSP3-7.0: implica rivalidad regional, baja cooperación internacional, alta presión sobre recursos y proyecta un forzamiento radiativo de 7.0 W/m² para 2100; por su parte, el escenario SSP5-8.5 implica crecimiento intensivo basado en combustibles fósiles (como sucede actualmente, es el rumbo actual) y proyecta un forzamiento de 8.5 W/m², siendo el escenario de mayores emisiones (más pesimista). En su desarrollo, los SSP se combinan con Modelos de Circulación General (GCM) y se proyectan a horizontes temporales de 20 años (2021–2040, hasta 2081–2100) para desarrollar los escenarios de CC (O'Neill *et al.*, 2016; Riahi *et al.*, 2017). Los escenarios futuros que se eligieron, debido a su desempeño adecuado dentro del área de estudio y su inclusión en el CMIP6, fueron los dos siguientes: (1) el GCM GFDL-ESM4 (Dunne *et al.*, 2020), que fue desarrollado por el *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), parte de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), Estados Unidos; se trata de un modelo acoplado atmósfera-océano (lo que implica que se simulan procesos oceánicos como parte integral del sistema climático) con representación detallada de procesos biogeoquímicos. Y (2) HadGEM3-GC31-LL (HadGEM3 GC3.1) y se refiere a

la versión de baja resolución horizontal (LL: *Low Resolution*, es decir, la configuración N96ORCA1), con acoplamiento completo atmósfera-océano, que fue desarrollado por el *Met Office Hadley Centre*, Reino Unido. Mismo que presenta alta sensibilidad climática, útil para evaluar extremos térmicos y contextos de precipitación abundante. En particular, tales escenarios fueron seleccionados por su capacidad para representar condiciones de alta vulnerabilidad climática en regiones de México y América tropical, caracterizadas por alta exposición a extremos climáticos, baja resiliencia institucional y dominancia de sistemas agrícolas sensibles al CC. Las proyecciones se realizaron para los periodos 2041–2060 y 2081–2100, bajo los escenarios SSP3-7.0 (GCM GFDL-ESM4) y SSP5-8.5 (GCM HadGEM3-GC3.1).

Los datos correspondientes a los escenarios de CC fueron descargados desde la sección CMIP6 (WorldClim, s.f.), mientras que el escenario actual se obtuvo desde la sección general. Los escenarios de Worldclim v2.1 ya están recortados a áreas de tierra firme, por lo que tal delimitación ya no es necesaria. Cada conjunto fue recortado en RStudio y empleado para generar proyecciones (desde *Kuenm*) de las variables bioclimáticas preseleccionadas a dos resoluciones espaciales: 2.5 minutos (~5 km) para toda el área M (América tropical) y 30 segundos (~1 km) para México. La diferenciación entre cada área de proyección (América tropical o México) buscó optimizar la carga computacional. Para lo cual, se verificó la equivalencia (consistencia espacial) entre ambas resoluciones mediante el coeficiente de correlación de Pearson desde RStudio y su inspección visual en QGIS.

Se realizó una preselección de variables basada en el coeficiente de correlación de Pearson (Figura 37) para evitar el sobreajuste de los modelos (Dormann *et al.*, 2013) al incluir variables que no son biológicamente importantes (Elith *et al.*, 2011) o que resultan redundantes en cuanto a la información que proporcionan. De igual modo, la mayoría de las variables excluidas representan artefactos matemáticos de las demás (Alkische *et al.*, 2017). Tales autores indican que las Bios (variables bioclimáticas) 8, 9, 18 y 19 caen en tal categoría. De cualquier modo, *Maxent* evita el sobreajuste de los modelos, puesto que puede manejar la colinealidad entre las covariables ambientales mediante la variación de los parámetros de regularización (Elith *et al.*, 2011).

Se usaron dos conjuntos de covariantes ambientales. El primer conjunto estuvo conformado de diez variables bioclimáticas y la capa de altitud, resultado de la preselección indicada anteriormente, mismas que se enuncian a continuación. Bio 2: Rango diurno medio. Bio 3: Isotermalidad. Bio 4: Estacionalidad de la temperatura. Bio 5: Temperatura máxima del mes más cálido. Bio 6: Temperatura mínima del mes más frío. Bio 7: Rango anual de la temperatura. Bio 13: Precipitación del mes más húmedo. Bio 14: Precipitación del mes más seco. Bio 15: Estacionalidad de la precipitación. Bio 18: Precipitación del trimestre más cálido. Bio 2: Rango diurno medio. El segundo conjunto de variables se seleccionó a partir de una primera aplicación de *Kuenm*; en particular, se incluyeron aquellas que, para el caso de *T. cacao*, presentaron una contribución superior al 10 % en el modelo óptimo: Bio 2, Bio 6, Bio 7, Bio 13, Bio 14 y altitud. Cabe destacar que, para trabajar con *Kuenm*, las variables utilizadas tanto en las fases iniciales como en las finales deben conservar el mismo nombre y significado, independientemente del escenario (actual o proyectado). Aunque cabe decir que la

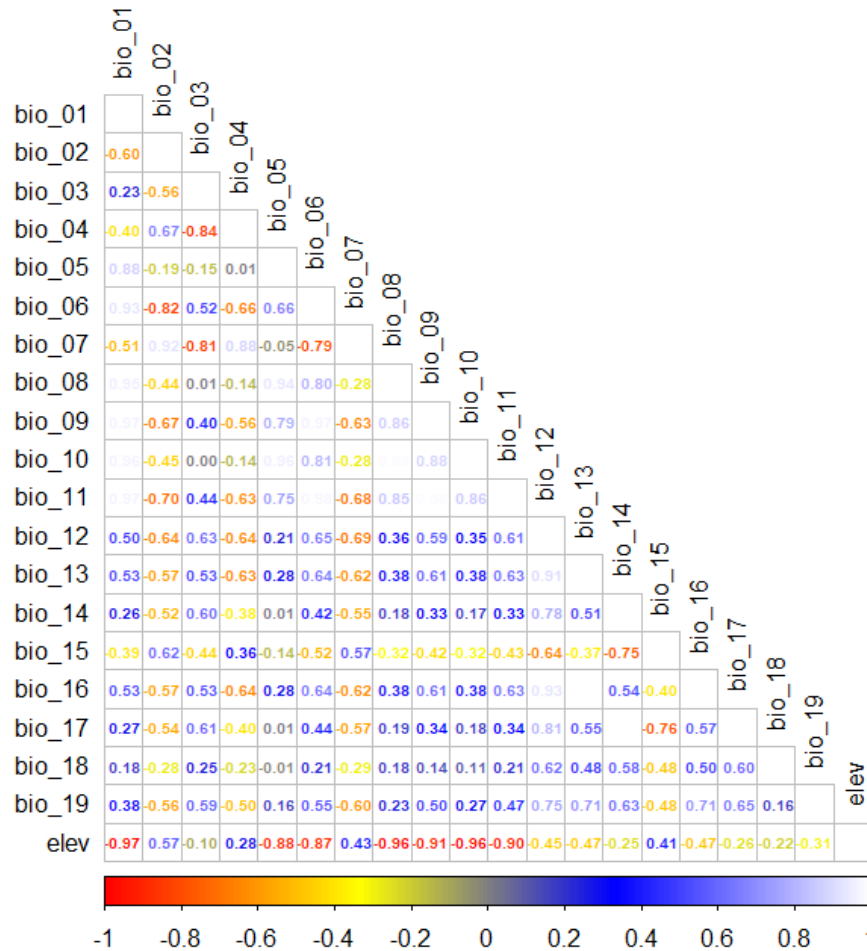


Figura 37. Correlación de los valores de 1000 puntos tomados al azar dentro del área M (América tropical) de las 19 variables bioclimáticas del escenario actual.

Fuente: elaboración propia en RStudio con datos de WorldClim v2.1 (s.f.).

extensión espacial sí se puede variar en la fase de transferencia del modelo a nuevas áreas o distintas a la zona de calibración, donde resulta fundamental evitar extrapolaciones excesivas que comprometan la validez ecológica del modelo.

En la Figura 38 se muestran los puntos de los cuales se tomaron los valores para la construcción del correlograma anterior; solo se tomó una muestra para aligerar el esfuerzo computacional, pero ello no implica perder representatividad en los resultados, dado que estos se distribuyeron de forma aleatoria sobre toda el área de estudio.

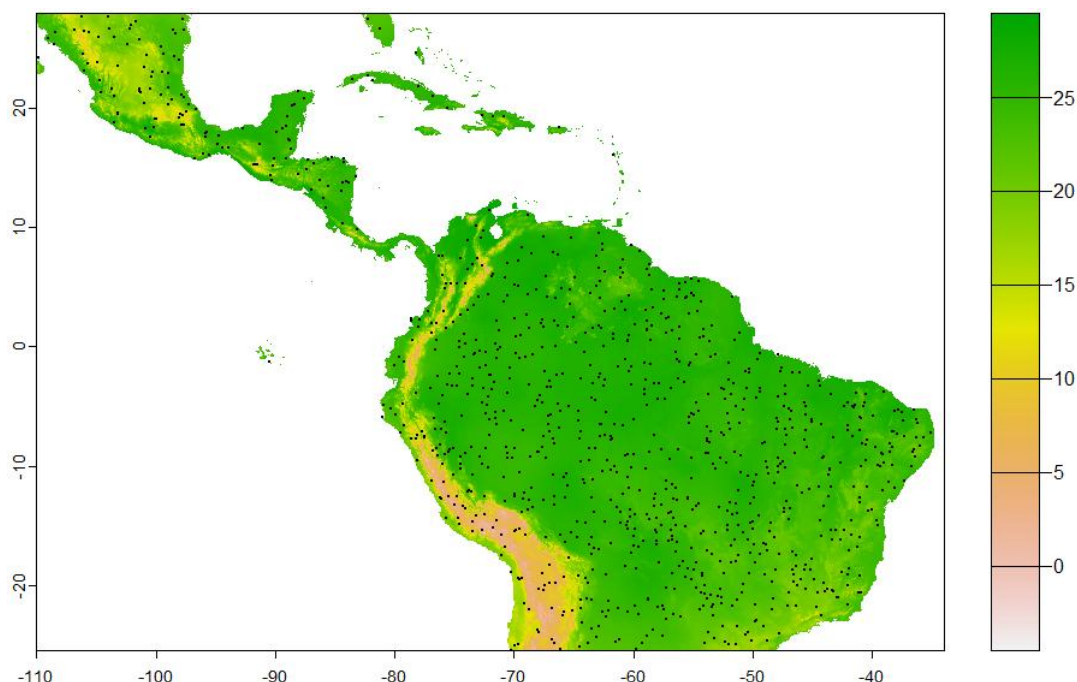


Figura 38. Ubicación de los 1000 puntos referidos anteriormente y la bio 1 (temperatura media anual).

Fuente: elaboración propia en RStudio con datos de WorldClim v2.1 (s.f.).

Modelado del nicho ecológico y de la distribución de las especies

Se consideró el Área M o el área accesible (M) del diagrama conceptual BAM (Biótico, Abiótico y Movimiento) de Soberón y Peterson (Soberón *et al.*, 2017; Soberón & Peterson, 2005) para limitar la idoneidad climática de las especies. Esta área representa el espacio geográfico que una especie ha podido colonizar históricamente y aquel que potencialmente podría alcanzar, dadas sus capacidades de dispersión y las barreras físicas o ecológicas que enfrenta. Al restringir los modelos de idoneidad climática al Área M, se evita la sobreestimación del nicho fundamental o potencial (ENM en sentido estricto), que es aquel que refleja tanto las condiciones abióticas favorables como las limitaciones de movimiento (Soberón *et al.*, 2017). El componente B (biótico), incluye las interacciones ecológicas con otras especies, como la competencia, la depredación o el mutualismo. La cuestión abiótica (componente A, *Abiotic*) es caracterizada precisamente por las variables bioclimáticas. Así, se definió un área M con base en el espacio de América que mejor correspondía con la distribución histórica y de los RG recabados de *M. roreri* y *T. cacao*. En particular, se delimitó un polígono rectangular que abarca desde los 110°O hasta los 34°O de

longitud y desde los 25.5°S hasta los 28°N de latitud (ver la Figura 33A) que abarca casi en su totalidad a los países de América tropical; no se consideró una delimitación adicional (por ejemplo, con base en aspectos ambientales como temperatura y precipitación), dado que entre las capas de entrada se incluyó a la de la altitud. Para el caso de *P. capsici*, se eligió un área más reducida y septentrional en las primeras fases del modelado, pero para la construcción final de su modelo espacial (transferencia espacial del modelo de nicho) se eligió la misma área M que para *M. royeri* y *T. cacao*. Las variables bioclimáticas se cortaron espacialmente con base en el área M desde RStudio, donde se gestionaron las capas ambientales para usarse como insumo en *Kuenm*: desde su preprocesamiento hasta su conversión en formato ASCII (extensión .asc).

Tanto los modelos de nicho ecológico (ENM) como los modelos de distribución de especies (SDM) se obtuvieron con Maxent Versión 3.4.3 (Phillips *et al.*, 2017) y con el paquete de R *Kuenm* Versión 1.1.5 (Cobos *et al.*, 2019) en RStudio (R Core Team, 2024). Las etapas de ENM consistieron en la creación y evaluación de modelos candidatos y la creación y evaluación final de los mejores modelos. Los modelos candidatos se crearon correlacionando las variables preseleccionadas con los RG y variando desde *Kuenm* las parametrizaciones de los modelos de Maxent (esto es, los parámetros de regularización y las *features*). La evaluación de los mejores modelos candidatos se basó en la significancia estadística con el área parcial bajo la curva característica operativa del receptor (ROC parcial) y un poder predictivo (rendimiento) con tasas de error de omisión al 5%. Esto es, los parámetros que trae preestablecido *Kuenm*. La complejidad se estimó con el Criterio de Información de Akaike corregido por la muestra, AICc (Cavanaugh, 1997). El criterio de ROC parcial indica si el modelo no es igual a uno dado por casualidad al presentar un p-valor no significativo (>0.05), esto es, que no es igual a un modelo aleatorio o nulo, derivado de la mera casualidad; en la medida en que la ROC parcial tienda a 0, habrá una mayor significación en el modelo; de hecho, esta estadística es más apropiada que el área bajo la curva completa (AUC) que comúnmente es utilizada para evaluar tal aspecto en el proceso ENM-SDM (Peterson *et al.*, 2008). Por otro lado, con el criterio de tasa de omisión, se

obtiene la incapacidad del modelo para predecir correctamente los RG de prueba con un error permisible durante la fase de entrenamiento (Anderson *et al.*, 2003); es decir, la predicción se hace con los RG de entrenamiento y la evaluación con los RG de prueba, mientras que los modelos se crean con el conjunto de ambos grupos de RG. Por su parte, el AIC original es una medida de compensación entre bondad de ajuste y complejidad de los modelos (Akaike, 1974), por lo que la delta AICc es una medida de la información relativa que se pierde tras variar el conjunto de los modelos (corregida por el tamaño de muestra), con lo que se obtienen modelos más parsimoniosos (menos complejos y con mayor poder predictivo); de tal forma que se prefiere a los modelos menos complejos y más informativos (Warren & Seifert, 2011).

Los mejores SDM se crearon con los RG de entrenamiento y prueba, así como con las parametrizaciones óptimas (elegidas en la fase previa, de entrenamiento y selección de mejores modelos) utilizando diez réplicas de arranque (*bootstrapping*) con salida logística (que va de 0 a 1) y se eligió la opción de no extrapolar (“not_ex”) para aminorar el riesgo de extrapolar áreas no idóneas para las especies en espacios ambientales distintos al que ocupan actualmente. La salida logística se interpretó como un nivel de idoneidad climática para las especies, que posteriormente fue reclasificada (ver siguiente subsección). Finalmente, los mejores modelos se evaluaron con los datos de evaluación final (que se trató de RG independientes a los usados en las fases previas) con los criterios de ROC parcial y tasas de omisión; este proceso también se ejecutó desde *Kuenm* (Cobos *et al.*, 2019).

Mapeo de la distribución potencial y cambios porcentuales

Los mapas de idoneidad original (la capa SDM) se reclasificaron para simplificar su interpretación. Se estableció un umbral de 0.3 de idoneidad climática para generar mapas binarios entre Áreas de Distribución Potencial (DP) y No Potencial (DNP) en cada escenario climático; en concreto, las áreas de DP correspondieron a aquellas con una idoneidad igual o superior a 0.3, y las áreas de DNP a aquellas donde se presentaban valores inferiores a dicho umbral. Aunque luego se tomaron dos umbrales para todas las especies por escenario (uno de 0.3 para México y otro de 0.2 para el resto de los países de América tropical) debido a discrepancias entre áreas que

quedaban fuera de la DP de *T. cacao* en Sudamérica cuando se tomaba el umbral de 0.3. Se integró una capa de países para resumir la información generada a nivel nacional en América tropical, que se obtuvo con los paquetes de RStudio “*rnaturalearth*” y “*rnaturalearthdata*” (Massicotte & South, 2023; South *et al.*, 2024). Para el caso de México, se integraron las capas nacionales de límites estatales y municipales (INEGI, 2016), junto con las capas estatales a nivel parcela (SAF con cacao) correspondientes a Tabasco (OEIDRUS, 2023) y Chiapas (Geoweb Chiapas, 2025), dado que estos estados son los mayores productores (por volumen y superficie) de cacao en el país y tienen publicada de forma libre y gratuita tal información.

Los umbrales se definieron con base en el análisis de los valores de idoneidad del escenario actual de los RG de cacao y de las parcelas de los SAF con cacao. Además, para validar el SDM (fase de evaluación final) de *T. cacao*, cuya evaluación se centró exclusivamente en México, se tomaron 30 puntos aleatorios dentro de las parcelas de SAF cacao de cada estado (Tabasco y Chiapas) mediante RStudio; tales RG se integraron con registros históricos fuera de esos estados, donde sustancialmente hay menos información. Ello se realizó con el fin de contrastar las presencias verificadas frente a las proyecciones y realizar una última evaluación del modelo creado con los RG de entrenamiento y los RG de prueba.

Con fines prácticos y para equiparar el análisis entre especies, ese mismo criterio (umbral de 0.2) se tomó para los mapas de *M. roreri* y *P. capsici* a nivel América tropical. Tales reclasificaciones facilitaron la identificación de zonas con alta probabilidad de permanencia o expansión del cultivo y los agentes causales de las enfermedades, así como la comparación en los escenarios futuros.

Para el análisis de los cambios porcentuales se tomaron las capas binarias (definidas con base en el umbral previamente indicado de 0.3 de idoneidad climática), sumando, mediante álgebra de mapas en RStudio, la idoneidad actual (0/1) y futura (0/10), lo que permitió identificar cuatro clases discretas: no idónea en ambos escenarios (0), pérdida de DP (1), ganancia futura de DP (10), y prevalencia de DP (11). Esta codificación facilita la interpretación espacial de los cambios proyectados y su integración en matrices comparativas o de contingencia.

Para destacar el consenso en la DP con CC se realizó lo siguiente: se reclasificaron los valores de las DP futuras de HADGEM (valor 10) como 1 y esta se mantuvo como 10 en GFDL, mientras que los demás valores se dejaron con su valor original de 0 (DNP); con la misma lógica que la clasificación anterior: la suma de ambas capas permitió identificar zonas de consenso (valor 11), así como aquellas donde solo uno de los modelos proyectó prevalencia (HADGEM como 1 o GFDL como 10) o donde no hubo DP en ambos escenarios (0). Esta estrategia facilitó el análisis posterior de los cambios porcentuales, referentes a los consensos de las proyecciones. Posteriormente, se poligonizaron los resultados anteriores usando la función *as.polygons* del paquete *terra* de RStudio y se filtraron los valores de interés. Finalmente, las capas anteriores se intersecaron con las de los estados y se calcularon las áreas de esos posibles cambios para su análisis posterior.

7.5. Resultados y discusión

7.5.1. Resultados generales del modelado del nicho ecológico

En la selección de los mejores modelos de las especies, en ningún caso el set de variables reducidas fue más importante que el set de diez variables bioclimáticas y la altitud. Como se resume en el Cuadro 7, los modelos seleccionados para cada especie mostraron un desempeño robusto, con significancia estadística consistente (pROC = 0), y tasas de omisión bajas al umbral del 5%, aunado a que, debido a que fueron elegidos de entre los demás cientos de modelos candidatos (por ser menos complejos), fueron los más parsimoniosos, pero igualmente significativos y con buen desempeño. Lo cual respaldó la calidad predictiva de los SDM derivados.

Cuadro 7. Resumen de los modelos de Maxent seleccionados

Espece	Modelo	Mean AUC ratio	pROC	Tasas de omisión al 5%	AICc	Número de parámetros del modelo
<i>Phytophthora capsici</i>	M_0.6_F_p	1.86	0	0	851.9	15
<i>Moniliophthora roreri</i>	M_0.2_F_q	1.57	0	0.045	4431.2	11
<i>Theobroma cacao</i>	M_0.85_F_ph	1.67	0	0.036	17153.3	137

pROC: ROC parcial.

En la fase de evaluación final todos los modelos tuvieron un pROC igual a cero y tasas de omisión menores al 5%, lo que mostró su buen desempeño, aún para datos independientes de los utilizados en las fases de calibración.

Las contribuciones de las variables bioclimáticas (Figura 39) permiten caracterizar y diferenciar el nicho ecológico de las especies. Para *M. roleri*, la contribución conjunta de las Bios 14 (precipitación del mes más seco), 13 (precipitación del mes más húmedo), 3 (isotermalidad) y 18 (precipitación del trimestre más cálido), que contribuyeron en un 71% en su modelo, subrayan la dependencia de ambientes cálido-húmedos con alta estabilidad térmica y suministro constante de agua para la especie; este patrón es consistente con su ciclo de vida, que requiere humedad persistente para la esporulación y la infección del fruto (Phillips-Mora & Wilkinson, 2007); condicionantes de baja estacionalidad climática que restringen a esta especie a regiones tropicales bajas. En *P. capsici*, el mayor peso de las Bio 7 (rango anual de temperatura) y 13 (precipitación del mes más húmedo), que contribuyeron en promedio en un 70 % a su modelo, sugieren una mayor tolerancia a la variación térmica y dependencia de periodos de alta humedad, lo cual ayuda a explicar, de manera respectiva, su presencia más allá de las zonas estrictamente tropicales y que sus epidemias se den mayormente durante la temporada de lluvias (Torres-de la Cruz *et al.*, 2023).

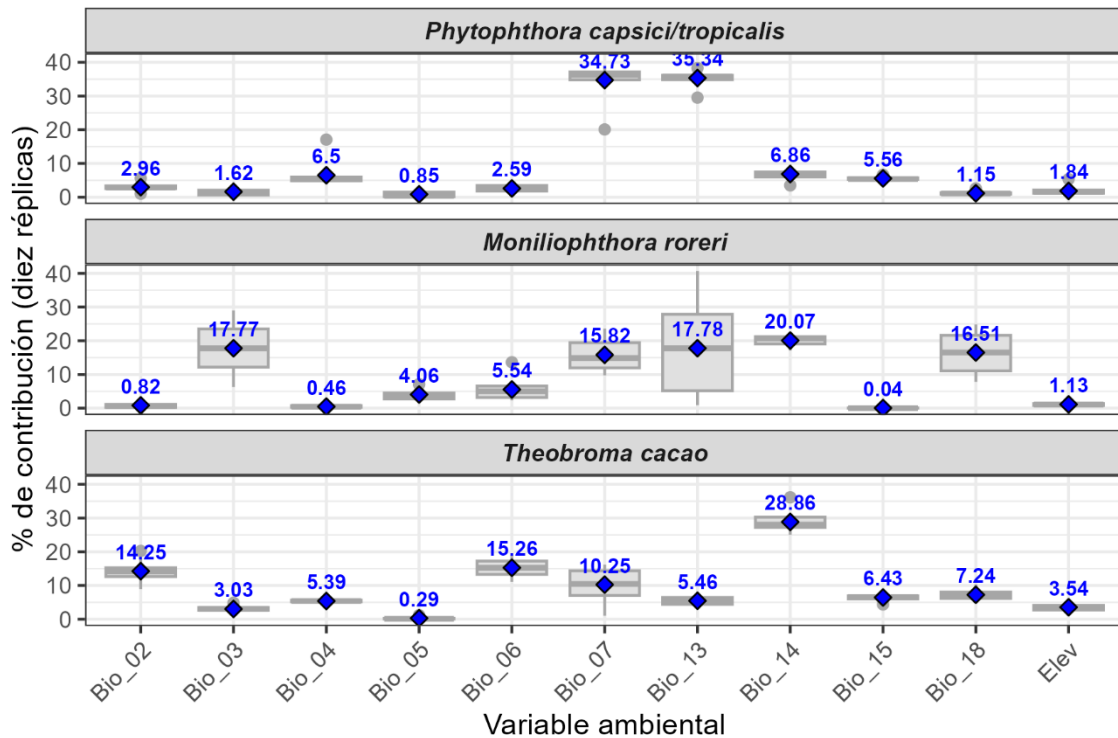


Figura 39. Contribución de las variables bioclimáticas a los modelos de Maxent de cada especie.

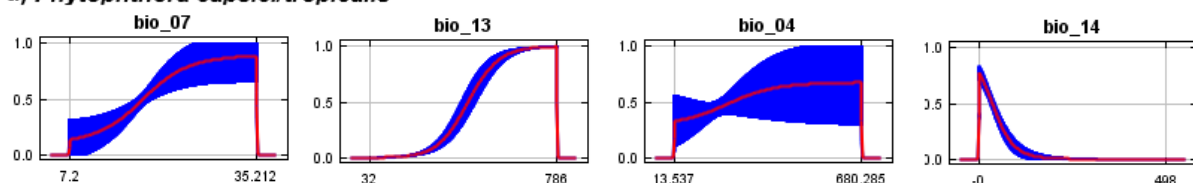
Bio 2: Rango diurno medio. Bio 3: Isotermalidad. Bio 4: Estacionalidad de la temperatura. Bio 5: Temperatura máxima del mes más cálido. Bio 6: Temperatura mínima del mes más frío. Bio 7: Rango anual de la temperatura. Bio 13: Precipitación del mes más húmedo. Bio 14: Precipitación del mes más seco. Bio 15: Estacionalidad de la precipitación. Bio 18: Precipitación del trimestre más cálido. Elev: altitud sobre el nivel del mar.

Por su parte, con *T. cacao* se mostró alta contribución de las Bios 14, 6 (temperatura mínima del mes más frío), 2 (rango diurno medio) y 7, que en conjunto contribuyeron, en promedio, en poco menos del 70% a su modelo. Esto refleja su preferencia por climas sin déficits hídricos marcados y con baja estacionalidad térmica; y en particular, las Bio 2 y 7 indican, de manera respectiva, que esta especie prefiere áreas con poca diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria (baja amplitud diurna) y entre el mes más frío y el más cálido (baja estacionalidad térmica). Lo que corresponde muy bien con los requerimientos climáticos citados previamente y con sus zonas de cultivo actuales.

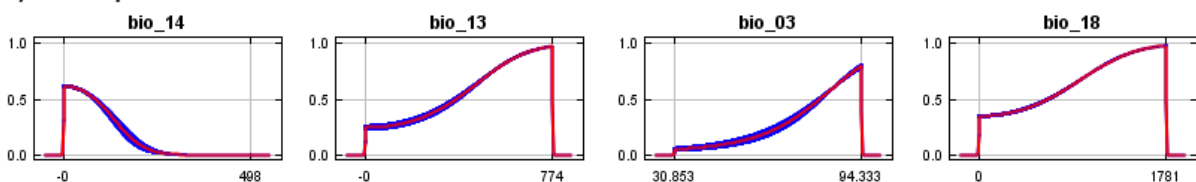
Las diferencias en las contribuciones anteriores reflejan la especialización ecológica de cada una de estas especies y su interacción con gradientes climáticos; lo que puede

complementarse con la Figura 40, que muestra las curvas de respuesta marginal de cada variable. Esto es, la probabilidad de presencia predicha para cada especie en función de cada variable sin considerar la influencia de las otras variables en el modelo de Maxent. Mismas que fueron ordenadas de mayor a menor según su contribución relativa al modelo.

a) *Phytophthora capsici/tropicalis*



b) *Moniliophthora roreri*



c) *Theobroma cacao*

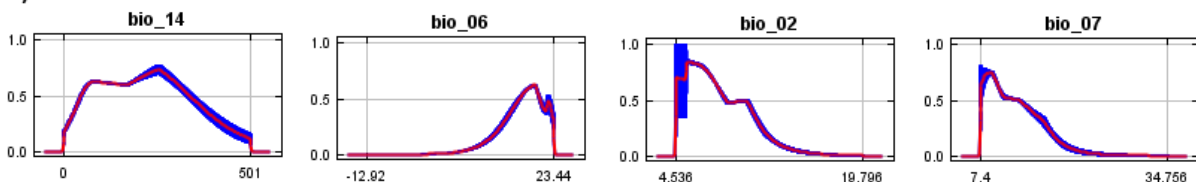


Figura 40. Curvas de respuesta marginal de las cuatro variables bioclimáticas con mayor contribución en los modelos de *Maxent* de cada especie estudiada.

En la Figura 41 se presentan los histogramas y valores relativos acumulados de la idoneidad climática en el escenario actual de los RG (antes de su “adelgazamiento”) para *T. cacao*. Debido a que se acumuló un gran número de estos RG, se tomó como óptimos y adecuados los umbrales de 0.2 o 0.3, que además abarcaron a las parcelas con SAF cacao en Tabasco y Chiapas, aunado a que 0.3 es un valor comúnmente utilizado en estudios de ENM-SDM (Santos-Hernández *et al.*, 2021).

Análisis ecológico. En general los 27 conglomerados del INFyS (ver Apéndice 9 y Apéndice 10) correspondieron a RG de selvas o acahuales, y en menor medida a SAF. En particular, los SAF se presentaron en conglomerados pertenecientes a la región Norte de Chiapas y a los municipios Juárez, Tumbalá y Salto de Agua. Para llegar a

esa clasificación se tomó como criterio que hubieran más de 20 registros de *T. cacao* a nivel de sitio y que se presentaran en asociación con *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth u otros árboles leguminosos, los cuales comúnmente son asociados a estos sistemas. Estos en general dichos SAF corresponderían a sistemas rústicos o en restos de selva, según la clasificación del capítulo anterior (homogeneizada con la clasificación usada para SAF de café).

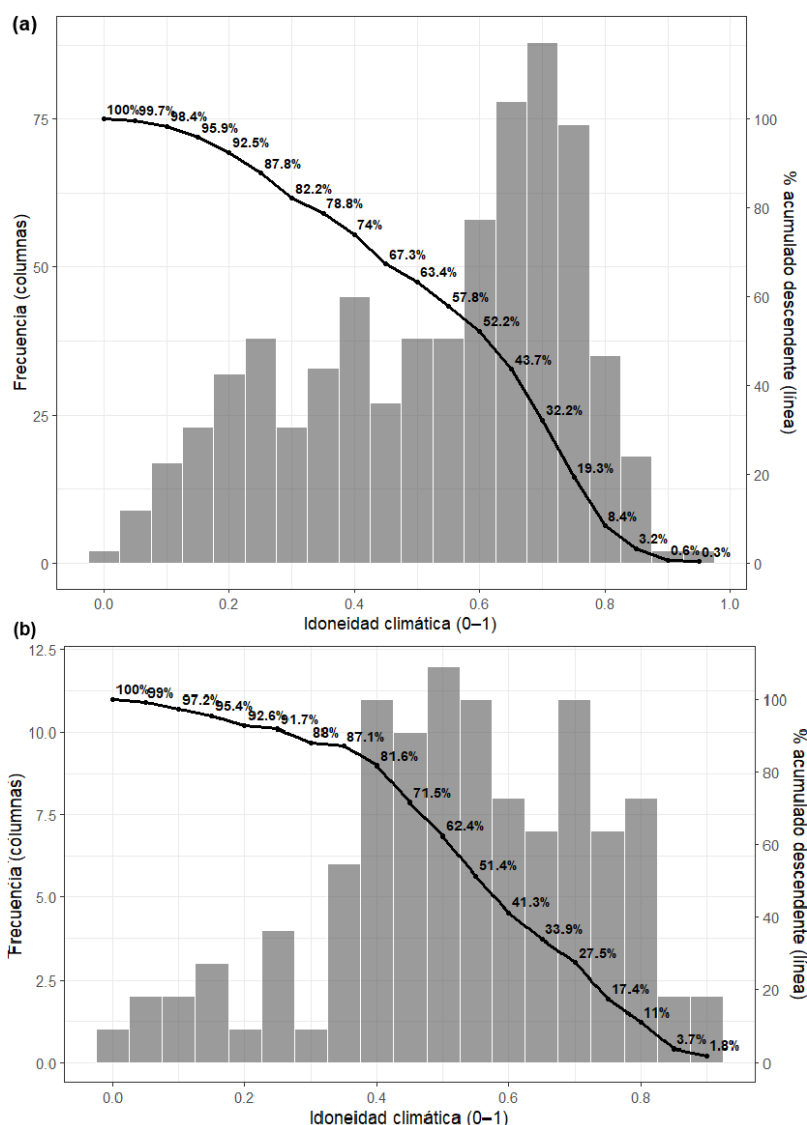


Figura 41. Histograma y valores relativos acumulados de la idoneidad climática en el escenario actual de los registros geográficos de *Theobroma cacao* usados en la modelación.

(a) Nivel América tropical (rectángulo desde 110° hasta 34° longitud oeste y desde 25.5 latitud sur hasta los 28° latitud norte). (b) Nivel país (rectángulo desde 110° hasta 86° longitud oeste y desde 13.85° hasta 28° longitud norte).

7.5.2. Análisis de la distribución potencial

En la Figura 42 se muestra la idoneidad y los RG de *T. cacao*, mismos que justifican la clasificación al umbral de 0.2 (y no 0.3 para esta región, que se consideró como adecuado para México). Los valores entre 0.2 y 0.3 podrían representar una clase marginal de DP o identificar grupos genéticos tolerantes a condiciones bioclimáticas marginales. Bajo este umbral menos estricto quedaron incluidos dentro del área de DP, áreas de cultivo de Bolivia, así como áreas de tierras bajas (>200 msnm) del Amazonas y prácticamente todo el Caribe (excepto una porción de República Dominicana).

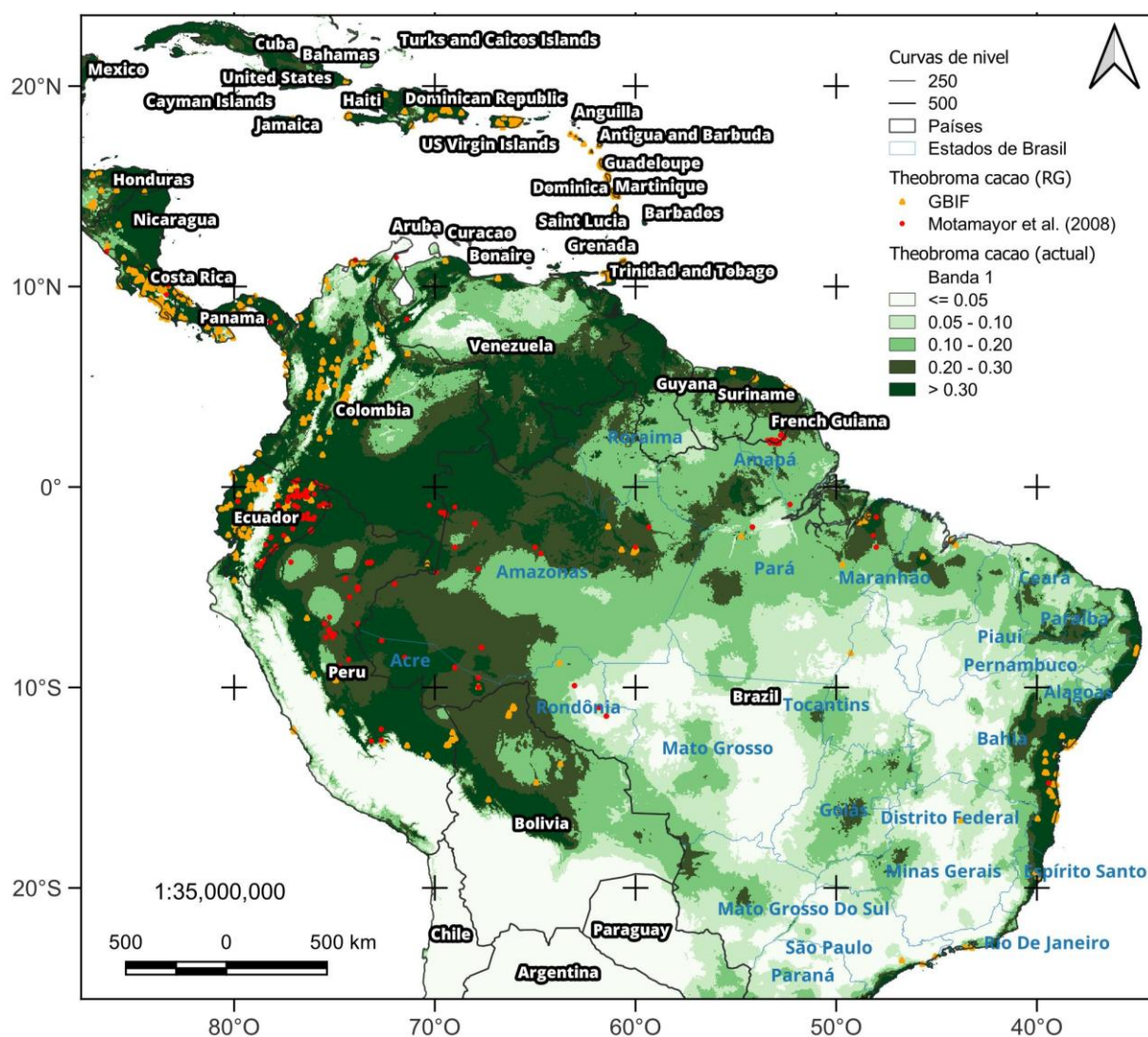


Figura 42. Idoneidad climática actual en valores discretos para Centro y Sudamérica.

En la Figura 43 se muestra la DP conjunta en el escenario actual de las tres especies en estudio. Esta representación permite identificar áreas con condiciones climáticas favorables para cada una de las especies y su conjunto; nótese que las regiones cacaoteras actuales presentan, en general, la coexistencia de las tres especies. Aunque una pequeña porción de la región costera de Pantanos, Tabasco, no presenta DP para *P. capsici*. También puede apreciarse que *P. capsici* tiene una DP menos afín a las áreas tropicales, pues incluso se presenta en el centro de México. Mientras que las DP de *T. cacao* y *M. roreri* sí se presentan en regiones bien conocidas de clima cálido húmedo, lo que indica buen apego a la realidad de los SDM y que el umbral definido para la clasificación binaria fue razonable.

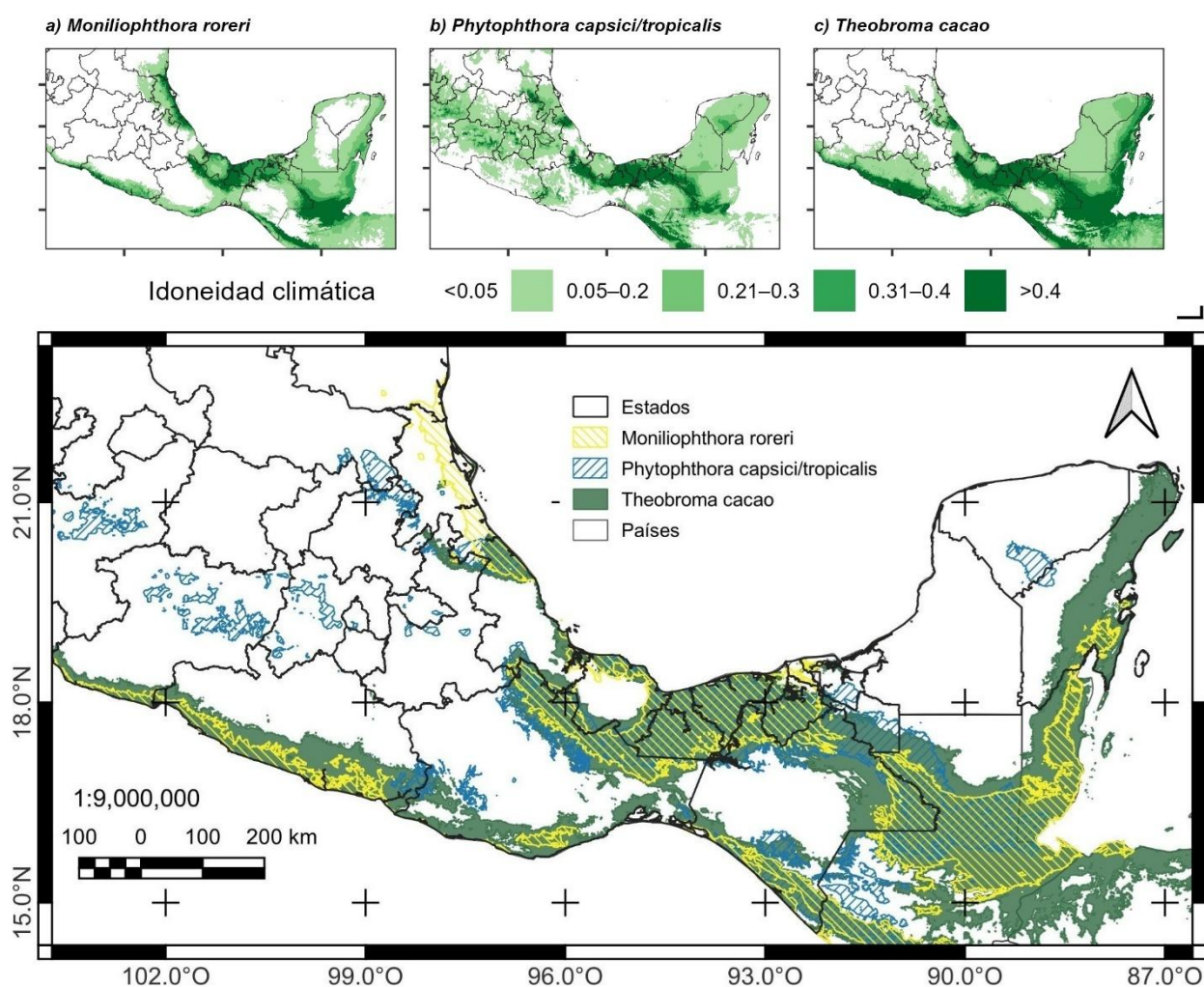


Figura 43. Modelos de distribución de las tres especies estudiadas y mapa conjunto de su distribución potencial en México (idoneidad climática > 0.3).

Los porcentajes de DP para *T. cacao* a nivel país son los que se presentan en el Cuadro 8. Lo cual, en suma, representaría un aproximado del 12.2% del territorio continental nacional. Cifra que es enorme, comparada con la superficie cultivada actualmente. Sin embargo, sería necesario agregar variables edáficas (zonificación edafoclimática) y considerar variabilidad genética de los RG para precisar mejor estos datos, como se detallará más adelante. Se encontró que al mediano plazo estas cifras apenas variarían (ganancias netas de 0.5% HADGEM y pérdida netas de 1% por GFDL), pero a largo plazo se indicaron reducciones mayores: -5.4% por HADGEM y -2.6% por GFDL a nivel nacional.

Cuadro 8. Extensión de la distribución potencial actual para entidades federativas de México.

Entidad	Extensión de la entidad (km ²)	DP actual (km ²)	% de DP
Campeche	57 507	2 591.5	4.5
Chiapas	73 311	44 627.6	60.9
Colima	5 627	1 454.1	25.8
Guerrero	63 596	29 665.3	46.6
Hidalgo	20 813	212.2	1.0
Michoacán de Ocampo	58 599	6 361.6	10.9
Oaxaca	93 757	48 259.8	51.5
Puebla	34 306	2 695.6	7.9
Quinta Roo	44 705	34 068.6	76.2
San Luis Potosí	61 137	4.0	*
Tabasco	24 738	22 355.8	90.4
Veracruz de Ignacio de la Llave	71 824	33 709.4	46.9
Yucatán	39 524	11 307.5	28.6
Total actual	1.973 millones	~238 000	~12.2

DP: distribución potencial (idoneidad climática >0.2).

La Figura 44 muestran la idoneidad climática para *T. cacao* en Tabasco y Chiapas bajo dos escenarios: el actual y el más pesimista (2081–2100, modelo HadGEM3-GC31-LL SSP5-8.5 2081-2100). Por cuestiones prácticas, para referir uno u otro escenario, de aquí en adelante solo se hará referencia a HADGEM o GFDL y se indicará si se trata de una proyección al mediano (2041-2060) o largo plazo u horizonte (2081-2100). En

el escenario actual se proyectó alta idoneidad climática general para *T. cacao*, que abarca la mayor parte de Tabasco, así como las subregiones Norte, Selva y Soconusco de Chiapas. Pero igualmente se incluyó con DP a áreas con existencia histórica de *T. cacao*, pero sin cultivo de forma extensiva (como Veracruz, Nayarit, Quintana Roo y Yucatán) y áreas de costa de Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Las parcelas actuales en Tabasco y Chiapas se ubican en áreas con buena idoneidad, especialmente en las zonas bajas y húmedas de ambas entidades. Las curvas de nivel muestran que las zonas más aptas se concentran en altitudes menores, lo cual coincide con las condiciones óptimas del cultivo (Suárez-Venero *et al.*, 2021). En tanto que para el escenario pesimista se proyectó una reducción significativa en las áreas con alta idoneidad climática, al punto que varias parcelas actuales quedaron fuera de las zonas óptimas, lo que sugiere que podrían enfrentar condiciones menos favorables para el cultivo en 2081-2100, de continuar las tendencias socioeconómicas actuales a nivel mundial. No obstante, esos impactos no se reflejarían en el horizonte medio (2061-2100), como puede verse en la Figura 45. Las zonas montañosas y de mayor altitud que presentarían mejor idoneidad rondan los 450-600 msnm (Figura 44), lo que implicaría y haría necesario el desplazamiento del cultivo hacia zonas más frescas y de mayor altitud, pese a que algunas de esas regiones actualmente presentan aptitud edafoclimática marginal para el cultivo (de Sousa *et al.*, 2019; Quiroz-Antúnez *et al.*, 2022) .

De forma contrastante, el escenario GFDL no proyectó impactos sustanciales en las áreas cacaoteras en el horizonte medio, pero sí en el horizonte lejano (véanse la Figura 45 y la Figura 47), sobre todo en la franja costera de la Chontalpa; pero en ambos horizontes hubo pérdidas de DP en altitudes bajas de Tabasco y Veracruz. Un análisis análogo aplica para las áreas de Sudamérica, pero con pérdidas mucho mayores, sobre todo en áreas colindantes de Brasil con Perú. Si bien a ambas escalas se proyectaron ganancias de DP en el futuro, tanto para México como para Brasil, estas son reducidas en comparación con las pérdidas proyectadas.

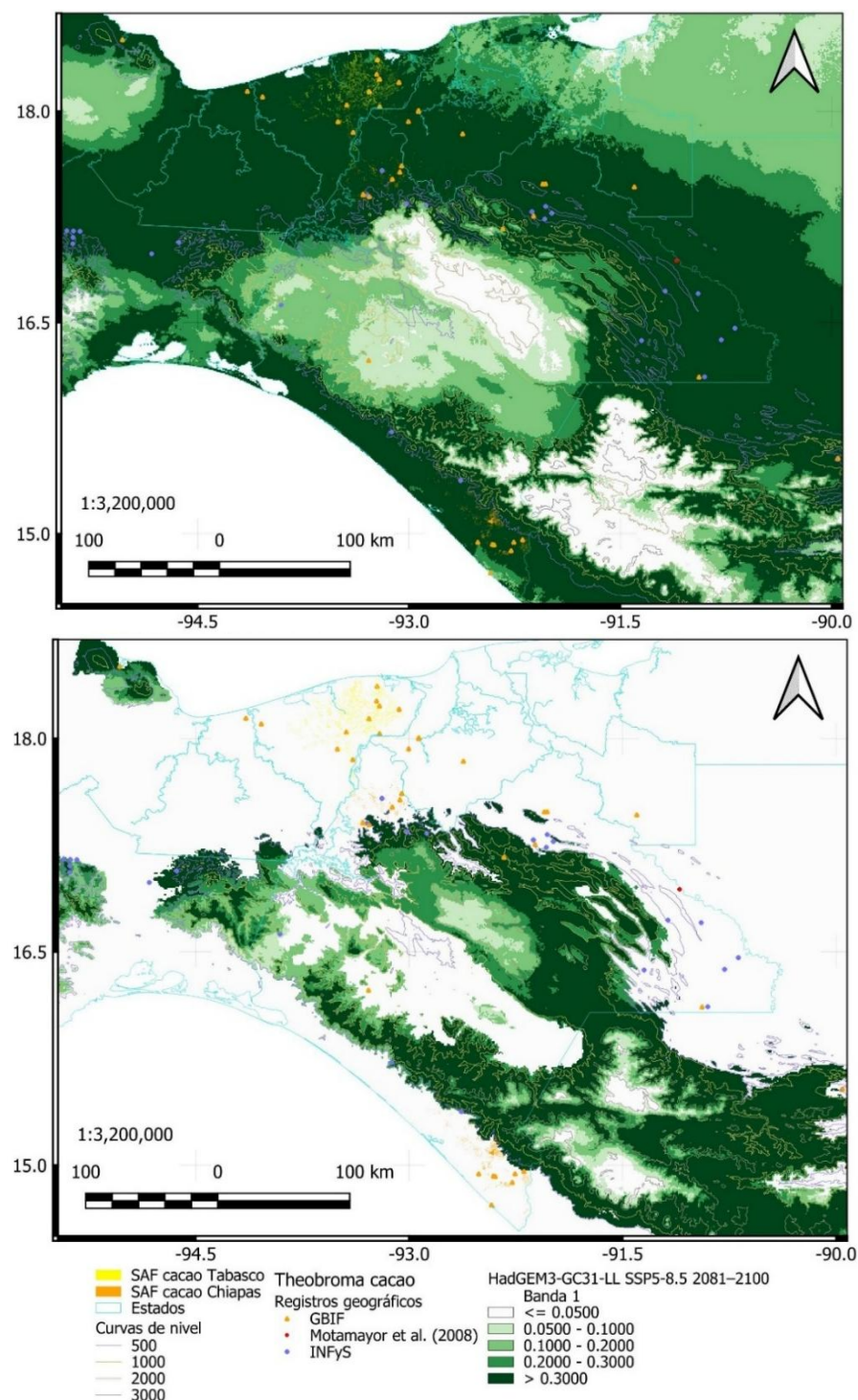


Figura 44. Mapa de la idoneidad climática en dos escenarios (primer imagen: escenario actual, segunda imagen: el más pesimista) de *Theobroma cacao* en Tabasco y Chiapas.

Nota: se muestran las parcelas actuales y las curvas de nivel. Fuente: elaboración propia en QGIS con datos de Massicotte & South (2023), South *et al.* (2024), INEGI (2016), OEIDRUS (2023) y Geoweb Chiapas (2025).

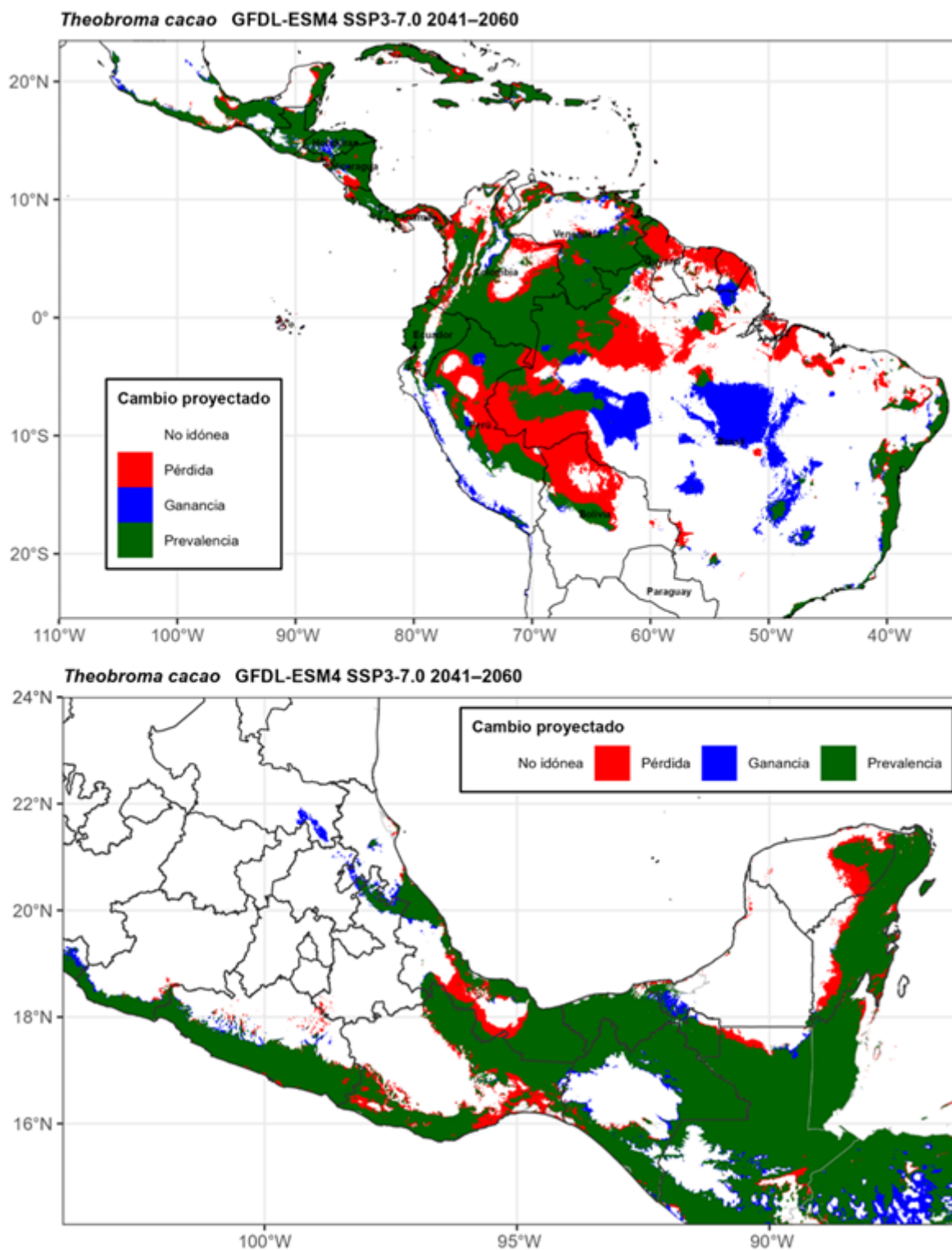


Figura 45. Cambios proyectados en la distribución potencial de *Theobroma cacao* con el escenario GFDL-ESM 4.1 SSP3-7.0 2041-2060.

Aun así, una buena cantidad de áreas se mantendría (prevalencia) con DP, incluidos los países productores de la cuenca alta del Amazonas (ej. Ecuador, Perú, Colombia), toda la vertiente occidental andina y el Orinoco (sur de Venezuela), siguiendo una línea o corredor altitudinal bien marcado a lo largo de las cordilleras sudamericanas (como la Central en Colombia), que marcan un alto abrupto en la DP y funcionan a manera de barrera natural. De forma contrastante, el escenario HADGEM proyectó más pérdidas a nivel Centro y Sudamérica, sobre todo en el sur de Colombia, Costa Rica y Nicaragua; en tanto que en Brasil y Bolivia también habría reducciones significativas. Mientras que en Ecuador la DP casi se mantendría igual. En la Figura 46b, a nivel México, se nota que la ganancia de DP sería hacia mayores altitudes y la pérdida se daría sobre todo en las regiones costeras, como ya se había dicho.

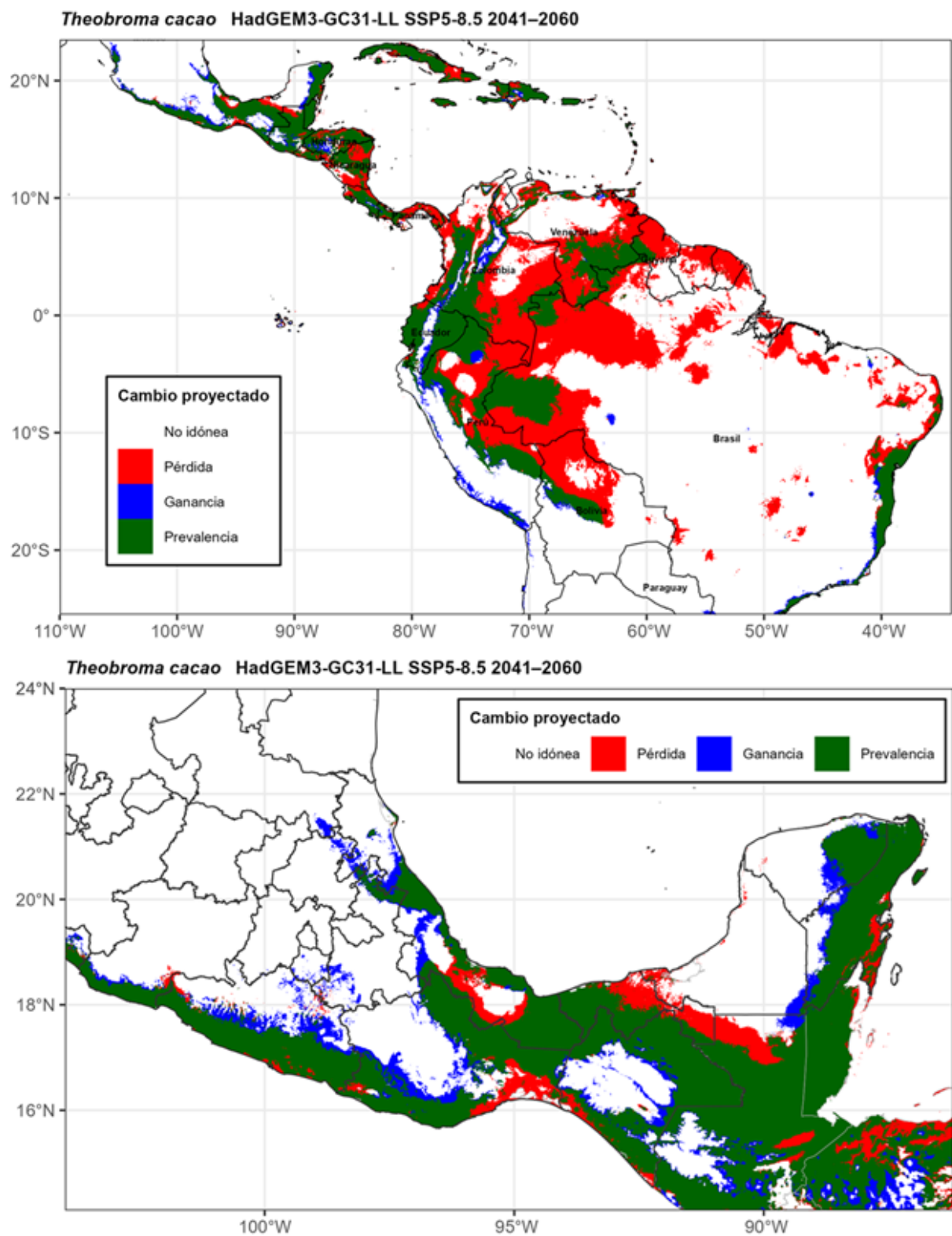


Figura 46. Cambios proyectados en la distribución potencial de *Theobroma cacao* con el escenario HADGEM-CG31-LL SSP5-8.5 2041-2060.

Nótese que Veracruz, Yucatán y Quintana Roo presentan bastante DP en el escenario actual, y se proyectan ganancias a mayores altitudes por el escenario HADGEM y pérdidas sustanciales por GFDL, aunque mayor prevalencia de DP.

Hubo buen consenso en la prevalencia de la DP futura para *T. cacao* en México en el horizonte medio (Figura 47a), pero eso cambia drásticamente cuando se compara con el horizonte lejano (Figura 47b), donde hay más discrepancia (y menos área consensada de prevalencia de DP).

Para evitar poner todos y cada uno de los mapas de las demás especies, solo se incluirán los mapas de consenso, que indican las áreas de DP donde se proyectó que las especies pueden existir (prevalencia o ganancia de DP), aún con CC, por uno o ambos escenarios. Lo que proporciona información complementaria, integrada y consensuada de las proyecciones.

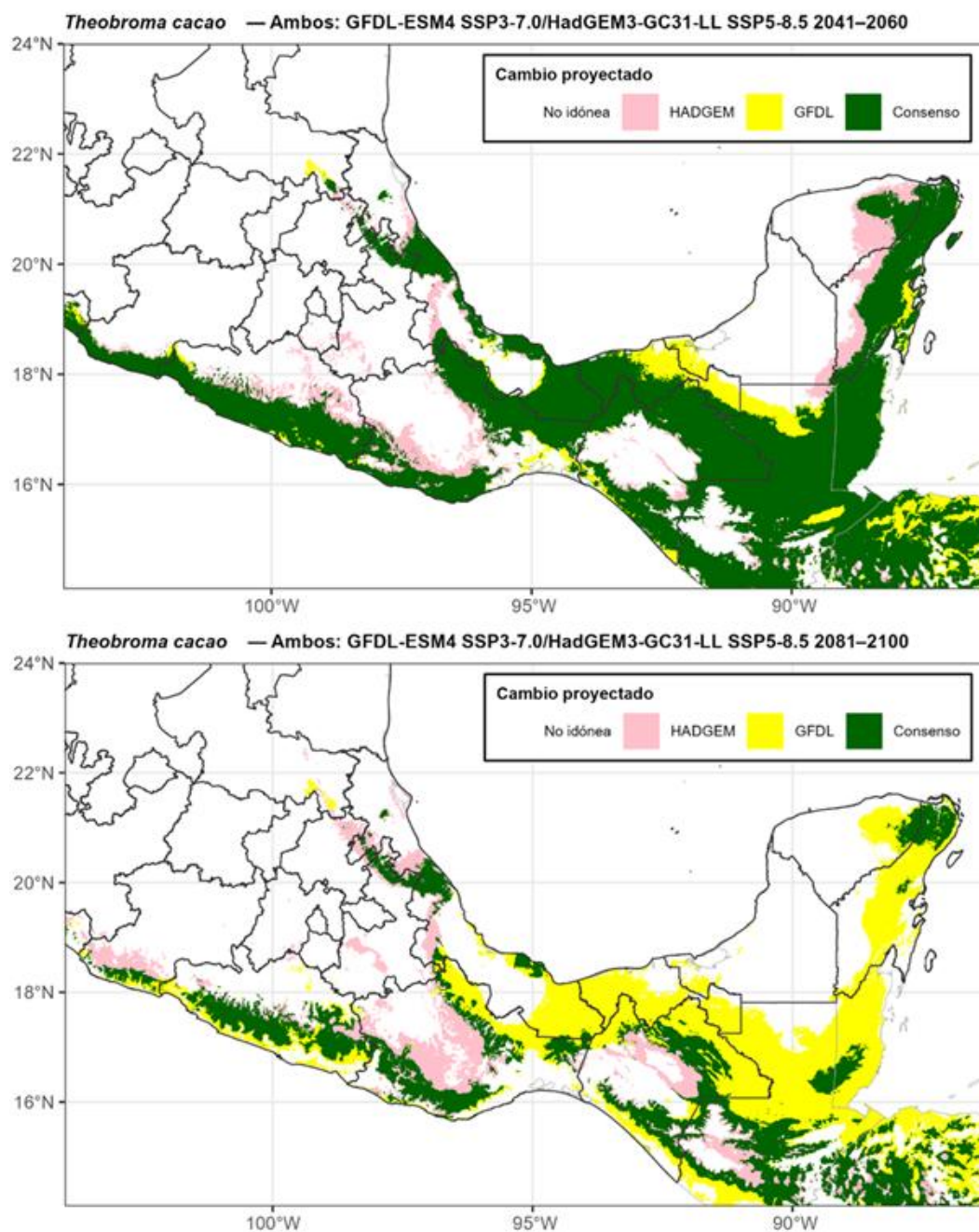


Figura 47. Consensos de los dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de *Theobroma cacao* en México a (A) mediano y (B) largo plazo.

A nivel América Latina, resultados similares fueron los que reportaron Ortega Andrade *et al.* (2017), quienes indicaron reducciones más amplias en escenarios de horizonte largo; y que además señalaron que la Amazonía brasileña es la zona de Sudamérica con extensiones más importantes de *T. cacao*, por lo que deberían de fomentarse y

monitorearse adecuadamente esas plantaciones. Quienes además, analizaron a *M. royeri* e indicaron que ambos organismos compartirían áreas de distribución en el corto y mediano plazos, pero que en el largo plazo estos diferenciarían su distribución; lo que plantearía un escenario de manejo agronómico más sencillo, pero que igualmente deberían de reubicarse ciertos SAF (resultados análogos a este estudio, pues también usaron el GCM HADGEM, pero con diferentes escenarios, de emisión de GEI); de igual modo, señalaron el riesgo de introducción de *M. royeri* a Brasil, similarmente que Bucker Moraes *et al.* (2012) y Másmela-Mendoza (2019), con todos los riesgos que ello representa (pues en Bahía se ubican las extensiones más amplias de cacao de América). Ortega-Andrade *et al.* (2017) también propusieron, como medida de prevención, un cordón de monitoreo constante para permitir alertas tempranas y el control de los brotes incipientes. Pese a ello, y como se dijo antes, la moniliasis recientemente ha llegado a Brasil (MAPA, 2025), con lo que se ha evidenciado la confiabilidad de los modelos. Pero aún más relevante, se evidencia la necesidad de tomar las medidas fitosanitarias y cuarentenarias necesarias, no solo para esta especie fitopatógena, sino también para las que tienen potencial de expansión desde una escala nacional, así como inter y transcontinental.

Precisamente, en la Figura 48 se nota que *M. royeri* tiene una DP muy equiparable con *T. cacao* en el escenario actual y en el mediano plazo (donde además, hay buen nivel de consenso en la DP por ambos escenarios de CC). Cabe señalar que las costas de Oaxaca y algunas plantaciones del norte de la Selva Lacandona no presentan DP considerables para la proliferación de este fitopatógeno. De igual modo, *M. royeri* también encontraría condiciones bioclimáticas idóneas a mayores altitudes, similarmente que *T. cacao*, por lo que es muy probable que para 2041-2060, aún se tenga que seguir lidiando con el hongo, pues este migraría con el cultivo. A largo plazo, la proyección por HADGEM fue más pesimista, pues restringió la DP del hongo a partes altas y muy puntuales de las zonas productoras actuales (incluidos Guerrero y Oaxaca), partes costeras de Veracruz (a la altura de las huastecas veracruzana y potosina), los Tuxtlas, Veracruz y en el Soconusco en una franja elevada, en tanto que la mayor pérdida de DP se daría en la Chontalpa y Chiapas en un polígono continuo

con Guatemala. Tales proyecciones fueron muy distintas a las de GFDL, que indicó una DP más generalizada y similar a la del escenario actual, así como expansiones más drásticas a mayores altitudes (en las Huastecas, el Papaloapan, norte de Chiapas y este de Tabasco); solo las subregiones tabasqueñas de Sierra y Los Ríos, donde hay comparativamente pocas parcelas con cacao, el hongo perdería DP. En tanto que, del lado del pacífico este escenario proyectó reducciones para *M. roreri* en las costas de Guerrero y Michoacán, así como prevalencia y pérdidas mínimas en Oaxaca y Soconusco; en particular, aún con este escenario menos pesimista en Soconusco habría impactos significativos: *M. roreri* quedaría sin DP en al menos la mitad de parcelas ubicadas en las zona de llanura aluvial (en cotas < 50 a 300 msnm); lo que se traduciría en un manejo facilitado por el clima, de no ser porque *T. cacao* también perdería DP en este horizonte (2081-2100), si bien en el mediano plazo mantendría su DP en esta franja (Quiroz-Antúnez *et al.*, 2022).

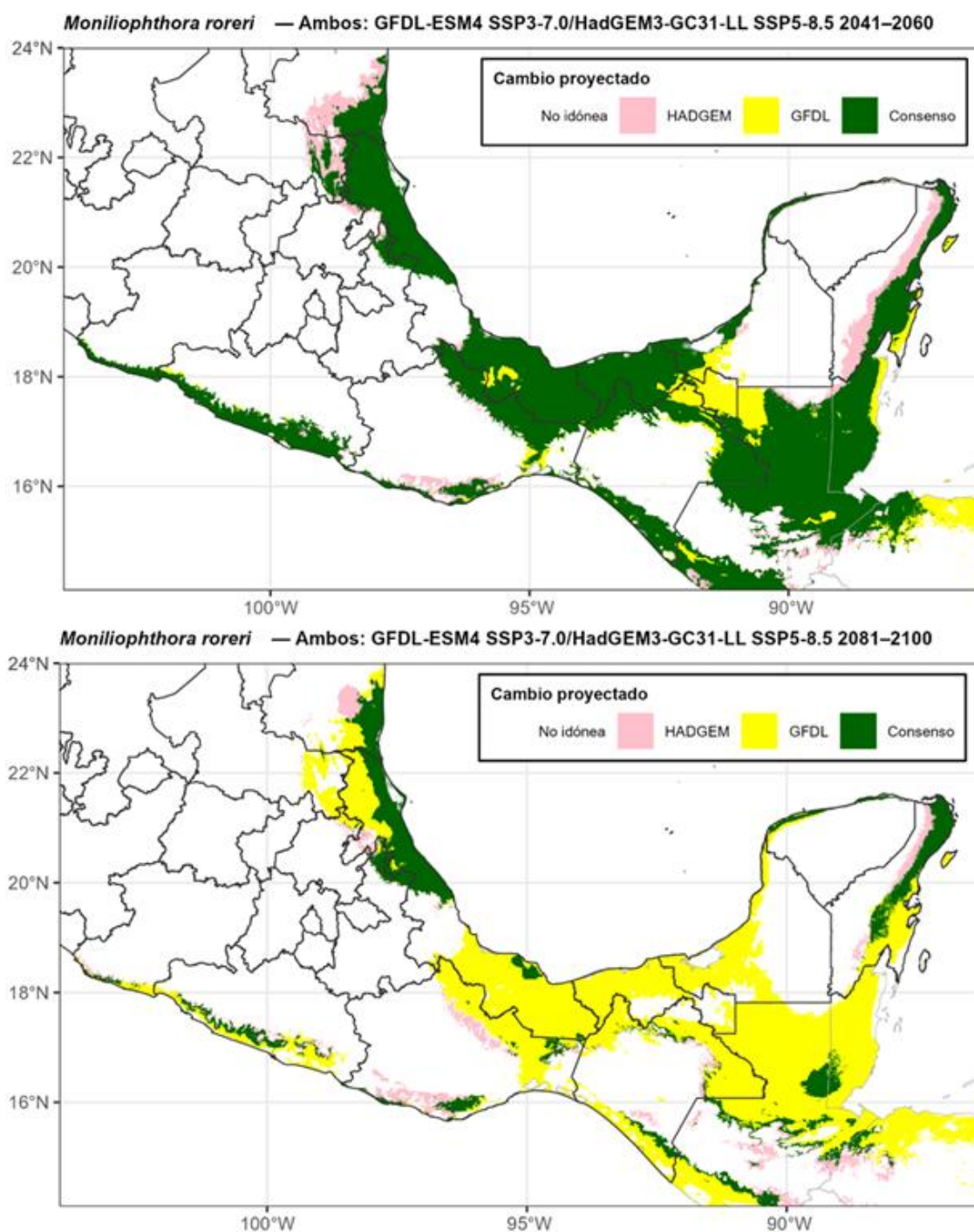


Figura 48. Consensos de dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de *Moniliophthora roreri* en México a mediano (A) y largo plazo (B). Por su parte, los consensos en los cambios proyectados para *P. capsici* (Figura 48), tanto en el horizonte medio como el horizonte largo serían similares a los correspondientes a *M. roreri*, aunque con ciertos matices: su DP se ubicaría, sobre

todo, en áreas de las Huastecas veracruzanas y potosinas, así como partes altas y bien localizadas de los Tuxtlas en Veracruz, Oaxaca, Guerrero y Chiapas.

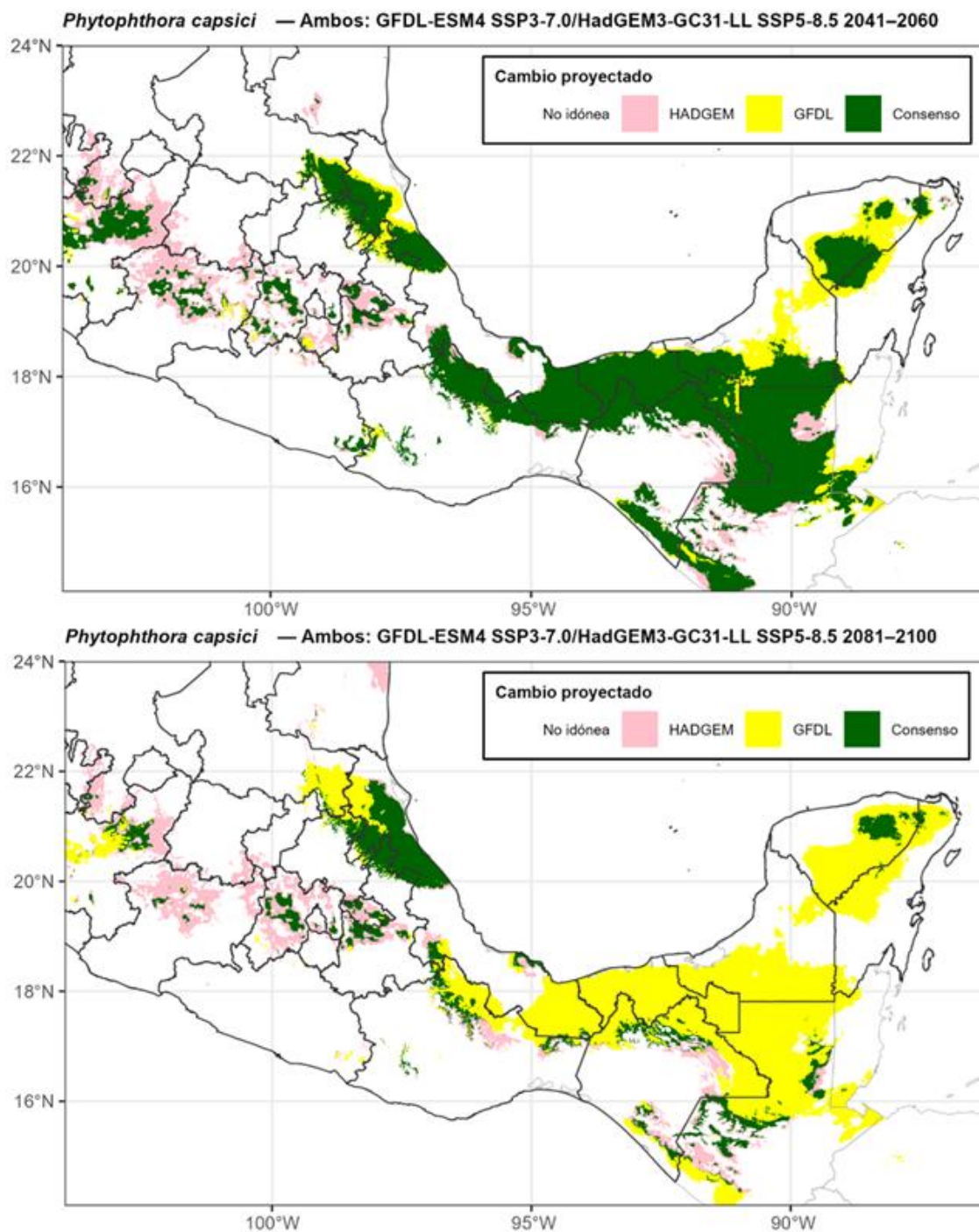


Figura 49. Consensos de dos escenarios de cambio climático sobre la distribución potencial futura de *Phytophthora capsici/tropicalis* para México a mediano (A) y largo plazo (B).

Sin embargo, tales migraciones potenciales hacia regiones de mayor idoneidad climática también podrían implicar la presión sobre ecosistemas altamente vulnerables, como los remanentes de selvas altas o bosques mesófilos de montaña (BMM). Estos últimos, reconocidos por su alta biodiversidad y endemismo, han mostrado ya tendencias de migración altitudinal (Ramírez-Barahona *et al.*, 2025) en respuesta al CC, incluso dentro de áreas naturales protegidas. Además, tales ecosistemas son objeto de introgresión (deforestación y degradación) constante por agricultura o asentamientos humanos. La expansión de la DP de *T. cacao* a mayor altitud o latitud podría superponerse con estos relictos, lo que generaría conflictos entre la aptitud para este y otros cultivos que tendrían que emigrar (incluyendo los SAF de café) y los objetivos de conservación nacionales. Por tanto, resulta pertinente considerar estrategias de integración que reconozcan tanto la idoneidad para el cultivo (y formas de obtener rendimientos óptimos sin la necesidad de extender el área cultivada a costa de tales relictos) y la resiliencia ecológica de las selvas y los BMM.

Independientemente de las discrepancias, es un hecho que los SDM apuntan y consensan un desplazamiento de las condiciones idóneas para *T. cacao* y *M. roreri* a mayores altitudes. Al respecto de lo anterior, *M. roreri*, ha superado históricamente barreras ecológicas y físicas durante su expansión neotropical: de donde pasó de un confinamiento inicial en el noroeste de Sudamérica, de donde era nativa y estaba asociada a poblaciones silvestres de los géneros *Theobroma* y *Herrania*, a una invasión panamericana (Díaz-Valderrama *et al.*, 2020; Phillips-Mora & Wilkinson, 2007). Las cordilleras andinas, como la Cordillera Occidental y Central, han actuado como barreras físicas principales, que limitaron temporalmente su dispersión natural por viento debido a los gradientes altitudinales abruptos (>4,000 m) que allí se presentan y la propia fragmentación ecológica de las selvas húmedas (Díaz-Valderrama *et al.*, 2020). Sin embargo, estas barreras fueron transgredidas por *M. roreri*, principalmente por la vía antropogénica, como el transporte inadvertido de frutos infectados vía comercio agrícola, migración humana terrestre y rutas fluviales amazónicas, más que por vectores o causas naturales (Bailey *et al.*, 2018). Así pues, se han confirmado introducciones independientes sucesivas, con diversidad genética

decreciente en áreas invadidas (por ejemplo, menor variabilidad en México respecto a Colombia), lo que evidencia eventos fundadores mediados por humanos. Por ejemplo, en Soconusco solo se encontraron dos grupos genéticos (Rodríguez-Velázquez *et al.*, 2025), mientras que en Colombia hay sustancialmente más grupos (Ali *et al.*, 2015). Si bien el CC ha influido indirectamente en esta dinámica, al alterar patrones de precipitación y temperatura que favorecen el nicho bioclimático de *M. royeri*, lo que facilita su establecimiento en nuevas áreas sin alterar drásticamente su dispersión primaria (Plasencia-Vázquez *et al.*, 2022), la reciente expansión del hongo (de 1978 a la actualidad) puede explicarse por factores mediados por humanos. Esta influencia indirecta se observa en la reciente llegada de *M. royeri* a la Amazonia brasileña (MAPA, 2025). Dicho evento, con potencial de pérdidas de hasta 100% en Pará, subraya la urgencia de monitoreo en *hotspots* o áreas que podrían fungir como corredor biológico para este fitopatógeno (Moura *et al.*, 2025).

Las proyecciones para las especies en estudio a nivel Centro y Sudamérica se muestran en la Figura 50, tanto para el escenario actual como para los de CC al horizonte medio. Es posible que los SAF de Pará, Brasil, que son numerosos, hayan quedado subrepresentadas en el SDM, por lo que se sugiere incorporar RG de esta región o diferenciar los grupos genéticos en la modelación. Además, *P. capsici* pareció no estar bien representada en Colombia, donde también se presenta la mancha negra de forma significativa. Aunque esto se puede explicar debido a que esta se ha asociado más con *P. palmivora* en Colombia (Rodríguez-Polanco *et al.*, 2020). Por ende, sería pertinente realizar su modelación con un enfoque análogo. Cabe señalar que la DP proyectada para *P. capsici* con GFDL, muestra una afinidad climática destacada bajo el escenario actual en áreas como los estados brasileños de Rondônia, Mato Grosso, Paraná y áreas del este de Paraguay.

El patrón más disperso y afín a climas menos cálidos de *P. capsici* (respecto a *M. royeri* y *T. cacao*) se intensifica bajo el escenario HADGEM, que proyectó un aumento de la DP en hasta un tercio del centro-sur de Brasil para *P. capsici*, incluyendo los estados brasileños de Arce y Amazonas y el noreste de Colombia. Esta última área abarca espacialmente a la DP proyectada para *T. cacao* en ese mismo escenario y espacio

geográfico. En contraste, el modelo GFDL sugirió ligeros cambios en la DP de *P. capsici*, incluidas contracciones y ligeras ganancias (como al noreste de Colombia).

Se nota también que la DP de *T. cacao* y *M. royeri* con el escenario HADGEM, muchas de las áreas donde actualmente se cultiva el cacao o donde este es nativo (estado silvestre) ambas especies seguirían coexistiendo, mientras que con GFDL los impactos proyectados en sus DP serían menores.

Dichas áreas comparten principalmente un clima tropical de sabana (Aw), junto con un clima monzónico (Am) en menor medida. El clima Aw presenta temperaturas medias anuales entre 24 °C y 27 °C y una marcada estacionalidad hídrica. Lugares donde el periodo de secas se presenta de mayo a septiembre, con menos de 50 mm mensuales (Alvares *et al.*, 2013). Tales condiciones coinciden con los rangos óptimos de desarrollo reportados para la especie, así como con el hecho de que su dispersión se da de forma dominante por la presencia de agua (sensibilidad a la humedad relativa) y una alta plasticidad genómica, que le otorgan gran capacidad de adaptación a nuevos ambientes (Granke *et al.*, 2009; Lamour *et al.*, 2012).

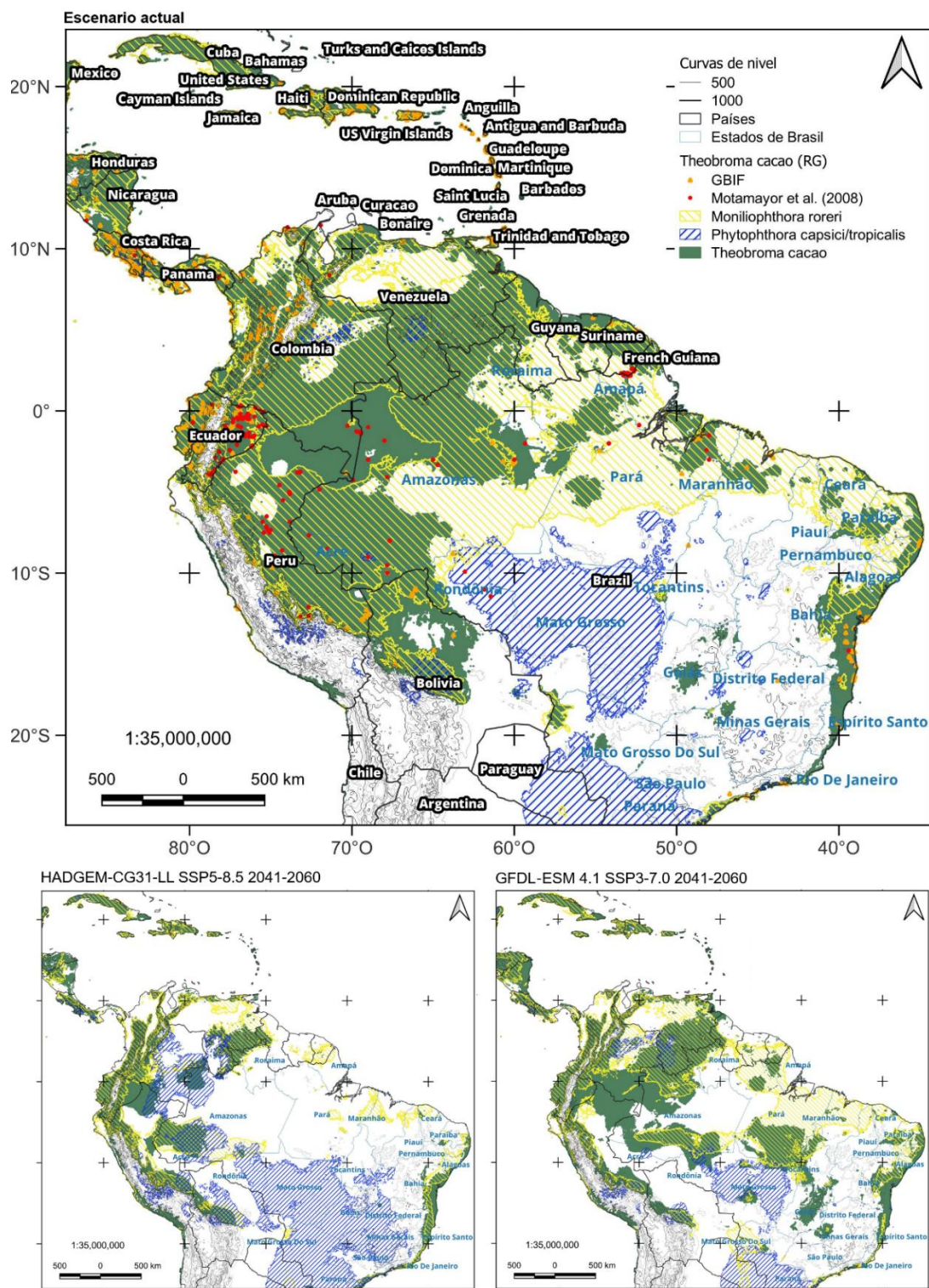


Figura 50. Distribución potencial para las especies en estudio en el escenario actual y ante los dos escenarios de cambio climático a mediano plazo (2041-2060) en Centro y Sudamérica.
 Nota: el umbral fue de 0.2.

En la Figura 51 se muestran las cuestiones ya comentadas sobre las DP para México, pero de forma integrada para las tres especies y los dos escenarios futuros a un horizonte largo. En particular, se muestra que HADGEM proyectó que no habría DP para ninguna de las tres especies en Tabasco y en altitudes bajas del Norte de Chiapas, lo que significa que habría impactos mayores para el cultivo y ya no sería idóneo desde el punto de vista bioclimático. Aspectos que son más visibles en la Figura 52. Además, tal proyección señaló que seguiría habiendo coexistencia de DP para las tres especies en altitudes medias, así como que *T. cacao* tendría DP a altitudes aún mayores, pero no *P. capsici* o *M. roleri*. Tal diferenciación plantearía un escenario adecuado para el manejo agronómico. En el otro extremo, con GFDL se proyectaron menos cambios significativos en la DP de *M. roleri* en partes de Tabasco y Norte de Chiapas, donde las tres especies seguirían cohabitando. Sin embargo, también se señalaron cambios sustanciales en las costas del Pacífico, en cuyas franjas costeras ninguna especie (incluida *P. capsici*) tendría DP. Cabe indicar que este escenario proyectó DP para *T. cacao* en partes altas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, pero no se proyectó DP para *M. roleri* y *P. capsici*. Lo que plantearía estrategias productivas basadas en este cultivo en tales estados en el futuro, donde posiblemente *M. roleri* y *P. capsici* tendrían poca idoneidad climática, pero si *T. cacao*.

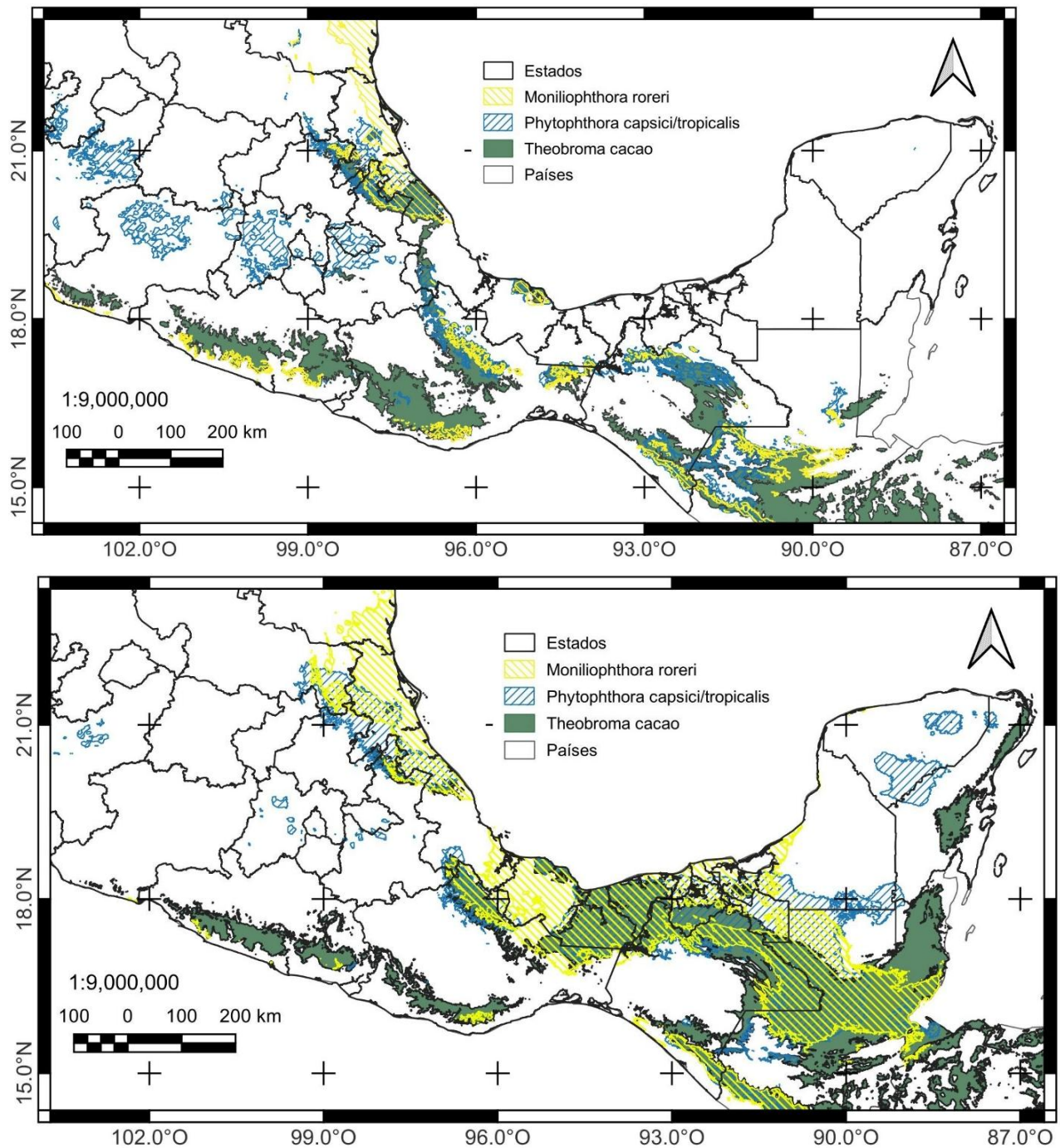


Figura 51. Coexistencia de la distribución potencial futura de las especies en estudio en México ante los escenarios de cambio climático.

(A) HADGEM y (B) GFDL al horizonte 2081-2100. Nota: el umbral fue de 0.3.

Con el escenario GFDL para el horizonte 2081-2100 se proyectó que en la Chontalpa la DP de *P. capsici* y *T. cacao* solo se vería afectada en una porción de la franja costera

(Figura 52). En tanto que para la región del Soconusco (Figura 53), *T. cacao* recorrería su distribución desde la cota de los 0 msnm actualmente, hasta ~250 msnm para encontrar DP en tal escenario, aunque en la parte frontera con Guatemala este límite sería inferior (~150 msnm); en cuyas áreas también tendrían DP tanto *M. roreri* como *P. capsici*. Aunque a mayores altitudes, a más de ~1200-1300 y menos de ~1800 msnm, *T. cacao* tendría DP, pero no *M. roreri* ni *P. capsici*. Tales previsiones para Soconusco son reservadas respecto a las proyecciones con el escenario HADGEM para ese mismo horizonte (2081-2100). Mismo que indicó que *T. cacao* recorrería su DP desde los 0 msnm hasta unos 500 msnm en promedio (con ligeras variaciones) e igualmente, que *M. roreri* no tendría DP a mayores altitudes (~1500 msnm), pero si *T. cacao*, que incluso podría alcanzar los 2100 msnm. Previsiones que, pese a la necesidad de migrar el cultivo, como ya se dijo, implicarían ventajas en el manejo agronómico. Sin embargo, es necesario investigar más al respecto: hacer análisis más detallados, modelaciones con otros métodos (por ejemplo, mediante modelado mecanicista o modelos eco-climáticos), con más especies fitopatogénicas y con más escenarios, como se detallará en la subsección siguiente.

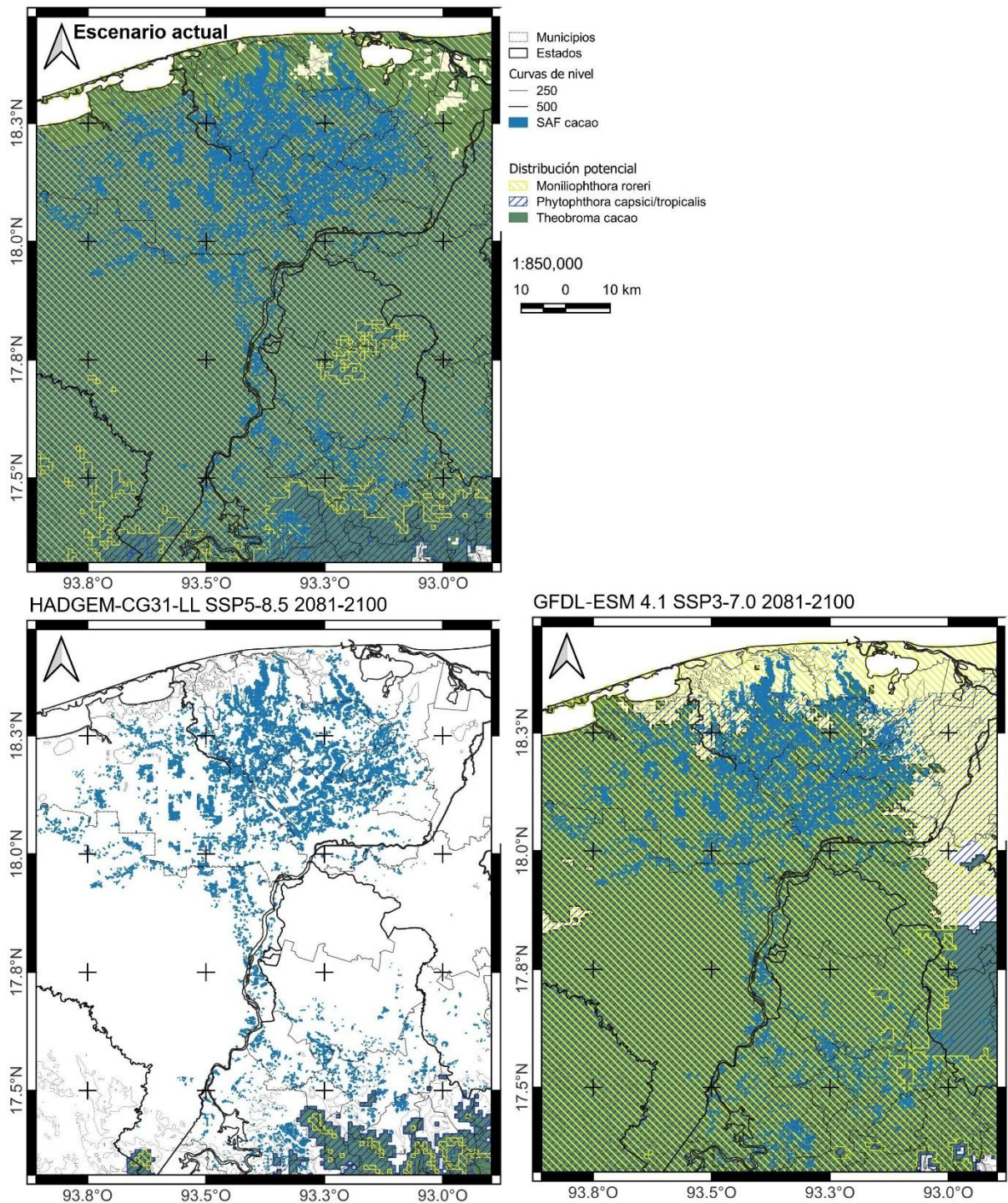
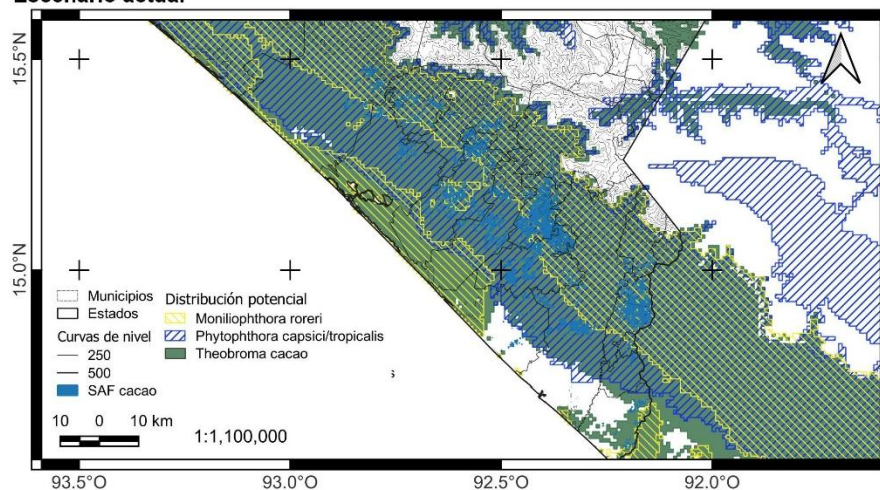
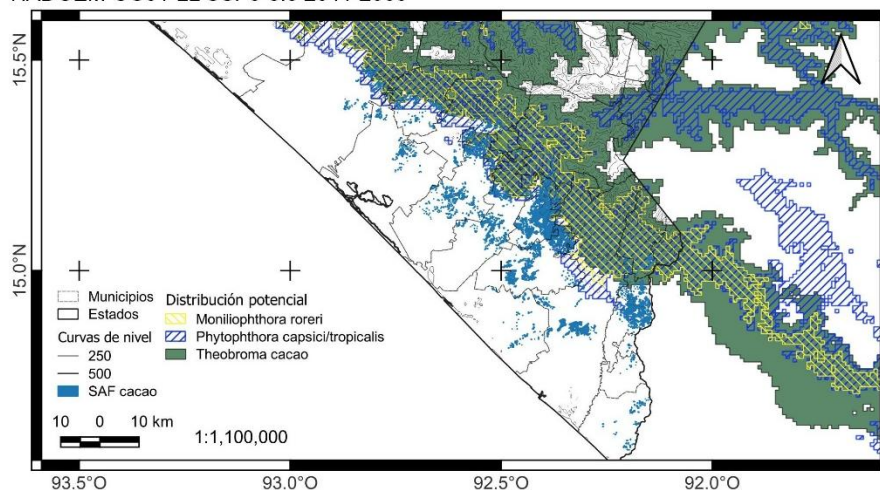


Figura 52. Coexistencia de la distribución potencial de las especies en estudio en las subregiones de la Chontalpa, Tabasco y Norte de Chiapas en el escenario actual y dos escenarios de CC en el horizonte 2081-2100.

Escenario actual



HADGEM-CG31-LL SSP5-8.5 2041-2060



GFDL-ESM 4.1 SSP3-7.0 2081-2100

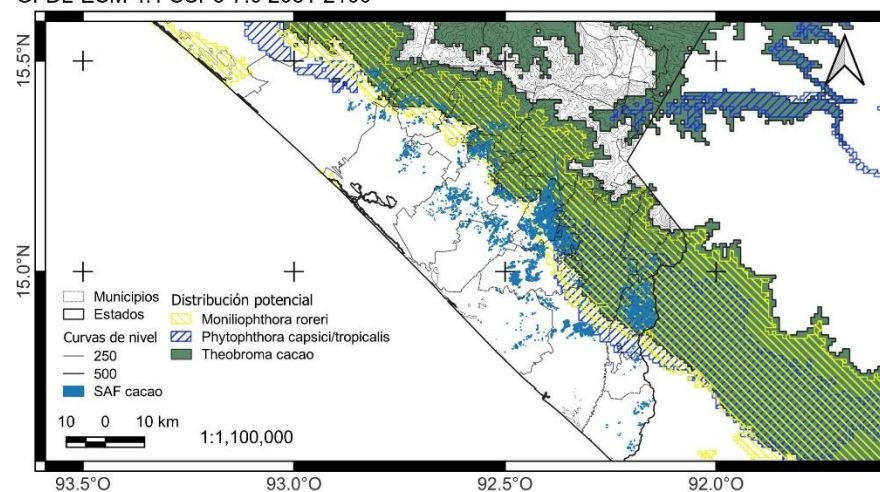


Figura 53. Coexistencia de la distribución potencial de las especies en estudio en el Soconusco, Chiapas en el escenario actual y dos escenarios de CC en el horizonte 2081-2100.

7.5.3. Discusión de aspectos teóricos y prácticos

A pesar de la exhaustividad en la revisión y modelación correlativa realizada mediante Maxent, es necesario reconocer las limitaciones inherentes al enfoque de DP-SDM, particularmente aquellas derivadas de las deficiencias linneanas y wallaceanas. Estas deficiencias inciden directamente en la capacidad de los modelos para caracterizar adecuadamente el nicho ecológico fundamental de las especies analizadas—es decir, el conjunto de condiciones ambientales bajo las cuales una especie puede persistir en ausencia de restricciones biológicas (Merow *et al.*, 2013). La deficiencia linneana (*sampling bias* o sesgo de muestreo) puede inducir una subestimación del nicho fundamental al basarse únicamente en condiciones observadas, que reflejan más bien el nicho actual o realizado, el cual está condicionado por interacciones ecológicas, historia (reciente) del uso del suelo y limitaciones locales (Elith *et al.*, 2011; Soberon & Peterson, 2005). Por su parte, la deficiencia wallaceana puede generar una sobreestimación o desplazamiento erróneo del nicho proyectado, al asumir que las especies han explorado todo el espacio ambiental disponible, lo cual rara vez ocurre en sistemas tropicales con barreras geográficas, dispersión limitada o historia evolutiva reciente (Elith *et al.*, 2011; Merow *et al.*, 2013). La deficiencia anterior podría aplicar *P. capsici* y *M. roreri*, no tanto así a *T. cacao*. En conjunto, estas limitaciones pueden derivar en la proyección de un nicho aleatorio no tan apegado a la realidad, especialmente bajo escenarios de CC, con lo que, a su vez, se comprometería la precisión de los resultados de la modelación. Y, por tanto, las conclusiones que se deriven del modelado tendrían poco rigor científico.

Dichas limitaciones de los SDM pueden ser compensadas con modelos mecanicistas, que incorporan procesos biológicos y fisiológicos (por ejemplo, tasas de crecimiento, tolerancias térmicas) para estimar el nicho fundamental con mayor precisión, independientemente de datos de presencia observada. Sin embargo, su implementación requiere precaución, ya que los modelos mecanicistas son altamente sensibles a la calidad y completitud de los datos fisiológicos utilizados, y su poder predictivo puede verse comprometido si los parámetros clave son mal estimados o si las interacciones ecológicas se simplifican en exceso (Peterson *et al.*, 2015). Por ello,

su uso debe complementarse con validación empírica y ajustes basados en experimentos controlados, especialmente en sistemas complejos como los de los trópicos, donde las interacciones ecológicas añaden incertidumbre adicional. Modelos semi mecanicistas como CLIMEX, que requieren de parámetros fisiológicos y RG también son una alternativa interesante, pues se pueden mitigar las deficiencias de los modelos correlativos y mecanicistas si se trabajan de forma adecuada (Ireland & Kriticos, 2019).

Asimismo, el presente estudio no incorporó explícitamente interacciones biológicas complejas, más allá de la modelación hospedero-patógeno entre *T. cacao*, *M. royeri* y *P. capsici*. Factores como “etapas especiales” del ciclo de vida (por ejemplo, estructuras de resistencia a condiciones ambientales adversas como conidios, zoosporas, hibridaciones y la consecuente mayor agresividad, etc.), la competencia, mutualismos, o la presión de enemigos naturales pueden modificar sustancialmente la idoneidad proyectada, y su exclusión representaría demasiada simplificación de un sistema mucho más complejo. Si bien el clima condiciona de forma directa a las condiciones edáficas locales, estas características no fueron consideradas directamente en este estudio, a pesar de su influencia crítica en la viabilidad del cultivo (Suárez *et al.*, 2013; Suárez-Venero *et al.*, 2021). Para ello se recomienda usar en futuros estudios la base de datos HWSD2 (*Harmonized World Soil Database v2.0*) como insumo complementario (FAO & IIASA, 2023), dado su alcance global y resolución compatible con las variables bioclimáticas utilizadas, aunque será necesario realizar procesos de extracción e interpolación para armonizar los datos con las capas bioclimáticas. La base HWSD2 es un inventario global de suelos desarrollado por la FAO, que proporciona información armonizada sobre las propiedades morfológicas, químicas y físicas de los suelos (a diferentes profundidades del suelo) a una resolución aproximada de 1 km (FAO & IIASA, 2023). Dichos datos son accesibles, por ejemplo, mediante el paquete “hwsdr” de RStudio (Hufkens, 2021).

Por otro lado, las proyecciones climáticas utilizadas no contemplan explícitamente las interacciones entre temperatura y concentración de CO₂, las cuales pueden tener efectos compensatorios en la fisiología del cacao (Lahive *et al.*, 2019; Ríos-Bolívar *et*

al., 2022): si bien el aumento térmico puede inducir estrés hídrico y reducir la productividad, una mayor disponibilidad de CO₂ podría mitigar parcialmente estos efectos al mejorar la eficiencia fotosintética. La magnitud de esta compensación dependerá del escenario climático considerado, por lo que futuras modelaciones deberían integrar estos parámetros para una evaluación más realista. Lahive *et al.* (2019), en una revisión sobre los efectos fisiológicos del estrés en *T. cacao* en el contexto del CC, reportan que la escasez hídrica reduce significativamente los rendimientos, aunque existen diferencias genéticas en la sensibilidad a esta limitación. Además, destacan que el cacao en condiciones de campo enfrenta temperaturas más elevadas de lo que comúnmente se reporta en estudios experimentales, y que la interacción con árboles de sombra (microclima) puede generar respuestas contradictorias en los modelos de simulación. Por ende, tales autores subrayan la necesidad de implementar estrategias de mitigación para reducir el estrés abiótico en el cultivo, al tiempo que señalan vacíos de conocimiento en esta línea de investigación, especialmente en lo relativo a la variabilidad genotípica y a las respuestas fisiológicas diferenciadas genotípicamente bajo escenarios de CC.

Al respecto de lo anterior, en este estudio no hubo una diferenciación respecto a la variedad o grupo genético de *T. cacao* en el análisis. Debido a la gran variabilidad genética dentro de la especie, las respuestas al CC seguramente serán diferenciadas en ese mismo sentido, pues se han reportado respuestas ecofisiológicas diferenciadas en respuesta al manejo del microclima según la variedad analizada (Cocoletzi Vásquez *et al.*, 2022; Jiménez-Pérez *et al.*, 2019). Al respecto, Benjamin *et al.* (2025) confirman que el rendimiento de clones como CCN-51 en pleno sol está correlacionado negativamente con el déficit de presión de vapor, lo que indica alta sensibilidad a condiciones de estrés hídrico y térmico. Con lo que a su vez, se argumenta que el CC impactaría de forma negativa a los monocultivos. Otros posibles efectos fisiológicos del CC en el cultivo incluyen la inhibición de la floración, la producción de vainas más pequeñas y la madurez temprana del fruto (Pérez Sosa & Granados Ramírez, 2020).

Finalmente, es importante destacar que los modelos actuales no incorporan de forma explícita (aunque sí de forma indirecta al tratarse de RG en su estado natural y no en

ambientes controlados) el efecto del microclima generado por los árboles de sombra, que como se dijo, es un elemento fundamental en la resiliencia de SAF de cacao. Además, ciertos estudios (de Sousa *et al.*, 2019) han mostrado que los árboles comúnmente utilizados como sombra presentan baja idoneidad proyectada bajo CC, lo que podría comprometer la resiliencia del sistema en su conjunto. Esto sugiere la necesidad de recabar información en campo a nivel de micrositio, para contrastar clima regional respecto a microclima local, y modelar escenarios que integren esta complejidad. Las implicaciones de estos hallazgos y otros similares pueden servir para fundamentar el diseño de nuevas estrategias nacionales e internacionales de adaptación al CC, incluyendo la selección de especies de sombra más resilientes, el rediseño de arreglos agroforestales (de Sousa *et al.*, 2019) y el desarrollo de políticas públicas que reconozcan la multifuncionalidad de los SAF y la complejidad del sistema cacao-sombra-fitopatógeno.

Sin embargo, ahora debe contemplarse un enfoque de manejo integrado de plagas, enfermedades y polinizadores, dado que el modelo convencional basado en el uso intensivo de agroquímicos no solo ha demostrado ser ambientalmente insostenible, sino que también conlleva riesgos para la salud humana y favorece la generación de resistencia en los patógenos (Castelán-Estrada & Chávez-García, 2019; Niether *et al.*, 2020). En este contexto, la transición hacia sistemas agroecológicos (Nicholls *et al.*, 2013) o de agricultura climáticamente inteligente (FAO, 2021) resulta no solo pertinente, sino estratégica. La investigación presentada en este trabajo puede ofrecer herramientas para la planificación agroecológica a largo plazo, anticipando transformaciones necesarias en sistemas de clima cálido húmedo, que ya experimentan impactos tangibles del CC. Por ende, la modelación ecológica de especies fitopatógenas, incluso aquellas con distribución restringida o daños esporádicos, se vuelve crítica para identificar especies con potencial expansivo y zonas de riesgo emergente, diseñar estrategias de contención y orientar políticas de manejo integrado en territorios de alta vulnerabilidad ecológica y socio-productiva.

Por ello, se recalca la relevancia de la vigilancia epidemiológica inter y transcontinental, dado que el comercio internacional y los programas nacionales e internacionales de

mejoramiento genético han favorecido la expansión de ciertas razas fitopatógenas — como en *L. theobromae* o incluso la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Broome)—, así como procesos de hibridación interespecífica que podrían alterar significativamente el patosistema de los cultivos y dificultar el control de enfermedades (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018; Mehl *et al.*, 2017). En este sentido, la implementación rigurosa de medidas de cuarentena en el movimiento de material vegetal, junto con la integración de datos fitosanitarios globales, se vuelve indispensable para una adaptación preventiva eficaz (Delgado-Ospina *et al.*, 2021).

Por otro lado, existe un interés creciente en el fortalecimiento de la resistencia genética del cacao, para lo cual resulta necesario el desarrollo de variedades adaptadas a diferentes condiciones de estrés abiótico, como la sequía, que el CC puede agravar (Hutchins *et al.*, 2015). En este sentido, el microclima generado por el arbolado y la mejora de la microbiota del agroecosistema cacaotero ha demostrado reducir el estrés abiótico ante sequías, salinidad y otros factores climáticos, además de proveer innumerables beneficios adicionales; por lo que su entendimiento y optimización deben ser fomentados e investigados (Brito-Vega *et al.*, 2018; Jiménez-Pérez *et al.*, 2019; Troya Guerrero & Pino Meléndez, 2023).

7.6. Conclusiones

El modelado permitió inferir que *M. roreri* se restringe a ambientes cálido-húmedos con baja estacionalidad térmica y alta disponibilidad hídrica, mientras que *P. capsici* muestra mayor tolerancia a la variación térmica, pero que aun así mantiene una fuerte dependencia de la humedad estacional. Por su parte, para *T. cacao* se confirmó su preferencia por climas con estabilidad térmica (incluso respecto a días y estaciones) y sin déficits hídricos marcados, lo que lo hace especialmente vulnerable al CC (en lo referente a las variaciones de esas variables). Estos resultados ofrecen una base para anticipar las posibles respuestas de estas especies ante escenarios de CC. Además, se proyectaron cambios sustanciales en las DP de estas especies, aunque con diferencias marcadas, según el horizonte considerado y entre escenarios (HADGEM o GFDL). Donde el primero fue el más pesimista al proyectar más afectación en la DP futura para las tres especies.

En el escenario actual, el 12.2% del territorio continental nacional presenta DP para *T. cacao* a un umbral de 0.2. Umbral que se tomó para que hubiera consistencia con las áreas plantadas y naturales donde crece el cacao en Centro y Sudamérica. Porcentaje que es considerable, comparado con la superficie cultivada actualmente (unas 60 mil ha) en el país. Sin embargo, es necesario agregar variables edáficas (zonificación edafoclimática) y considerar la variabilidad genética de los RG para precisar mejor estos datos y diferenciar aquellos grupos tolerantes a condiciones edafoclimáticas marginales (como el estrés hídrico, que el CC puede agravar). Dichos grupos representarían alternativas adecuadas para incorporar en áreas donde en un futuro se reduzca la idoneidad climática, siempre tratando de conservar el acervo genético nacional que aún queda, heredado de nuestras culturas progenitoras. Las proyecciones indicaron que ese 12.2 apenas variaría en el mediano plazo (ganancias netas de 0.5% HADGEM y pérdida netas de 1% por GFDL), pero a largo plazo se indicaron reducciones mayores: -5.4% por HADGEM y -2.6% por GFDL a nivel nacional. Al tiempo que el desarrollo de variedades resistentes al estrés hídrico es una de las vías más recomendadas para hacer frente al CC, así como la mejora y el manejo adecuado de los árboles de sombra y de la microbiota del suelo, que mejoran la tolerancia de *T. cacao* al estrés hídrico.

Se evidenció que el CC podría comprometer la DP del cacao en sus regiones tradicionales, incluidas las actuales parcelas de Tabasco y Chiapas, los mayores estados productores de cacao en México, pero también de otras zonas con tradición cacaotera que se ubican en la costa del Pacífico; lo mismo se proyectó para América y Sudamérica: habría desplazamientos sustanciales del área idónea para el cultivo. Si bien la idoneidad para el cacao se encontraría a mayores altitudes, por lo que habría que ir planteando escenarios para hacer esa transformación o fusión de sistemas (como con los de café y cultivos alternativos, incluso no con los de tipo no convencional). La pérdida de idoneidad en áreas actualmente productivas plantea desafíos importantes para los pequeños productores, quienes podrían enfrentar disminuciones en rendimiento, así como mayor incidencia de enfermedades y plagas. Lo cual subraya la necesidad de implementar estrategias de adaptación (como las

referidas en los capítulos previos), como el manejo integrado del cultivo, el fortalecimiento de la capacidad organizativa de los productores y de las instituciones, el rediseño de SAF y la selección de variedades más resistentes. Así pues, resulta pertinente el fortalecer desde lo económico y lo agronómico a estos SAF, mediante, por ejemplo la mejora de la cadena del valor, asistencia técnica y el pago por servicios ambientales, en un marco de rescate, preservación y gestión patrimonial de este sistema. De igual modo, resulta imprescindible realizar un monitoreo climático y fitosanitario frecuente e institucionalizado, para anticipar riesgos y tomar decisiones informadas. Del mismo modo, resultan imprescindibles políticas públicas que apoyen la resiliencia del sistema cacao-sombra en contextos vulnerables, sobre todo porque, si bien estos sistemas podrían ser impactados por el CC, también fungen a manera de estrategias de adaptación y mitigación ante este.

Es decir, en caso de que estas estrategias y los SAF se implementen como política pública o se fortalezcan las ya existentes con una base científica, participativa y de largo plazo, se podrían contribuir de manera efectiva a la mitigación del CC, en la medida que corresponde —reconociendo que el rumbo global depende de decisiones multilaterales. Al mismo tiempo, estos sistemas ofrecen una vía robusta de adaptación, gracias a sus múltiples funciones ambientales y socioeconómicas: conservación de la biodiversidad, regulación hídrica, captura de carbono, generación de ingresos, diversificación y resiliencia productiva. De este modo, los SAF no solo serían víctimas de las proyecciones más pesimistas, sino también una vía estratégica para transformar los sistemas tradicionales de producción en América tropical y en México, con lo que se mitigarían los impactos del CC y se fortalecería la multifuncionalidad y la sostenibilidad territorial.

7.7. Literatura citada

- Aguilar-González, L. (2018). El cacao (*Theobroma cacao* L.) en Nayarit como propuesta de agroturismo. *Agro Productividad*, 11(8), 89–93.
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541–545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Albores Flores, V. J. L., Gómez Rodríguez, L., López García, J. A., & Grajales Conesa, J. (2022). Mecanismos de infección endógena en frutos de cacao con *Moniliophthora roreri*. *Polibotánica*, 53(53), 197–209. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.13>
- Ali, S. S., Shao, J., Strem, M. D., Phillips-Mora, W., Zhang, D., Meinhardt, L. W., & Bailey, B. A. (2015). Combination of RNAseq and SNP nanofluidic array reveals the center of genetic diversity of cacao pathogen *Moniliophthora roreri* in the upper Magdalena Valley of Colombia and its clonality. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00850>
- Alkishe, A. A., Peterson, A. T., & Samy, A. M. (2017). Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes ricinus*. *PLOS ONE*, 12(12), e0189092. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189092>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Anderson, R. P., Lew, D., & Peterson, A. T. (2003). Evaluating predictive models of species' distributions: criteria for selecting optimal models. *Ecological Modelling*, 162(3), 211–232. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00349-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00349-6)
- Arrieta-Fernández, P. (1992). Desarrollo social planificado en La Chontalpa, Tabasco. *La Palabra y El Hombre*, 81, 159–176.
- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (2016). Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters. In B. A. Bailey & L. W. Meinhardt (Eds.), *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Bailey, B. A., Evans, H. C., Phillips-Mora, W., Ali, S. S., & Meinhardt, L. W. (2018). *Moniliophthora roreri*, causal agent of cacao frosty pod rot. *Molecular Plant Pathology*, 19(7), 1580–1594.
- Bautista-Cruz, M. A., Almaguer-Vargas, G., Leyva-Mir, S. G., Colinas-Léon, M. T., Correia, K. C., Camacho-Tapia, M., Robles-Yerena, L., Michereff, S. J., & Tovar-Pedraza, J. M. (2019). Phylogeny, distribution, and pathogenicity of *Lasioidiplodia* species associated with cankers and dieback symptoms of persian lime in Mexico. *Plant Disease*, 103(6), 1156–1165. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-18-1036-RE>
- Benjamin, C. S., Dias, L. A. S., Martins, S. C. V., Aucique-Perez, C. E., & Rosmaninho, L. B. C. (2025). Unlocking the potential of cacao yield with full sun cultivation. *Scientific Reports*, 15(1), 4368. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87793-z>
- Booth, T. H., Nix, H. A., Busby, J. R., & Hutchinson, M. F. (2014). bioclim: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxEnt studies. *Diversity and Distributions*, 20(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/ddi.12144>

- Brito-Vega, H., Gómez-Méndez, E., & Salaya-Domínguez, J. M. (2018). The Cacao Agrosystems in Tabasco, México. In *Sustainability of Agroecosystems*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78302>
- Bucker Moraes, W., Cintra de Jesus Júnior, W., de Azevedo Peixoto, L., Bucker Moraes, W., Luiz Furtado, E., Gomes da Silva, L., Avelino Cecílio, R., & Ramos Alves, F. (2012). An analysis of the risk of cocoa moniliasis occurrence in Brazil as the result of climate change. *Summa Phytopathol*, 38(1), 30–35.
- Bunn, C., Läderach, P., Quaye, A., Muilerman, S., Nojonen, M. R. A., & Lundy, M. (2019). Recommendation domains to scale out climate change adaptation in cocoa production in Ghana. *Climate Services*, 16, 100123. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100123>
- Casanova-Lugo, F., Ramírez-Avilés, L., Parsons, D., Caamal-Maldonado, A., Piñeiro-Vázquez, A. T. y Díaz-Echeverría, V. (2016). Servicios ambientales de los sistemas agroforestales tropicales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 269–284. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.06.029>
- Castelán-Estrada, M., & Chávez-García, E. (2019). Evaluación campesina del manejo agroecológico de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 12(7). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1438>
- Castillo-Martínez, A., Ogaz, A., López-Hernández, J., Mora-Aguilera, J. A., & García-López, E. (2024). Manejo integrado de *Moniliophthora roreri* en Chiapas, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), e4010. <https://era.ujat.mx/index.php/rera/es/article/view/4010/1800>
- Castro-Nunez, A., Charry, A., Castro-Llanos, F., Sylvester, J., & Bax, V. (2020). Reducing deforestation through value chain interventions in countries emerging from conflict: The case of the Colombian cocoa sector. *Applied Geography*, 123(102280). <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102280>
- Cavanaugh, J. E. (1997). Unifying the derivations for the Akaike and corrected Akaike information criteria. *Statistics & Probability Letters*, 33(2), 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0167-7152\(96\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0167-7152(96)00128-9)
- Chávez-Ramírez, B., Rodríguez-Velázquez, N. D., Chávez-Sánchez, M. E., Vásquez-Murrieta, M. S., Hernández-Gallegos, M. A., Velázquez-Martínez, J. R., Avendaño-Arrazate, C. H., & Estrada-de los Santos, P. (2021). Morphological and molecular identification of *Phytophthora tropicalis* causing black pod rot in Mexico. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 43(5), 670–679. <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1870003>
- Cibrián-Tovar, D., Alvarado Rosales, D., & García Díaz, S. E. (2007). *Enfermedades forestales en México*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://books.google.com.mx/books?id=5VEmAQAAMAAJ>
- Cobos, M. E., Peterson, T. A., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). *Kuenm*: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7(e6281). <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Cocoletzi Vásquez, E., Hipólito-Romero, E., Ricaño-Rodríguez, J., & Ramos-Prado, J. M. (2022). Plasticidad ecofisiológica de clones de *Theobroma cacao* L. como

- respuesta a la estructura y el microclima de sistemas agroforestales en México. *Botanical Sciences*, 100(1). <https://doi.org/10.17129/botsci.2925>
- CONAFOR. (2025). Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). Sistema Nacional de Monitoreo Forestal. Comisión Nacional Forestal. <https://snmf.cnf.gob.mx/infys/>
- Cruz González, B., Jarquín Gálvez, R., & Ramírez Tobias, H. M. (2013). Viabilidad económica y ambiental de policultivos de hule, café y cacao. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, 4(1), 49–61. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263125750001>
- de Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*, 9(1), 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>
- del Carpio Penagos, C. U. (2017). Soconusco, Chiapas. Transformaciones ambientales de origen antrópico. *Decumanus*, 2(2), 7–26. <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/decumanus/article/view/1991>
- Delgado-Ospina, J., Molina-Hernández, J. B., Chaves-López, C., Romanazzi, G., & Paparella, A. (2021). The role of fungi in the cocoa production chain and the challenge of climate change. *Journal of Fungi*, 7(3), 202. <https://doi.org/10.3390/jof7030202>
- Díaz-Valderrama, J. R., Leiva-Espinoza, S. T., & Catherine Aime, M. (2020). The history of cacao and its diseases in the Americas. *Phytopathology*, 110(10), 1604–1619. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-20-0178-RVW>
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D., & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., Krasting, J. P., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Shevliakova, E., Stock, C. A., Zadeh, N., Balaji, V., Blanton, C., Dunne, K. A., Dupuis, C., Durachta, J., Dussin, R., ... Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Escobar, L. E., & Craft, M. E. (2016). Advances and limitations of disease biogeography using ecological niche modeling. *Frontiers in Microbiology*, 7(AUG), 1–21. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01174>
- Estrada, A., Coates-Estrada, R., & Meritt, D. A. (1997). Anthropogenic landscape changes and avian diversity at Los Tuxtlas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 6, 19–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1018328930981>

- Evans, H. C., & Waller, J. M. (2010). Globalisation and the Threat to Biosecurity. In *The Role of Plant Pathology in Food Safety and Food Security* (pp. 53–72). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8932-9>
- FAO, & IIASA. (2023). *Harmonized World Soil Database version 2.0*. FAO; International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA); <https://doi.org/10.4060/cc3823en>
- FAO. (1999). Documento expositivo: El carácter multifuncional de la agricultura y la tierra. <https://www.fao.org/3/X2777S/X2777S00.htm#TopOfPage>
- FAO. (2021). Climate-smart agriculture case studies 2021: projections from around the world. In *Climate-smart agriculture case studies 2021*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cb5359en>
- FAO. (2022). *FAOSTAT statistical database*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Ferrer-Sánchez, Y., Mafaldo-Sajami, A. A., Plasencia-Vázquez, A. H., & Urdánigo-Zambrano, J. P. (2022). Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40:e1338, 1–10. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Flood, J. (s.f.). *A review on the effect of climate change on cacao pests and diseases* [Presentación]. International Cocoa Organization (ICCO). Recuperado el 27 de octubre de 2025, de <https://www.icco.org/wp-content/uploads/Keynote-Thematic-3.-Julie-Flood.pdf>
- Garrett, K. A., Forbes, G. A., Savary, S., Skelsey, P., Sparks, A. H., Valdivia, C., van Bruggen, A. H. C., Willocquet, L., Djurle, A., Duveiller, E., Eckersten, H., Pande, S., Vera Cruz, C., & Yuen, J. (2011). Complexity in climate-change impacts: An analytical framework for effects mediated by plant disease. *Plant Pathology*, 60(1), 15–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02409.x>
- GBIF. (2025). *Global Biodiversity Information Facility*. (Consultado el 20 de octubre de 2024). <https://www.gbif.org/>
- Geoweb Chiapas (2025). *Geoweb Chiapas 3.0*. Consejo Estatal de Población y Secretaría de Hacienda de Chiapas Plataforma de Consulta Geoespacial. <https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>
- Gil-Ordóñez, A., Pardo, J. M., Sheat, S., Xaiyavong, K., Leiva, A. M., Arinaitwe, W., Winter, S., Newby, J., & Cuellar, W. J. (2024). Isolation, genome analysis and tissue localization of *Ceratobasidium theobromae*, a new encounter pathogen of cassava in Southeast Asia. *Scientific Reports*, 14(1), 18139. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69061-8>
- Granke, L. L., Windstam, S. T., Hoch, H. C., Smart, C. D., & Hausbeck, M. K. (2009). Dispersal and Movement Mechanisms of *Phytophthora capsici* Sporangia. *Phytopathology*®, 99(11), 1258–1264. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-11-1258>

- Guest, D. (2007). Black Pod: Diverse Pathogens with a Global Impact on Cocoa Yield. *Phytopathology*®, 97(12), 1650–1653. <https://doi.org/10.1094/PHTO-97-12-1650>
- Hebbar, K. B., Berwal, M. K., & Chaturvedi, V. K. (2016). Plantation crops: climatic risks and adaptation strategies. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(4), 428–436. <https://doi.org/10.1007/s40502-016-0265-9>
- Hernández, B. R., Armando, L., Navarro, A., Rivera, A. A., Francisco, J., & López, J. (2016). Evidencias del cambio climático en el estado de Tabasco 1961- 2010. *Cienc. Agríc*, 7(Pub. Esp. Núm. 14), 2645–2656. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016001002645&lng=es
- Hernández-Gómez, E. (2014). *Diagnóstico fitosanitario de cacao (Theobroma cacao L.) en Chiapas* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Colegio de Postgraduados.
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillen, G., Garrido-Ramírez, E. R., & Romero-Nápoles, J. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 232–246. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61242145008>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hufkens, K. (2021). The hwsdr package: an interface to ORNL DAAC HWSO API endpoints. <https://bluegreen-labs.github.io/hwsdr/>
- Hutchins, A., Tamargo, A., Bailey, C., & Kim, Y. (2015). Assessment of climate change impacts on cocoa production and approaches to adaptation and mitigation: A contextual view of Ghana and Costa Rica [Informe técnico]. Elliott School of International Affairs, George Washington University. Recuperado el 27 de octubre de 2025, de <https://elliott.gwu.edu/sites/g/files/zaxdzs2141/f/WorldCocoaFoundation.pdf>.
- INEGI. (2016). *Marco Geoestadístico Estatal. Escala 1:4 000 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825217341>
- CIAT. (2025). *PestDisPlace*. Monitoring the Emergence, Occurrence and Global Distribution of Pests and Diseases. Centro Internacional para la Agricultura Tropical. <https://pestdisplace.org/>
- IPCC. (2021). Climate change 2021: *The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Ireland, K. B., & Kriticos, D. J. (2019). Why are plant pathogens under-represented in eco-climatic niche modelling? *International Journal of Pest Management*, 65(3), 207–216. <https://doi.org/10.1080/09670874.2018.1543910>
- Jiménez-Pérez, A., Cach-Pérez, M. J., Valdez-Hernández, M., & de la Rosa-Manzano, E. (2019). Effect of canopy management in the water status of cacao (*Theobroma cacao*) and the microclimate within the crop area. *Botanical Sciences*, 97(4), 701–710. <https://doi.org/10.17129/botsoci.2256>

- Jung, J. M., Byeon, D. hyeon, Kim, S. H., Sunghoon-Jung, & Lee, W. H. (2020). Estimating economic damage to cocoa bean production with changes in the spatial distribution of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in response to climate change. *Journal of Stored Products Research*, 89, 101681. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101681>
- Lahive, F., Hadley, P., & Daymond, A. J. (2019). The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0>
- Lamour, K. H., Mudge, J., Gobena, D., Hurtado-Gonzales, O. P., Schmutz, J., Kuo, A., Miller, N. A., Rice, B. J., Raffaele, S., Cano, L. M., Bharti, A. K., Donahoo, R. S., Finley, S., Huitema, E., Hulvey, J., Platt, D., Salamov, A., Savidor, A., Sharma, R., ... Kingmore, S. F. (2012). Genome Sequencing and Mapping Reveal Loss of Heterozygosity as a Mechanism for Rapid Adaptation in the Vegetable Pathogen *Phytophthora capsici*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*®, 25(10), 1350–1360. <https://doi.org/10.1094/MPMI-02-12-0028-R>
- Libert-Amico, A., & Paz-Pellat, F. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*, 24(núm. especial), e2401914. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914>
- 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 (UNACH). https://espacioimasd.unach.mx/libro/num7/Manejo_agroecologico_de_la_nutricion_en_el_cultivo_del_cacao.pdf
- Malhi, Y., Franklin, J., Seddon, N., Solan, M., Turner, M. G., Field, C. B., & Knowlton, N. (2020). Climate change and ecosystems: Threats, opportunities and solutions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0104>
- Marelli, J. P., Guest, D. I., Bailey, B. A., Evans, H. C., Brown, J. K., Junaid, M., Barreto, R. W., Lisboa, D. O., & Puig, A. S. (2019). Chocolate under threat from old and new cacao diseases. *Phytopathology*, 109(8), 1331–1343. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-18-0477-RVW>
- Marín Olán, P. (2022). Y llegaron las panzonas: Ensayo regresivo sobre la ganadería bovina en Tabasco, 2015-1949. In *Y llegaron las panzonas: Ensayo regresivo sobre la ganadería bovina en Tabasco, 2015-1949*. <https://doi.org/https://doi.org/10.19136/book241>
- Másmela-Mendoza, J. E. (2019). Distribución potencial y nicho fundamental de *Moniliophthora* spp en cacao de América y África. *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 659–679. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35038>
- Massicotte, P., & South, A. (2023). *rnaturalearth: World Map Data from Natural Earth*. <https://cran.r-project.org/package=rnaturalearth>

- Mehl, J., Wingfield, M. J., Roux, J., & Slippers, B. (2017). Invasive everywhere? Phylogeographic analysis of the globally distributed tree pathogen *Lasiodiplodia theobromae*. *Forests*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/f8050145>
- Mendoza-López, A., Gallardo-Méndez, R. A., & Avendaño-Arrazate, C. H. (2018). El mundo del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Agroproductividad*, 4(2), 18–26.
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x>
- Minio, A., Figueroa-Balderas, R., Cohen, S. P., Ali, S. S., Carriel, D., Britto, D., Stack, C., Baruah, I. K., Marelli, J.-P., Cantu, D., & Bailey, B. A. (2023). Clonal reproduction of *Moniliophthora roreri* and the emergence of unique lineages with distinct genomes during range expansion. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 13(9). <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkad125>
- Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). (2025). *Mapa declara emergência fitossanitária ao risco de surto da praga quarentenária da mandioca*. Gobierno Federal de Brasil. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mapa-declara-emergencia-fitossanitaria-ao-risco-de-surto-da-praga-quarentenaria-da-mandioca>
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez Díaz, J. D., Lunch-Cota, S., Sáenz, R., Pérez, E., Salvadero, C., Lunch-Cota, D., Saldivar- Lucio, R., Ponce Díaz, G., Martínez, C., Ramírez-García, G., & Baca-del Mora. J. (2015). Sistemas de producción de alimentos y seguridad alimentaria. In *Reporte Mexicano de Cambio Climático* (pp. 97–118). Grupo II Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación. UNAM.
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Gómez-Díaz, J. D., Márquez-Berber, S. R., & Valdés-Velarde, E. (2022). Composición florística y arreglo de sistemas agroforestales de cacao en Tabasco, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(67). <https://doi.org/10.56369/tsaes.3840>
- Motamayor, J. C., Lachenaud, P., da Silva e Mota, J. W., Loor, R., Kuhn, D. N., Brown, J. S., & Schnell, R. J. (2008). Geographic and Genetic Population Differentiation of the Amazonian Chocolate Tree (*Theobroma cacao* L.). *PLoS ONE*, 3(10), e3311. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311>
- Moura, V. B., Pantoja, L. P., Filho, E. H. C., Haber, R. A., Leandro-Silva, V., Costa, D. L. P., Júnior, M. A., Franco, T. M., Nery, M. K. M., Rua, M. L., & de Souza, P. J. de O. P. (2025). Current bioclimatic suitability and climate change impacts on the risk of cacao moniliasis invasion in Pará. *Ecological Modelling*, 505, 111106. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111106>
- Muñoz, D., Estrada, A., & Naranjo, E. (2005). Monos aulladores (*Alouatta palliata*) en una plantación de cacao (*Theobroma cacao*) en Tabasco, México: aspectos de la ecología alimentaria. *Universidad y Ciencia, Núm. Esp.*, 35–44. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15421204>
- Murillo-Cuevas, F. D., Adame-García, J., Cabrera-Mireles, H., Villegas-Narváez, J., & Rivera-Meza, A. E. (2020). Fauna edáfica e insectos asociados a las arvenses

- en limón persa, monocultivo y policultivo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), e2508. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2508>
- Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., & Anderson, R. P. (2014). ENM eval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198–1205. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261>
- Nicholls, C., Ríos, L., & Altieri, M. (2013). Agroecología y resiliencia al cambio climático: Principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8(1), 7–20. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/182921>
- Niether, W., Jacobi, J., Blaser, W. J., Andres, C., & Armengot, L. (2020). Cocoa agroforestry systems versus monocultures: A multi-dimensional meta-analysis. *Environmental Research Letters*, 15, 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb053>
- O'Donnel, M. S., & Ignizio, D. A. (2012). Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States (Data Series 691). In *Ecography* (Issue 5). Data Series 691. <https://doi.org/10.3133/ds691>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Obiakara, M. C., Etaware, P. M., & Chukwuka, K. S. (2020a). Maximum entropy niche modelling to estimate the potential distribution of *Phytophthora megakarya* Brasier & N. J. Griffin (1979) in tropical regions. *European Journal of Ecology*, 6(2), 23–40. <https://doi.org/10.17161/euroj ecol.v6i2.13802>
- OEIDRUS. (2023). *Sistema de Información Geográfica: padrones georreferenciados*. Oficina Estatal de Información Para El Desarrollo Rural Sustentable-Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal y Pesca de Tabasco. https://campotabasco.gob.mx/?page_id=1810
- Olusayo Okeniyi, M., Seun Okeniyi, T., & Bolanle Mustopha, F. (2021). Effects of climate change on pests and diseases, its awareness and adaptation strategies among Cocoa farmers in Abia State. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 10(3), 061–068. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2021.10.3.0227>
- Ortega Andrade, S., Páez, G. T., Fera, T. P., & Muñoz, J. (2017). Climate change and the risk of spread of the fungus from the high mortality of *Theobroma cocoa* in Latin America. *Neotropical Biodiversity*, 3(1), 30–40. <https://doi.org/10.1080/23766808.2016.1266072>
- Ortíz-García, C. F., Torres-de-la-Cruz, M. y Hernández-Mateo, S. (2015). Comparación de dos sistemas de manejo del cultivo de cacao en presencia de *Moniliophthora roreri* en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2), 191–196. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.2.191>
- Pardo, J. M., Gil-Ordóñez, A., Leiva, A. M., Enjelvin, L., Chourrot, A., Kime, S. C. K., Demade-Pellorce, L., Marchand, M., Wilson, V., Jeandel, C., loos, R., & Cuellar, W. J. (2024). First report of cassava witches' broom disease and

- Ceratobasidium theobromae* in the Americas. *New Disease Reports*, 50(2). <https://doi.org/10.1002/ndr2.70002>
- Pérez Sosa, E., & Granados Ramírez, G. R. (2020). Posibles efectos del cambio climático en la región productora de cacao en Tabasco, México. *Tlalli. Revista de Investigación En Geografía*, 3, 39–67. <https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1069>
- Perrine-Walker, F. (2020). *Phytophthora palmivora*–Cocoa Interaction. *Journal of Fungi*, 6(3), 167. <https://doi.org/10.3390/jof6030167>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2008). Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.008>
- Peterson, A. T., Papeş, M., & Soberón, J. (2015). Mechanistic and correlative models of ecological niches. *European Journal of Ecology*, 1(2), 28–38. <https://doi.org/10.1515/eje-2015-0014>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. (2017). Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893. <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Phillips-Mora, W., & Wilkinson, M. J. (2007). Frosty pod of cacao: a disease with a Limited Geographic Range but unlimited potential for damage. *Phytopathology*®, 97(12), 1644–1647. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-12-1644>
- Phillips-Mora, W., Cawich, J., Garnett, W., & Aime, M. C. (2006). First report of frosty pod rot (moniliasis disease) caused by *Moniliophthora roreri* on cacao in Belize. *Plant Pathology*, 55(4), 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01378.x>
- Phillips-Mora, W., Coutiño, A., Ortiz, C. F., López, A. P., Hernández, J., & Aime, M. C. (2006). First report of *Moniliophthora roreri* causing frosty pod rot (moniliasis disease) of cocoa in Mexico. *Plant Pathology*, 55(4), 584. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01418.x>
- Plasencia-vázquez, A. H., Vilchez-ponce, C. R., Ferrer-sánchez, Y., & Elena, C. (2022). Efecto del cambio climático sobre la distribución potencial del hongo *Moniliophthora roreri* y el cultivo de cacao (*Theobroma cacao*) en Ecuador continental. *Terra Latinoamericana*, 40: e1151. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1151>
- Qiu, Y., Steel, C. C., Ash, G. J., & Savocchia, S. (2016). Effects of temperature and water stress on the virulence of Botryosphaeriaceae spp. causing dieback of grapevines and their predicted distribution using CLIMEX in Australia. *Acta Horticulturae*, 1115, 171–182. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1115.26>
- Quiroz-Antúnez, U. G., Monterroso-Rivas, A. I., Calderón-Vega, M. F., & Ramírez-García, A. G. (2022). Aptitud de los cultivos de café (*Coffea arabica* L.) y cacao (*Theobroma cacao* L.) considerando escenarios de cambio climático. *La Granja*, 36(2), 1–15. <https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.05>
- R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org/>

- Ramírez-Barahona, S., Cuervo-Robayo, Á. P., Feeley, K. J., Ortiz-Rodríguez, A. E., Vásquez-Aguilar, A. A., Ornelas, J. F., & Rodríguez-Correa, H. (2025). Upslope plant species shifts in Mesoamerican cloud forests driven by climate and land use change. *Science*, 387(6738), 1058–1063. <https://doi.org/10.1126/science.adn2559>
- Rodríguez-Polanco, E., Morales, J. G., Muñoz-Agudelo, M., Segura, J. D., & Carrero, M. L. (2020). Morphological, molecular and pathogenic characterization of *Phytophthora palmivora* isolates causing black pod rot of cacao in Colombia. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(2), e1003. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-15147>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ríos-Bolívar, F. M., Garruña, R., Rivera-Hernández, B., Herrera, A., & Tezara, W. (2022). Effect of high concentrations of CO₂ and high temperatures on the physiology of Mexican cocoa. *Plant Stress*, 6, 100114. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100114>
- Rivera-Aguirre, D. A., Ortiz-Acosta, M. A., Bernal-Mendoza, H., Sánchez-Rojas, G., Ramírez-Bravo, O. E., & Jiménez-García, D. (2021). Impacto del cambio climático en la distribución potencial de tres cultivos agrícolas en México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 7(1), E0071015. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071015>
- Rodríguez-Polanco, E., Morales, J. G., Muñoz-Agudelo, M., Segura, J. D. y Carrero, M. L. (2020). Morphological, molecular and pathogenic characterization of *Phytophthora palmivora* isolates causing black pod rot of cacao in Colombia. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 18(2), e1003. <https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-15147>
- Rodríguez-Velázquez, N. D., Fernández-Pavía, S. P., Pineda-Vaca, D., Tlacuilo-Cano, J.-D., López-Guillén, G., Chávez-Ramírez, B., & Estrada-de los Santos, P. (2025). Genetic Diversity of *Moniliophthora roreri* from Cacao Trees Growing in the Soconusco Area, Chiapas, Mexico. *Plant Disease*, 109(6), 1303–1313. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-24-0873-RE>
- Sántiz Tovilla, R., Nadal, A., Salvatierra Izaba, B., Nazar Beutelspacher, D. A., & Bello Baltazar, E. (2023). Análisis de los factores que limitan a los pequeños productores en el desarrollo de la actividad cacaotera en México. *Agroalimentaria*, 29(56), 39–63. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.338855>
- Santos-Hernández, A. F., Monterroso-Rivas, A. I., Granados-Sánchez, D., Villanueva-Morales, A., & Santacruz-Carrillo, M. (2021). Projections for Mexico's tropical rainforests considering ecological niche and climate change. *Forests*, 12(2), 119. <https://doi.org/10.3390/f12020119>

- SIAP. (2022). *Datos Abiertos: Estadística de Producción Agrícola*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Soberon, J., & Peterson, A. T. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2(0). <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Soberón, J., Osorio-Olvera, L., & Peterson, T. (2017). Diferencias conceptuales entre modelación de nichos y modelación de áreas de distribución. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(2), 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.011>
- South, A., Michael, S., & Massicotte, P. (2024). *rnaturalearthdata: World Vector Map Data from Natural Earth Used in "rnaturalearth."* <https://cran.r-project.org/package=rnaturalearthdata>
- Suárez Contreras, L. Y. (2015). Identificación molecular de aislamientos de *Moniliophthora roreri* en huertos de cacao de Norte de Santander, Colombia. *Acta Agronómica*, 65(1). <https://doi.org/10.15446/acag.v65n1.47994>
- Suárez, G. M., Florido Bacallao, R., Soto Carreño, F., & Caballero Núñez, A. (2013). Bases para la zonificación agroecológica en el cultivo del cacao (*Theobroma cacao*, Lin) por medio del criterio de expertos. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 30–37. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193227648005.pdf>
- Suárez-Venero, G. M., Avendaño-Arrazate, C. H., Hernández-Ramos, M. A., Rodríguez-Larramendi, L. A., de los Santos, P. E., & Salas Marina, M. Á. (2021). Zonificación edafoclimática del cultivo de cacao en el estado Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(4), 629–641. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i4.2518>
- Surujdeo-Maharaj, S., Sreenivasan, T. N., Motilal, L. A., & Umaharan, P. (2016). Black pod and other *Phytophthora* induced diseases of cacao: History, biology, and control. In B. A. M. L. W. Bailey (Ed.), *Cacao Diseases: A History of Old Enemies and New Encounters* (pp. 213–266). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2_7
- Torres-de la Cruz, M., Mora-Aguilera, G., Ortiz-García, C. F., De la Cruz-Pérez, A., & Gaspar-Génico, J. Á. (2020). Flujos productivos determinan la estructura epidémica de la moniliasis del cacao en el sureste de México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 43(4), 431. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.4.431>
- Torres-de la Cruz, M., Mora-Aguilera, G., Ortiz-García, C. F., Gaspar-Génico, J. Á., Pérez-de la Cruz, M., & Acencio-Castillo, N. (2023). Climate, fruiting and frosty pod rot influence the epidemic intensity of *Phytophthora capsici* in cacao plantations in Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología, Mexican Journal of Phytopathology*, 41(1), 26–44. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2210-3>
- Torres-de-la-Cruz, M., Guillén González, C. A., Ortiz-García, C. F., De-la-Cruz-Pérez, A., Luna Rodríguez, M., & Cappello García, S. (2018). Hongos asociados al patosistema cacao en el estado de Tabasco, México. In J. Martínez Herrera, M. Á. Ramírez Guillermo, & J. Cámara-Córdova (Eds.), *Investigaciones científicas y agrotecnológicas para la seguridad alimentaria* (1a ed., pp. 216–2020). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; Instituto Nacional de

- Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
<https://archivos.ujat.mx/2019/div-daca/publicacion/ICASegAlim.pdf>
- Trinidad, F. W., Sol-Sánchez, Á., & Galindo-Alcántara, A. (2016). Evaluación de la rentabilidad económica y captura de carbono en plantaciones de cacao en el plan Chontalpa, Tabasco. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 2(1), 53–71. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v2i1.5680>
- Troya Guerrero, G., & Pino Meléndez, V. E. (2023). Microbiota asociada a plantaciones agroforestales de cacao y su impacto en la tolerancia al estrés abiótico. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 24–33. <https://orcid.org/0000-0003-0986-1651>.
- Usher, P. (1989). World Conference on the Changing Atmosphere: Implications for Global Security. *Environment*, 31(1), 25–27. <https://doi.org/10.1080/00139157.1989.9929931>
- Vázquez-Yañes, C., Batis-Muñoz, A. I., Alcocersilva, M. I., Gual-Díaz, M., & Sánchez-Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación* (Instituto de Ecología (UNAM), Ed.; México). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11004.54407>
- Walendorff, R., & Fantin, M. (2024). *Brazil faces moniliasis outbreak in commercial cocoa production*. <https://valorinternational.globo.com/agribusiness/news/2024/12/06/brazil-faces-moniliasis-outbreak-in-commercial-cocoa-production.ghml>
- Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*, 21(2), 335–342. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>
- Wisn, M. S., Pottier, J., Kissling, W. D., Pellissier, L., Lenoir, J., Damgaard, C. F., Dormann, C. F., Forchhammer, M. C., Grytnes, J. A., Guisan, A., Heikkinen, R. K., Høye, T. T., Kühn, I., Luoto, M., Maiorano, L., Nilsson, M. C., Normand, S., Öckinger, E., Schmidt, N. M., ... Svenning, J. C. (2013). The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: Implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*, 88(1). <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00235.x>
- WorldClim. (s.f.). WorldClim CMIP6 future climate data.
- Yzquierdo-Álvarez, M. E., Ortiz-García, C. F., Rincón-Ramírez, J. A., Aceves-Navarro, L. A., Ramos-Hernández, E., Palma-Cancino, P. J. y López-Buenfil, J. A. (2025). First report of *Phytophthora palmivora* causing black pod rot in cacao (*Theobroma cacao*) in three municipalities of Tabasco and one municipality of Chiapas, Mexico. *Plant Disease*, 109(2), 406. <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-25-0406-PDN>

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo abordó los impactos del cambio climático (CC) y las limitantes parasitológicas, socioeconómicas y climáticas sobre el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en México, el cual es cultivado en sistemas agroforestales (SAF). A través de una combinación de enfoques metodológicos —revisión del estado del arte, diagnósticos agrarios en campo en las dos regiones cacaoteras más importantes del país (Soconusco, Chiapas y Chontalpa, Tabasco) y modelación de nicho ecológico bajo escenarios de cambio climático—, se buscó comprender la vulnerabilidad multidimensional del sistema y proponer estrategias de adaptación y políticas públicas que fortalezcan la resiliencia y multifuncionalidad del sistema.

Los capítulos de revisión de literatura (capítulos 3 y 4) pusieron de manifiesto la interacción compleja entre el CC —que altera condiciones fisiológicas óptimas del cacao y amplifica el rango y severidad del patosistema del SAF entero— y desafíos socioeconómicos como la desorganización productiva y la debilidad de los marcos institucionales (incluidas políticas públicas históricamente desfavorables). Se identificaron nuevas plagas y enfermedades emergentes como consecuencia del cambio ambiental global y se destacó la necesidad de un monitoreo preventivo multiescalar consistente, así como un manejo integrado del cultivo (MIC) y prácticas agroecológicas. Las cuales emergen como alternativas viables para reducir la incidencia de enfermedades del cacao (incluyendo la moniliasis y la mancha negra), así como para la mejora de los rendimientos y para potenciar los servicios ecosistémicos y socioeconómicos de estos SAF. Asimismo, se subrayó la importancia del diálogo de saberes, el fortalecimiento de la acción colectiva y de las políticas que promuevan respuestas institucionales eficientes ante crisis climáticas y fitosanitarias (retomando el caso de la mal-adaptación al CC en el caso de la roya del cafeto en Chiapas), así como el acceso a mercados alternativos, el pago por servicios ambientales, así como el fomento y regulación de los sistemas forestales que el SAF ostenta. El caso retomado de la roya del cafeto implicó la simplificación y homogeneización de los SAF café, lo cual aumentó la vulnerabilidad ante el CC de este sistema, similarmente como ocurrió con la moniliasis en el cacao.

El diagnóstico en Soconusco, Chiapas (capítulo 5) reveló que la mayoría de las unidades productivas (UP) son de subsistencia, con el cacao en un rol económico secundario frente a sistemas productivos (SP) más rentables (palma africana, ganadería, café robusta, etc.), pero que esto se ve mediado por el tamaño de la parcela, la cantidad de ingresos complementarios (asalariados, gubernamentales y por SP alternos), así como por la vinculación y el manejo por parte del productor. No obstante, los SAF de cacao en policultivo tradicional con MIC —como el de Cuarto Cantón— se distinguieron por su alta multifuncionalidad, diversidad arbórea, rendimientos superiores y mayor autosuficiencia. Sin embargo, este tipo de manejo exige un esfuerzo físico considerable por parte del productor y un soporte institucional sólido, que fomente y priorice no solo los aspectos productivos en contextos de productores atomizados, sino también los ambientales y sociales. Ello implica fortalecer la asociatividad y mecanismos de valorización de servicios ambientales, sustentados en una base científica robusta que respalda el papel imprescindible de los SAF café y cacao en la sostenibilidad y la multifuncionalidad agraria regional. Estos sistemas de policultivo tradicional y el sistema en restos de selva (donde se indicaron más afectaciones por la fauna nativa que por enfermedades), también conservan remanentes de selva original que contribuyen a la termorregulación local y a la resiliencia territorial frente a alteraciones hidrológicas y climáticas, cada vez más agravadas por el CC. El capítulo también evidencia la tendencia hacia monocultivos (que no incluyen cacao) más rentables pero menos sostenibles en el Soconusco, y se recomendó impulsar nuevos programas agroecológicos o reforzar los programas gubernamentales actuales. Para lo cual sería necesario hacer una orientación de dichos programas desde la diversificación productiva, la asociatividad, la trazabilidad y el pago por servicios ambientales como ejes estratégicos.

En la Chontalpa, Tabasco (capítulo 6), el diagnóstico evidenció diferencias marcadas entre productores orgánicos y convencionales: los primeros lograron un mejor control de enfermedades, mayores rendimientos y una capacidad superior de adaptación al CC. Este desempeño se explicó por la aplicación amplia de prácticas agroecológicas —en particular la asociatividad, la vinculación, la trazabilidad y un mayor nivel de manejo (más innovaciones agrícolas)—, lo que se tradujo en una mayor estabilidad financiera. Entre

los productores convencionales, solo aquellos con ingresos diversificados y actividades económicas complementarias alcanzaron una capacidad de adaptación al CC comparable la de los productores orgánicos. Además, se documentaron diversas estrategias locales de adaptación al CC —como la diversificación de especies e ingresos, el manejo de árboles de sombra, la cobertura vegetal con mulch para conservar la humedad, la aspersión de fertilizantes foliares en la temporada de secas y el uso de camellones para el cultivo de plátano—; sin embargo, persisten limitantes estructurales como el envejecimiento de los productores, la escasez de mano de obra, la dependencia de subsidios y la baja rentabilidad. El capítulo subrayó la necesidad de políticas diferenciadas que impulsen el MIC, el diálogo de saberes, el desarrollo de variedades resistentes a la sequía, el acceso a mercados de cacao fino de aroma y esquemas de pago por servicios ambientales. En este sentido, se enfatizó la importancia de recuperar y, en su caso, replicar las experiencias exitosas de las asociaciones orgánicas.

La modelación del nicho ecológico (capítulo 7) confirmó la alta sensibilidad del cacao a variaciones térmicas y déficits hídricos. Se proyectaron reducciones netas de su distribución potencial (DP) nacional a largo plazo (2081-2100), entre -2.6 % y -5.4 % según el escenario de CC, con pérdidas en regiones tradicionales de cultivo como la Chontalpa en Tabasco, el Soconusco en Chiapas y en áreas de las costas del Pacífico. De manera simultánea, *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora capsici* mantendrían (horizonte 2041-2060) o ampliarían (horizonte 2081-2100) su DP en áreas de DP futura de *T. cacao* a mayores altitudes. Aunque se previeron ganancias de idoneidad (DP) en zonas de mayor altitud, ello implicaría una reconfiguración de los paisajes productivos actuales. Ante ese contexto, en este capítulo se recomendó profundizar en el estudio de las respuestas del microclima frente al clima regional y de las respuestas del cacao según su grupo genético, dado que ciertos genotipos muestran mayor tolerancia al estrés hídrico —agravado por el CC— y algunos ya presentan resistencia a enfermedades. Asimismo, se planteó la necesidad de un manejo adecuado de la sombra en los SAF, la selección de variedades resistentes a condiciones climáticas marginales (siempre que se conserve el germoplasma local), y la mejora de la microbiota edáfica (que mejora la tolerancia del cacao al estrés hídrico). Se subrayó también la necesidad del desarrollo de materiales

genéticos más resistentes al estrés hídrico, la instauración de sistemas institucionalizados de monitoreo climático y fitosanitario, y la implementación de políticas que reconozcan y fortalezcan a los SAF como estrategias centrales de mitigación y adaptación al CC.

En conjunto, los hallazgos convergen en que el CC agravará las limitantes parasitológicas y socioeconómicas del cacao mexicano, pero que los SAF bien manejados —con alta diversidad, MIC y organización colectiva— pueden amortiguar impactos y generar co-beneficios (captura de carbono, regulación hídrica, conservación de la biodiversidad y de la agrobiodiversidad, ingresos diversificados, entre otros). Metodológicamente, la combinación de revisión bibliográfica, diagnósticos participativos en campo y modelación predictiva permitió construir una visión integral y multiescalar: desde lo histórico hasta lo actual (estado del arte), y desde lo local (percepciones y prácticas reales) hasta lo regional y continental (proyecciones bioclimáticas). Esta triangulación refuerza la solidez de las conclusiones y evidencia que la resiliencia al cambio climático en los SAF de cacao no depende únicamente de factores biofísicos, sino también del fortalecimiento del capital social, de políticas contextualizadas y de una transición agroecológica integral. Esta última contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas, optimizar el manejo agronómico y retoma los principios del MIC.

Las recomendaciones de política pública que emergieron de forma consistente a lo largo de todo el trabajo configuran un marco integral (rescate, preservación y gestión patrimonial de los SAF cacao) y urgente para la sostenibilidad del sistema cacaotero mexicano. En primer lugar, se requiere el diseño e implementación de políticas diferenciadas y específicas al cultivo de cacao en SAF, que prioricen la transición agroecológica mediante el impulso al MIC, la diversificación productiva (variedades, cultivos, SP y fuentes de ingreso mediante la extensión de las cadenas de valor), la rehabilitación constante de los SAF y la conservación de la agrobiodiversidad, incluyendo el rescate y difusión de variedades nacionales tolerantes a las enfermedades y al estrés hídrico (algunas de las cuales ya han sido desarrolladas por instituciones como el INIFAP). Paralelamente, deben fortalecerse la asociatividad y el capital social mediante el rescate y escalamiento de experiencias exitosas de las asociaciones de cacao

orgánico, el fomento de mercados diferenciados (cacao fino de aroma, comercio justo, trazabilidad ambiental) y la creación de programas de diálogo de saberes que integren conocimiento tradicional, investigación científica y asistencia técnica contextualizada. Además, resulta imprescindible establecer mecanismos institucionalizados de monitoreo fitosanitario y climático, junto con respuestas institucionales eficaces ante brotes emergentes, así como un sistema robusto de pago por servicios ambientales para los SAF más multifuncionales y con mayor biodiversidad —ya sea de carácter federal o vinculado a mercados voluntarios de carbono— que sea generalizado y de fácil acceso, sin excesiva burocracia. Los programas vigentes (Sembrando Vida y Producción para el Bienestar), que ya son un esfuerzo gubernamental considerable, deben ampliar su alcance y fortalecerse mediante lo señalado previamente; o bien, replantearse programas a largo plazo que retomen los principios aquí plasmados y las experiencias de tales programas. A ello se suma la necesidad de fortalecer el sistema forestal que estos SAF ostentan, pues existe un alto potencial para desarrollar un comercio de maderas tropicales que supla parte de las demandas no satisfechas a nivel estatal e incluso nacional y de forma colateral, se mejore y diversifique el ingreso de los productores. En su estado actual, los productos maderables poseen un carácter principalmente local y suelen emplearse únicamente en situaciones de emergencia familiar. No obstante, su aprovechamiento sostenible podría generar sinergias significativas con los SAF vigentes —y con aquellos que requieren rediseño frente al CC—, al tiempo que abriría la posibilidad de consolidar un mercado más amplio y competitivo.

Quedan pendientes varias preguntas de investigación que pueden orientar trabajos futuros. En primer lugar, ¿cómo escalar de manera exitosa las experiencias locales de MIC y de asociatividad en esquemas orgánicos-agroecológicos hacia niveles regionales y nacionales, evitando reproducir desigualdades de acceso? En segundo término, ¿qué variables edáficas, genotípicas y de manejo de sombra deberían incorporarse a los modelos de nicho para reducir la incertidumbre en las proyecciones de DP, especialmente en escenarios de migración altitudinal? En tercer lugar, ¿es factible diseñar e implementar planes regionales de pago por servicios ambientales específicos para los SAF de cacao que resulten financieramente viables y socialmente justos? Finalmente, ¿cómo articular

de manera eficaz el diálogo de saberes entre conocimiento tradicional, investigación científica y políticas públicas para mejorar la difusión de variedades mejoradas (conservando variedades locales) y prácticas adaptativas y para la mejora del capital social? Además, también resulta imprescindible plantear los mecanismos y fondos que garanticen la viabilidad de las propuestas. Ello implicaría definir con claridad de dónde provendrán los recursos financieros —ya sea mediante programas federales o fondos internacionales de cooperación climática— y cómo fortalecer el capital humano necesario para su implementación. La formación de nuevas generaciones de productores, el acompañamiento técnico especializado y la consolidación de redes de asociatividad serán determinantes para que el sistema cacaotero mexicano transite de la vulnerabilidad actual hacia un modelo sostenible, resiliente y patrimonial.

APÉNDICES

Apéndice 1. Plagas y enfermedades del cacao reportadas en la literatura para México

Plagas

Especies	Descripción
Barrenador, <i>Xyleborus volvulus</i> (Fabricius)	Afecta a árboles de sombra del cacao. Es un insecto barrenador de árboles en cualquier condición sanitaria. Induce el manchado de trocería, por los hongos que cohabitan con ellos (Cibrián T. <i>et al.</i> , 1995). Ver la siguiente tabla para detalles de esos hongos.
Barrenador, <i>Xyleborus ferrugineus</i> (Fabricius)	Se le considera uno de los barrenadores ambrosiales de mayor importancia económica; infesta madera recién cortada y provoca la muerte de árboles sanos al introducir hongos causantes de marchitamientos vasculares fúngicos: puede introducir la enfermedad de <i>Ceratocystis cacaofunesta</i> Engelbr. & T.C.Harr., agente causal del mal del machete (Cibrián T. <i>et al.</i> , 1995).
<i>Pantophthalmus bellardii</i> (Bellardi)	Dípteros (moscas) cuyas larvas perforan o barrenan la madera sólida de árboles vivos (y de importancia forestal). Se distribuye en varios países de centro y Suramérica, además, se ha reportado atacando a <i>Theobroma cacao</i> L. en Ecuador. Se ha registrado en Chiapas y Veracruz (Cibrián T., 2017).
Escarabajo ambrosial, <i>Corthylus spinifer</i> E.A.Schwarz	Afecta al cacao y a sus árboles de sombra. Atacan el fuste y las ramas de árboles vivos. Introducen hongos manchadores de la madera y facilitan el establecimiento de hongos causantes de canchros (Cibrián T. <i>et al.</i> , 1995).
Trips de banda roja, <i>Selenothrips rubrocinctus</i> (Giard)	Las larvas y los adultos se alimentan del follaje y la fruta, perforando la epidermis, prefieren el follaje joven y su alimentación causa el plateado de las hojas, además de su distorsión y caída; destruye las células de las que se alimenta, causa lesiones a la fruta y deja gotas de color oscuro antiestéticas (Flores J., 1976; Hernández-Gómez <i>et al.</i> , 2015).
Gusano lagarta, <i>Hemeroblemma mexicana</i> Guenée y <i>Hemeroblemma numeria</i> (Drury)	Sus larvas atacan hasta a un tercio de los frutos jóvenes de cacao, consumiéndoles de forma parcial o total, eliminándoles o dañando su calidad, a la vez que fomentan la entrada de microorganismos patógenos. De igual forma, se alimentan de hojas tiernas de cacao. Registro de Huimanguillo, Tabasco. Bajo sombra deficitaria, al igual que los trips, pueden incrementar sus poblaciones (Gerónimo-Cruz <i>et al.</i> , 2015; Ortiz & Sánchez, 2008; Sánchez Soto, 1995). Es interesante que sucede lo contrario con los pulgones y el salivazo: nicho complementario.
Salivazo, <i>Clastoptera</i>	Las ninfas succionan la savia de las flores de cacao (u otras plantas aledañas) y pueden ocasionar la marchitez de incluso el

<i>laenata</i> Fowler	75 % de las flores infestadas. Dichas ninfas se anclan en un lugar fijo, donde excretan espuma con el fin de protegerse del exterior. <i>C. laenata</i> es la especie más polífaga de su género en México: se puede encontrar sobre árboles y arbustos de varias familias botánicas. Presenta un pico poblacional en la temporada lluviosa, en agosto. Los cambios en los niveles de precipitación y floración influyen de manera notable en la fluctuación poblacional de adultos y ninfas, respectivamente (Cibrián T., 2017; Gerónimo-López <i>et al.</i> , 2013). Lugar: Huimanguillo, Tabasco.
Pulgón negro (de los cítricos), <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer de Fonscolombe)	En la zona subtropical es oligófago (hábitos de alimentarse escasamente) o monófago (principalmente de <i>Citrus</i> spp.). Daños: succiona la savia del hospedante y puede causar daños similares a los que ocasionan los trips. Se ha registrado tanto en Tabasco como en Chiapas. El uso de hongos entomopatógenos <i>Akanthomyces lecanii</i> (Zimm.) Spatafora, Kepler & B. Shrestha (sinonimia de <i>Lecanicillium lecanii</i> (Zimm.) Zare & W. Gams y <i>Verticillium lecanii</i> (Zimm.) Viéga) para el control biológico de este áfido ha sido evidenciado (Cortez-Madrigal <i>et al.</i> , 2003; Flores 1976; Hernández-Gómez <i>et al.</i> , 2015).
Hormigas de diferentes especies, incluyendo <i>Atta</i> spp. y <i>Ectatomma tuberculatum</i> (Olivier)	Los zompopos, chicatanas, hormigas cortadoras de hojas u hormigas arrieras pueden representar un problema en la producción de cacao debido a que cortan las hojas y perforan los troncos de los árboles del SAF. <i>E. tuberculatum</i> incluyen en sus estrategias de aprovisionamiento tanto de forrajeos individuales como grupales, arbóreos y terrestres; es posible que la anidación sea polidómica (pues existe intercambio de individuos entre nidos sin agresión). Su alimento (abastecimientos líquidos azucarados) procede principalmente de áfidos, membrácidos (Insecta; Hemiptera) y nectarios extraflorales presentes en el cacao (García-Pérez <i>et al.</i> , 1991; Hernández-Gómez <i>et al.</i> , 2015).
Abeja sin aguijón, <i>Trigona fuscipennis</i> Friese	Insectos sociales (colonias de hasta 5 individuos), polinizadores florales y productores de miel. Daño de las partes vegetativas: comúnmente a la lámina foliar de las hojas tiernas, en ocasiones las defolia en más del 50% y en otras solamente muerde los márgenes de unas cuantas. Es menos común el daño de los pedúnculos de flores y pericarpio de mazorcas de cacao tiernas ("chilillos"). En mazorcas dañadas por ardillas y pájaros, con frecuencia se alimentan del mucílago. Los daños son focalizados en ciertas plantas (López-Guillén <i>et al.</i> , 2021). Primer registro sobre cacao a nivel nacional e internacional (2021) en el Soconusco, Chiapas.
<i>Aleurodicus floccissimus</i> (Martin,	Este hemíptero es polífago: se alimenta de al menos 93 especies, entre frutales tropicales y ornamentales (Cortéz-

Hernández-Suarez & Carnero) = <i>Lecanoideus floccissimus</i> Martin, Hernández-Suarez & Carnero	Madrigal <i>et al.</i> , 2008). Ocasiona daños directos al succionar la savia de la planta, e indirectos, al ocasionar excreciones de mielecilla en donde proliferan fácilmente hongos “fumagina” (<i>Capnodium</i> spp.), que pueden causar caída prematura de hojas, y en infestaciones fuertes, matar a la planta. Se presenta en colonias; un tamaño medio de 3 mm y un color blanco característico, su parecido es más al de una palomilla que al de un hemíptero común. En plantaciones viejas de cacao la incidencia es estadísticamente superior y los niveles poblacionales se comportan de forma inversa (respecto a plantaciones jóvenes). Su proliferación es más rápida en plantaciones de edad avanzada (mayor a 35 años) y a una baja diversidad y actividad de enemigos naturales. Sus principales enemigos naturales son <i>Ceraeochrysa</i> sp. (un depredador) y algunos parasitoides de la familia Aphelinidae; su mayor actividad se da sobre los huevos y durante los primeros instares de la plaga. Esta se correlaciona (de forma moderada) con la temperatura, pero no con la precipitación. Se registró por primera vez atacando a cacao en México (en la Chontalpa) en 1998 tras pasar desapercibida, debido a poblaciones bajas previamente (Cortéz-Madrigal <i>et al.</i> , 2008).
Cochinilla rosada del hibisco, <i>Maconellicoccus hirsutus</i> (Green)	Especie polífaga (ataca a más de 300 especies) y es de importancia económica y cuarentenaria a nivel mundial; sujeta a control oficial en México. Unas 23 especies de los SAF cacao en Tabasco son sus hospedantes. Cuando se alimenta inyecta una saliva tóxica que altera y reduce el crecimiento de tejidos y frutos. También, induce defoliación, aborto de flores, muerte de las ramas (e incluso de la planta). Excreta una mielecilla que el hongo “fumagina”, <i>Capnodium</i> spp., usa como sustrato; la cual, a su vez, reduce la capacidad fotosintética de la planta (Hernández-Lara <i>et al.</i> , 2020; SENASICA, 2019a; Torres-de la Cruz <i>et al.</i> , 2019). Primer registro en <i>T. cacao</i> para el país (Jalpa de Méndez, Tabasco) en 2018.
Polilla del penacho del cacao, <i>Michaelophorus nubilus</i> (Felder & Rogenhofer)	Especie de hábitos nocturnos, cuyas larvas se alimentan de hojas tiernas, yemas florales, así como de ramas principales o laterales. En ocasiones se notan hasta 15 larvas en cada yema. En varios brotes se consume más del 50% de la hoja. Las larvas próximas a la pupación son poco activas y se ubican sobre el pedicelo de los brotes. Se registraron varios adultos en huertas con mucha sombra y poco manejo agronómico. Especie previamente reportada en países de Centro y Suramérica como monófago en cacao (López-Guillén <i>et al.</i> , 2020). Primer reporte de <i>M. nubilus</i> para México (en el sureste de Chiapas) durante el ciclo 2018-2019.

Enfermedades

Enfermedad	Descripción
Cancro por <i>Lasiodiplodia theobromae</i> (Pat.) Griffon & Maubl.	Parásito oportunista que ataca a árboles que se encuentran en situación de estrés. Presenta más de 500 hospedantes, de naturaleza diversa. Los síntomas más evidentes son la muerte de puntas o de ramas laterales, presencia de canchales y pinchidos en la corteza, e incluso la muerte del árbol. Vive como endofítico, pero cuando se debilita el árbol (ya sean días o años), se torna patógeno. Su manejo se basa en la buena elección o mejora del terreno sitio-específico, en la eliminación y quema de partes o individuos infectados. La aplicación de fungicidas no es generalizada y debe ser complementaria a la mejora del sitio. Taxonomía del género poco conocida en México (Bautista-Cruz <i>et al.</i> , 2019; Cibrián-Tovar <i>et al.</i> , 2007; Moreira-Morrillo <i>et al.</i> , 2021). Pese a concentrarse en plantas tropicales, es potencialmente capaz de propagarse como endofito en plantas de zona templada como consecuencia del cambio global (incluido el cambio climático). A la fecha se han descrito para el género más de 30 especies adicionales a <i>L. theobromae</i> , así como varias de sus hibridaciones (Salvatore <i>et al.</i> , 2020). Sin embargo, en SAF de cacao y <i>Terminalia</i> spp. de Camerún, no se encontró evidencia de hibridación de <i>L. theobromae</i> con la especie relacionada y cohabitante <i>Lasiodiplodia pseudotheobromae</i> A.J.L. Phillips, A. Alves & Crous. Análisis filogeográficos sugirieron que la dispersión a gran escala de <i>L. theobromae</i> deriva de manera esencial del comercio y las actividades humanas (Mehl <i>et al.</i> , 2017). Esto implica que su distribución se potencia con la globalización y con el cambio global. En África esta especie es de gran relevancia, pues es bien conocido y documentado el gran potencial que posee para pudrir al fruto del cacao (CABI, 2021).
Mal de machete (causado por <i>Ceratocystis fimbriata</i> Ellis & Halst. <i>sensu lato</i> , del cual <i>Ceratocystis cacaofunesta</i> Engelbr. & T.C. Harr. es una especie diferenciada)	<i>C. cacaofunesta</i> provoca marchitamientos vasculares que pueden llevar a la muerte de ramas o incluso de árboles completos. Este fitopatógeno tiene como hospedantes a al menos 30 especies. Los individuos a los que ataca no siempre muestran síntomas tempranos, sino que mueren repentinamente, lo que dificulta su control oportuno y favorece su diseminación. Se ha sugerido que <i>Xyleborus ferrugineus</i> (Fabricius) es vector de este hongo, pero se requiere mayor investigación al respecto (Cibrián T. <i>et al.</i> , 1995; Cibrián-Tovar <i>et al.</i> , 2007; Paladines-Rezabala <i>et al.</i> , 2022). Tales autores indican que las ascosporas y conidios del hongo se dispersan por la lluvia o mediante herramientas de corte contaminadas, lo que da origen a su nombre común: “mal del machete”. Además, los insectos pueden contribuir a su propagación al ingerir y transportar esporas, y el viento también

puede facilitar su diseminación. La infección puede producirse por contacto entre raíces infectadas y raíces sanas (injerto de raíz). Además, el hongo puede permanecer latente durante largos periodos en el tejido vegetal dañado o en el suelo, en forma de aleuroconidios, incluso bajo condiciones ambientales adversas. El manejo preventivo incluye la esterilización rigurosa de herramientas entre cada árbol, utilizando alcohol o benomil sobre las superficies afectadas. Además, la eliminación oportuna de árboles enfermos puede reducir significativamente el inóculo presente en el sistema. Asimismo, se recomienda evitar daños en las partes bajas de la planta y proteger cualquier herida con pasta bordelesa o alquitrán vegetal (Cibrián T. *et al.*, 1995; Cibrián-Tovar *et al.*, 2007).

Nematodos de lanceta, género *Hoplolaimus* Nematodos migratorios que parasitan al cacao y a al menos otras nueve especies en México, que se alimentan de las raíces secundarias. Presentan una amplia distribución nacional (al menos 12 estados) y mundial. De 29 especies conocidas solo tres son de importancia agrícola (en cultivos anuales y perennes) y forestal: *Hoplolaimus columbus* Sher, *Hoplolaimus galeatus* (Cobb) y *Hoplolaimus magnistylus* Robbins (Bae *et al.*, 2008). Causan necrosis y destruyen el sistema radical, en ocasiones producen cavidades e inducen destrucción de la endodermis y ocasionan numerosas divisiones celulares anormales, así como formación de tilosas. Se presenta tanto en vivero como en plantación. Produce clorosis en el follaje y el achaparramiento leve de las plantas. Para su manejo en vivero, de forma preventiva, se recomienda fumigar el suelo con un fumigante, aunado al uso de enmiendas orgánicas y, en la medida de lo posible, realizar una rotación de cultivos (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007; Orisajo, 2009).

Nematodos lesionadores de raíces, género *Pratylenchus* Nematodos migratorios con gran similitud de hospedantes con los nematodos anteriores (de lanceta). Estos presentan polifagia: se alimentan de la mayoría de las especies forestales que *Hoplolaimus*. Esto es, al menos 14 especies en total aparte del cacao, como son el coco (*Cocos nucifera* L.), el nogal (*Juglans regia* L.) y el café arábigo (*Coffea arabica* L.), entre otras. Su distribución a nivel nacional es amplia (21 estados hasta 2007, tanto en zonas templadas como tropicales), al igual que lo es su distribución a nivel mundial. Su patogenicidad es alta: producen lesiones necróticas y oscuras en la raíz. De hecho, en suelos altamente infestados es posible que las lesiones coalescan y provoquen el trozamiento y muerte de raíces. Los síntomas de las plantas que infectan también son similares a los provocados por *Hoplolaimus*. Todos los estadios producen lesiones y es posible hallar grandes cantidades de cada estadio al mismo tiempo (superposición generacional) en las raíces. Su ciclo biológico es de menos de un mes. Puede sobrevivir

en el suelo cuando no hay hospedantes durante varios meses. Ciertas especies son partenogenéticas. La aplicación de nematicidas fumigantes al suelo previo a la plantación puede proteger a cultivos perennes hasta por cuatro años. También, en la medida de lo posible, se debe dejar descansar el terreno un par de meses y colocar cubiertas (naturales o artificiales), disminuir arvenses hospedantes, etc. (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007). De hecho, *Paratylenchus coffeae* Zimmermann es una plaga cuarentenaria en México (y tiene como hospedante al cacao). Por lo tanto, este puede causar pérdidas económicas importantes, sobre todo en plátano, café y cítricos (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007; SENASICA, 2016)

Nematodos
barrenadores,
género
Radopholus

Nematodo endoparásito migratorio de las raíces (en el parénquima cortical) y cormos, polífago: cítricos, plátano y cacao. De distribución amplia, pero no generalizada, en el sureste y noroeste del país. Causan la enfermedad del acame o cabeza negra del plátano, una de sus principales enfermedades a nivel mundial, la cual destruye el sistema de anclaje y provoca la caída de las plantas previo a su cosecha. Su forma de diagnóstico implica un aclaramiento de las raíces afectadas, tras un coloramiento café y formación de cavidades, que eventualmente pueden coalescer, podrirse y contagiar a la corteza del rizoma. De igual modo, se presenta defoliación prematura y reducción de la vigorosidad de la copa de la planta: el crecimiento de la planta y la calidad del fruto se reducen, posteriormente las plantas caen. Además, las cavidades formadas dan paso a la invasión de patógenos secundarios. En plantaciones establecidas se pueden aplicar nematicidas granulados o líquidos en los manchones (cada 4-5 meses); en áreas de replante: rotar con cultivos no hospedantes (durante 2-3 años) o dejar el terreno en descanso, plantar materiales sanos y aplicar nematicidas a la zanja (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007).

Nematodos
daga, género
Xiphinema

Son nematodos ectoparásitos migratorios que se alimentan y viven de las raíces. Se encuentran en casi todos los estados de México y son polípagos: tienen como hospedantes, además del cacao, a al menos 12 especies. Son transmisores eficientes de virus poliédricos (género *Nepovirus*), varios de importancia agrícola, aunque mayormente en Ghana y Nigeria para el caso del cacao. Los síntomas de estos virus también se pueden presentar en la planta afectada. Inducen raíces principales engrosadas, dado que al alimentarse inhiben el crecimiento de raíces laterales (raicillas) y pueden inducir agallas. Los suelos arenosos les son benéficos. Algunas especies son partenogenéticas y su ciclo de vida es largo (hasta 7-9 meses). El control químico con cloropicrina, metilisotiocianato o mezclas de ambos es prácticamente la única

vía exitosa de prevención y el efecto puede durar varios años. Entre renovaciones se pueden cultivar cereales (como cebada, centeno o trigo) para reducir sus poblaciones. Para la identificación de todos los nematodos listados anteriormente existen diferencias morfológicas sustanciales entre machos y hembras (dimorfismo sexual), así como entre géneros, por ejemplo, por la ubicación de la apertura vulvar (Cibrián-Tovar *et al.*, 2007).

Fumagina,
Capnodium sp.

La infestación por trips de banda roja, pulgones, mosca blanca o cochinilla rosada del hibisco facilitan la entrada y proliferación en la planta; dichos insectos excretan cantidades grandes de una mielecilla (azúcares secundarios) que el hongo fumagina usa como sustrato. En tales condiciones, puede darse la reducción de la actividad fotosintética o la caída prematura de hojas, y en infestaciones fuertes, incluso la muerte de la planta. Es común en cítricos, pero también se da en cacao, con frecuencia sobre las hojas. Su apariencia es similar a la del hollín, en coloración más clara y textura equivalente. Para su manejo, que debe ser indirecto, deben reducirse los niveles de infestación de los insectos mediante la disminución de la sombra y el fomento de sus enemigos naturales. Por ejemplo, la mosca blanca presenta una relación positiva de los niveles de infestación con la avanzada edad de las plantaciones; por tanto, resulta necesaria la renovación continua de la plantación (Cortéz-Madrigal *et al.*, 2008; Hernández-Lara *et al.*, 2020; Torres-de la Cruz *et al.*, 2019).

Bubas o agalla
de puntos
verdes,
causadas por
Albonectria
rigidiuscula
(Berk. &
Broome)
Rossman &
Samuels

Su fase complementaria asexual es *Fusarium decemcellulare* Brick. Afecta a cacao y a otros árboles tropicales, al igual que a las plántulas de cacao, mediante su marchitez. Es importante también en Centro y Sudamérica, África y Sri Lanka. Provoca dos tipos de síntomas: una es la agalla en cojín o hipertrofia del cojín floral (lesiones); el otro síntoma es la muerte regresiva o el desarrollo de ramas debilitadas. Es más común en árboles estresados y en tejidos dañados por insectos. En los meses húmedos su incidencia es mayor y su presencia se evidencia más fácilmente; a veces se confunde con otras enfermedades debido a que es una enfermedad secundaria, pues coloniza la planta tras el ataque de otros fitopatógenos y plagas, incluyendo *Phytophthora* spp., *L. theobromae* u otros patógenos, o bien, por cochinillas (familia Pseudococcidae) (Alcalá-Álvarez, 1982; Bailey & Meinhardt, 2016; Delgado-Ospina *et al.*, 2021).

Antracnosis por
Colletotrichum
gloeosporioides
(Penz.) Penz. &
Sacc. *sensu*
lato

Enfermedad común en plantas juveniles de cacao (Alcalá-Álvarez, 1982). Se puede aplicar caldo bordelés en la misma dosis que en la mancha negra (Rojo-Báez *et al.*, 2017; Romero-Cortes *et al.*, 2015).

<i>Nepovirus</i> , <i>Badnavirus</i> o virus poliédricos	Los nepovirus o virus poliédricos causan afectaciones a toda la planta. Son transmitidos de forma eficiente por nematodos <i>Xiphinema</i> (Cibrián-Tovar <i>et al.</i> , 2007).
Pudrición (del fruto) por <i>Nodulosporium</i> sp.	Presenta una distribución tropical amplia, se ha informado de su patogenicidad en plantas de cacao criollo en fechas recientes (2019) en México (Villa Comaltitlán, Chiapas). Causa muerte descendente, pudrición y resinosis del hospedante, aunque también tiene potencial como agente de control biológico de algunos otros hongos y oomicetos. Es un hongo facultativo: endófito, saprófito o fitopatógeno débil. Además, su teleomorfo, <i>Hypoxyton</i> spp. afecta el follaje de la planta: provoca clorosis y desecación de la hoja. La recuperación del hongo se da mediante picnidios y micelio con conidios (González-Ruiz <i>et al.</i> , 2019).
La roña o podredumbre de <i>Cladosporium</i> por <i>Cladosporium</i> <i>cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	Esta enfermedad no es específica del cultivo de cacao. Puede ocasionar pérdidas económicas significativas si no es controlada. Esta puede matar total o parcialmente a la planta (ramas), afectar la fructificación y producción, así como la calidad del fruto, pero no a la pulpa ni el grano. Sin embargo, la apariencia y aceptación de los frutos para el consumidor se ve reducida. De las más de 700 especies que comprende este género, <i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link y <i>C. cladosporioides</i> son dos de las más predominantes, tanto en los ambientes internos como externos, en prevalencia con la materia orgánica en descomposición. Se ha probado el micoparasitismo <i>in vitro</i> de <i>Trichoderma harzianum</i> Rifai contra esta enfermedad, con resultados satisfactorios (Romero-Cortes <i>et al.</i> , 2015).

Literatura citada

- Alcalá-Álvarez, A. (1982). *Problemática del cacao en el estado de Chiapas, México* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara].
- Bae, C. H., Szalanski, A. L., & Robbins, R. T. (2008). Molecular analysis of the lance nematode, *Hoplolaimus* spp., using the first internal transcribed spacer and the D1-D3 expansion segments of 28S ribosomal DNA. *Journal of Nematology*, 40(3), 201–209.
- Bailey, B. A., & Meinhardt, L. W. (Eds.). (2016). *Cacao diseases: A history of old enemies and new encounters*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24789-2>
- Bautista-Cruz, M. A., Almaguer-Vargas, G., Leyva-Mir, S. G., Colinas-Léon, M. T., Correia, K. C., Camacho-Tapia, M., Robles-Yerena, L., Michereff, S. J., & Tovar-Pedraza, J. M. (2019). Phylogeny, distribution, and pathogenicity of *Lasiodiplodia* species associated with cankers and dieback symptoms of *Persian lime* in Mexico. *Plant Disease*, 103(6), 1156–1165. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-18-1036-RE>

- Cibrián T., D. (Ed.). (2017). *Fundamentos de entomología forestal* (1.^a ed.). Universidad Autónoma Chapingo; Red Temática de Salud Forestal; Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; Comisión Nacional Forestal.
- Cibrián T., D., Méndez M., J. T., Campos B., R., Yates III, H. O., & Flores L., J. E. (1995). *Insectos forestales de México*. Universidad Autónoma Chapingo; Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; United States Department of Agriculture, Forest Service; Natural Resources Canada; Comisión Forestal de América del Norte, FAO.
- Cibrián-Tovar, D., Alvarado Rosales, D., & García Díaz, S. E. (2007). *Enfermedades forestales en México*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://books.google.com.mx/books?id=5VEmAQAAMAAJ>
- Cortez-Madrigal, H., Alatorre-Rosas, R., Mora-Aguilera, G., Bravo-Mojica, H., Ortiz-García, C. F., & Aceves-Navarro, L. A. (2003). Caracterización cultural y patogénica de diferentes aislamientos del hongo *Lecanicillium* (= *Verticillium*) *lecanii*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 21, 161–167.
- Cortéz-Madrigal, H., Martínez-López, M. C., Reyes-Izquierdo, F., & Ortega-Arenas, L. D. (2008). Primer registro de *Lecanoideus floccissimus* (Hemiptera: Aleyrodidae) en cacao de Tabasco, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 34(1), 33–40. <https://doi.org/10.25100/socolen.v34i1.9248>
- Delgado-Ospina, J., Molina-Hernández, J. B., Chaves-López, C., Romanazzi, G., & Paparella, A. (2021). The role of fungi in the cocoa production chain and the challenge of climate change. *Journal of Fungi*, 7(3), 202. <https://doi.org/10.3390/jof7030202>
- Flores J., D. (1976). *Insectos asociados con el cultivo del cacaotero, fluctuación de las principales especies fitófagas y su combate químico en el estado de Tabasco, México* [Tesis de maestría en ciencias, Colegio Superior de Agricultura Tropical].
- García-Pérez, J. A., Peña-Sánchez, R., Camargo-Huicui, P., & Champalbert, A. (1991). Rutas de forrajeo utilizadas por *Ectatomma tuberculatum* O. (Hymenoptera, Ponerinae) en una plantación de cacao en El Soconusco, Chiapas, México. *Folia Entomológica Mexicana*, 82, 161–171.
- Gerónimo-Cruz, A. M., Mendoza-Hernández, J. H. R., Sánchez Soto, S., Equihua Martínez, A., & Pérez de la Cruz, M. (2015). Fluctuación poblacional y período de ataque de *Hemeroblemma* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) en una plantación de cacao en Tabasco, México. *Entomotropica*, 30(6), 49–56.
- Gerónimo-López, V., Sánchez-Soto, S., Bautista-Martínez, N., Pérez de la Cruz, M., & Mendoza-Hernández, J. H. R. (2013). Fluctuación poblacional de *Clastoptera laenata* (Hemiptera: Clastopteridae) en el cultivo del cacao en Tabasco, México. *Fitosanidad*, 17(3), 131–137. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209129856002>
- González-Ruiz, A., Sánchez-Arizpe, A., Ochoa-Fuentes, Y. M., Galindo-Cepeda, M. E., Rodríguez Guerra, R., & Flores Torres, L. M. (2019). Primer informe de *Nodulosporium* (Xylariaceae) en *Theobroma cacao* L. en Chiapas, México y

- pruebas de patogenicidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(4), 779–788.
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillén, G., Garrido-Ramírez, E. R., & Romero-Nápoles, J. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33(2), 232–246. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61242145008>
- Hernández-Lara, P. U., Ramírez-Guillermo, M. Á., & Ramos-Hernández, E. (2020). Ciclo biológico de la cochinilla rosada del hibisco (*Maconellicoccus hirsutus*) (Green) (Hemiptera: Pseudococcidae) en plántulas de cacao. *Ciencia e Innovación*, 3(2), 395–402.
- López-Guillén, G., Chamé-Vázquez, E. R., & Avendaño-Arrazate, C. H. (2021). Primer registro de *Trigona fuscipennis* asociada a *Theobroma cacao* en Chiapas, México. *Southwestern Entomologist*, 46(2), 571–574. <https://doi.org/10.3958/059.046.0234>
- López-Guillén, G., Hernández-Baz, F., González, J. M., Arrazate, C. H. A., & Báez, M. A. (2020). First record of the cacao plume moth *Michaelophorus nubilus* (Felder & Rogenhofer) (Lepidoptera: Pterophoridae) in Mexico. *Revista Brasileira de Entomologia*, 64(4). <https://doi.org/10.1590/1806-9665-rbent-2020-0076>
- Mehl, J., Wingfield, M. J., Roux, J., & Slippers, B. (2017). Invasive everywhere? Phylogeographic analysis of the globally distributed tree pathogen *Lasiodiplodia theobromae*. *Forests*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/f8050145>
- Moreira-Morrillo, A. A., Cedeño-Moreira, Á. V., Canchignia-Martínez, F., & Garcés-Fiallos, F. R. (2021). *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griffon & Maubl [(syn.) *Botryodiplodia theobromae* Pat] in the cocoa crop: Symptoms, biological cycle, and strategies management. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 653–662. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.068>
- Orisajo, B. S. (2009). Nematodes of cacao and their integrated management. En *Integrated management of fruit crops nematodes* (pp. 119–134). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9858-1_5
- Ortiz, I., & Sánchez, S. (2008). Especies de Lepidoptera (Insecta) capturadas con un tipo de trampa durante la etapa principal de fructificación del cacao, en La Chontalpa, Tabasco. *XX Reunión Científica-Tecnológica Forestal y Agropecuaria Tabasco 2008*.
- Paladines-Rezabala, A., Moreira-Morrillo, A. A., Mieles, A. E., & Garcés-Fiallos, F. R. (2022). Advances in understanding of the interaction between *Ceratocystis cacaofunesta* and *Xyleborus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on cocoa trees. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), 43–52. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.004>
- Rojó-Báez, I., Álvarez-Rodríguez, B., García-Estrada, R. S., León-Félix, J., Sañudo-Barajas, A., & Allende-Molar, R. (2017). Situación actual de *Colletotrichum* spp. en México: Taxonomía, caracterización, patogénesis y control. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35(3), 549–570. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1703-9>

- Romero-Cortes, T., López-Pérez, P. A., Ramírez-Lepe, M., & Cuervo-Parra, J. A. (2015). Modelado cinético del micoparasitismo por *Trichoderma harzianum* contra *Cladosporium cladosporioides* aislado de frutos de cacao (*Theobroma cacao*). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 32(3), 32–45.
- Salvatore, M. M., Andolfi, A., & Nicoletti, R. (2020). The thin line between pathogenicity and endophytism: The case of *Lasiodiplodia theobromae*. *Agriculture*, 10(10), 1–22. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100488>
- Sánchez Soto, S. (1995). Dos plagas del cacao en el estado de Tabasco, México. *Agrotropica*, 7(3), 71–74. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/revista-agrotropica/revista-volumes/1989-a-1999/1995/revista-agrotropica-vol-7-no-3-1995.pdf/view>
- SENASICA. (2016). Nematodo lesionado del cafeto, [quema o derrite del cafeto] (*Pratylenchus coffeae* Zimmerman). *Ficha técnica No. 48*. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafeto/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Nematodo%20lesionador.pdf>
- SENASICA. (2019). *Cochinilla rosada del hibisco. Maconellicoccus hirsutus* Green, 1908. *Ficha técnica No. 6*.
- Torres-de la Cruz, M., De-la Cruz Pérez, A., Pérez-de la Cruz, M., & Ortiz-García, C. F. (2019). Registro y descripción del daño de la cochinilla rosada del hibisco, *Maconellicoccus hirsutus* Green (Hemiptera: Pseudococcidae), en *Theobroma cacao* L., en Tabasco, México. *Revista Chilena de Entomología*, 45(1), 157–163.

Apéndice 2. A manera de reflexión: el caso de la mal-adaptación al cambio climático a causa de la roya del cafeto en los sistemas agroforestales de café en Chiapas

Con esta subsección se pretende aportar elementos a los tomadores de decisiones para que definan políticas y acciones que fortalezcan las respuestas adaptativas de los productores de cacao, y se fomente la mitigación del CC (cambio climático, con énfasis en sinergias en la adaptación y mitigación, poco abordadas, tanto en la teoría como en la práctica); sobre todo por la vulnerabilidad, emergencia y remergencia de plagas y enfermedades que el CC y el cambio global predisponen. Todo ello ante condiciones socioeconómicas y estructurales adversas para los productores.

Lo anterior, como se ha tratado de hacer con el SAF café ante la (re)emergencia de la enfermedad de la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en 2012-2016 en México, lo que originó una nueva crisis nacional del café, con afectaciones multidimensionales (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018). Tal enfermedad fúngica produce lesiones en el cafeto (sobre todo en las hojas), con lo que se reduce la vigorosidad de la planta y la producción de grano, a la vez que se facilita la entrada de otros agentes fitopatogénicos (CESAVE Veracruz, 2022; Libert, 2014). La enfermedad es originaria del mismo lugar que el café (provincia de Cafa, Etiopía), de donde son endémicos y han coevolucionado, pero cambios ambientales favorecieron una nueva serie de brotes de esta enfermedad, más agresivos (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018; McCook & Vandermeer, 2015). Todo ello inició en Colombia (2008-2011) y se manifestó como una epidemia (brotes atípicos) que devastó la producción en hasta 31% y se asoció con el evento climatológico de “la Ola Invernal (2008-2012)” (Avelino *et al.*, 2015; Roza *et al.*, 2012). Luego, esta se fue expandiendo a Centroamérica: en la temporada de lluvias de 2012 afectó de forma severa todas las zonas productoras de Mesoamérica, hasta llegar a México en 2012 (Barrera *et al.*, 2013), si bien a algunas regiones llegó hasta 2015. Lo cierto es que en décadas anteriores se habían presentado brotes puntuales y severos en Suramérica (en las décadas de 1980 a 1990), a los cuales se les prestó poca importancia debido a otras prioridades nacionales, de índole económico. De hecho al país, y particularmente al Soconusco, *H. vastatrix* llegó en 1981, pero tales brotes fueron rápidamente atenuados debido a una rápida respuesta

gubernamental, por lo que sus impactos no fueron devastadores y dejó de ser el foco de atención (Avelino *et al.*, 1999; McCook & Vandermeer, 2015); ya que en esos años se disponía de una empresa paraestatal específica para el cultivo: el Instituto Mexicano del café, INMECAFÉ, que controlaba sus diferentes aspectos productivos (incluidos los técnicos) y de comercialización. Sin embargo, las condiciones ecológicas y socioeconómicas actualmente han cambiado y en general son más adversas, si bien existe mayor conocimiento científico. Se ha hipotetizado que la remergencia de la roya del café estuvo facilitada (al menos) por los siguientes dos factores (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018): (1) por el CC, pues se presentó a una mayor cota altitudinal (a más de 1 200 msnm), su límite histórico (Barrera *et al.*, 2013; Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018), así como actualmente se evidencia la migración altitudinal de las condiciones climáticas óptimas para el cafeto; y (2) presencia de nuevas variedades, más agresivas; esto es, un factor genético más complejo: se han registrado mayor cantidad de razas de *H. vastatrix* desde entonces. Mismas que se le atribuyen al cambio global ante las nuevas condiciones ecológicas y de movimiento internacional de material vegetal (germoplasma) que producen nuevas cruas de los fitopatógenos. Sin embargo, se suma el hecho de que en la reciente reemergencia de *H. vastatrix* no ha habido una respuesta climática ni socialmente inteligente (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018). Por lo que se ha producido una mal-adaptación al CC, debido a que se ha dado el énfasis de remplazar (o renovar) las plantaciones tradicionales bajo sombra diversificada (en SAF), de variedades de café susceptibles a esta (*C. arabica*), por plantaciones de *C. canephora* conocida comúnmente como “café robusta”, así como híbridos de esta especie con *C. arabica*, ambos tipos resistentes a la roya (por ejemplo, los Timores y Catimores). Mismas que requieren de menor densidad arbórea (McCook & Vandermeer, 2015). Dicha política fue apoyada por la iniciativa privada y gubernamental. Sin embargo, se ha observado que esa resistencia se está venciendo (Avelino & Rivas, 2013; Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018). Lo que se debe principalmente a que la roya, al encontrar mayor “inercia genética” (debido a la generalización de variedades de café resistentes a esta), tiende a evolucionar más rápido de como lo haría normalmente, tal como sucede con cualquier enfermedad

fitopatógica. Todo ello derivó en que, al menos en el caso de la Sierra Madre de Chiapas, se produjeran procesos de deforestación, degradación forestal y la consecuente erosión del suelo (y la pérdida de servicios ecosistémicos en general). Esto ocurrió a pesar de la existencia de iniciativas —incluso de alcance internacional— orientadas a la mitigación del cambio climático y a evitar esos procesos, como REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation), las cuales promovían la conservación de los reservorios de carbono de bosques y de SAF de café. Dichos reservorios principalmente se concentran en los árboles de sombra y en la materia orgánica del suelo, de forma análoga a lo observado en los SAF de cacao. Tales estrategias también contemplaban la conservación de la diversidad biológica, lo que resalta la contradicción entre los objetivos planteados por REDD+ y los resultados observados para esa región (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018).

Es decir, la transición hacia nuevas variedades de café —que implicaron una simplificación de la sombra y, con ello, la degradación de la cubierta forestal—, así como el cambio hacia otras actividades agrícolas (y usos del suelo) y la migración forzada —tanto nacional como internacional— de poblaciones que anteriormente dependían del café como medio de vida principal, acentuaron los niveles de pobreza y la vulnerabilidad social del sistema. En conjunto, tales procesos erosionaron la base ecológica de la región y la capacidad de sostener medios de vida asociados al cultivo de café. Lo que se debió a que hubo un conflicto de intereses al no considerar la opinión y las necesidades de los productores ante la crisis de la roya, pues este sistema de cultivo se ha caracterizado históricamente por ser de bajos insumos (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018). Además de que actualmente lo manejan en su mayoría productores de la tercera edad, a quienes se les dificulta el trabajo físico, si bien poseen amplia experiencia en el cultivo.

Por otro lado, con la intensificación productiva del café los requerimientos de mano de obra y de insumos externos (incluidos mayores cantidades de dinero y agroquímicos) se ven incrementados, pues al usar variedades tolerantes al sol se requiere de mayor mano de obra (incluso en la poscosecha). Además, si bien son más productivas por unidad de superficie, estas nuevas variedades dan un grano de menor calidad en taza

(y, por tanto, estas son de menor precio) y según los productores “pesan menos” (su densidad es menor). Aunado a que tales variedades son más precoces y exigentes nutricionalmente, aunque su vida útil es menor. Por lo anterior es que, la mayor productividad que se obtiene con esas variedades no siempre deriva en mejores ingresos, pero sí en una mayor necesidad de mano de obra y en mayores costos de producción (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018). Tales autores concluyeron que existe una brecha muy distante entre el papel (la planeación) y la acción (la aplicación) de las sinergias de la adaptación y la mitigación del CC en café, lo cual puede ser generalizable a cultivos agroforestales y de bajos insumos.

Se han propuesto mejoras en política pública al nivel paisajístico-territorial para estos lugares (paisajes café y cacao de Tabasco y Chiapas) que incluirían lo siguiente: mejora en la conservación de la biodiversidad y de la conectividad del paisaje, reducción de amenazas a los hábitats naturales y áreas de importancia para la conservación, así como el mejoramiento de los medios de vida familiares mediante un uso sustentable de sus recursos. En la cual los elementos estructurales del paisaje son las selvas y bosques, que sirven como corredores biológicos y turísticos, si bien estos se encuentran deforestados y degradados, como se dijo anteriormente (Rueda Vázquez & Vidal Fócil, 2022). Cotte (2022) indican que la agroecología no solo tiene el objetivo de optimizar la producción minimizando el uso de recursos (la sostenibilidad agrícola), sino que busca mejorar las condiciones de la vida de las personas y el ambiente, por lo que no puede ser vista como “paquetes tecnológicos” clásicos, sino que debe ser aplicada al contexto local, con base en el conocimiento local y el científico, donde el uso de agroquímicos está permitido (pero que se busca reducir conforme avance la transición) y se procura la resiliencia climática. Côte *et al.* (2022) identificaron tres pilares (a ejecutarse en conjunto) para establecer de manera efectiva la producción agroecológica en las regiones tropicales: (1) movilización y gestión de procesos ecológicos para la producción sostenible (índole ecológico-local), (2) desarrollo de interacciones entre componentes técnicos, sociales, ambientales e institucionales (índole social: asociativo y legislativo) y (3) escalamiento de la agroecología a través de diversas acciones en diferentes niveles organizativos (desde

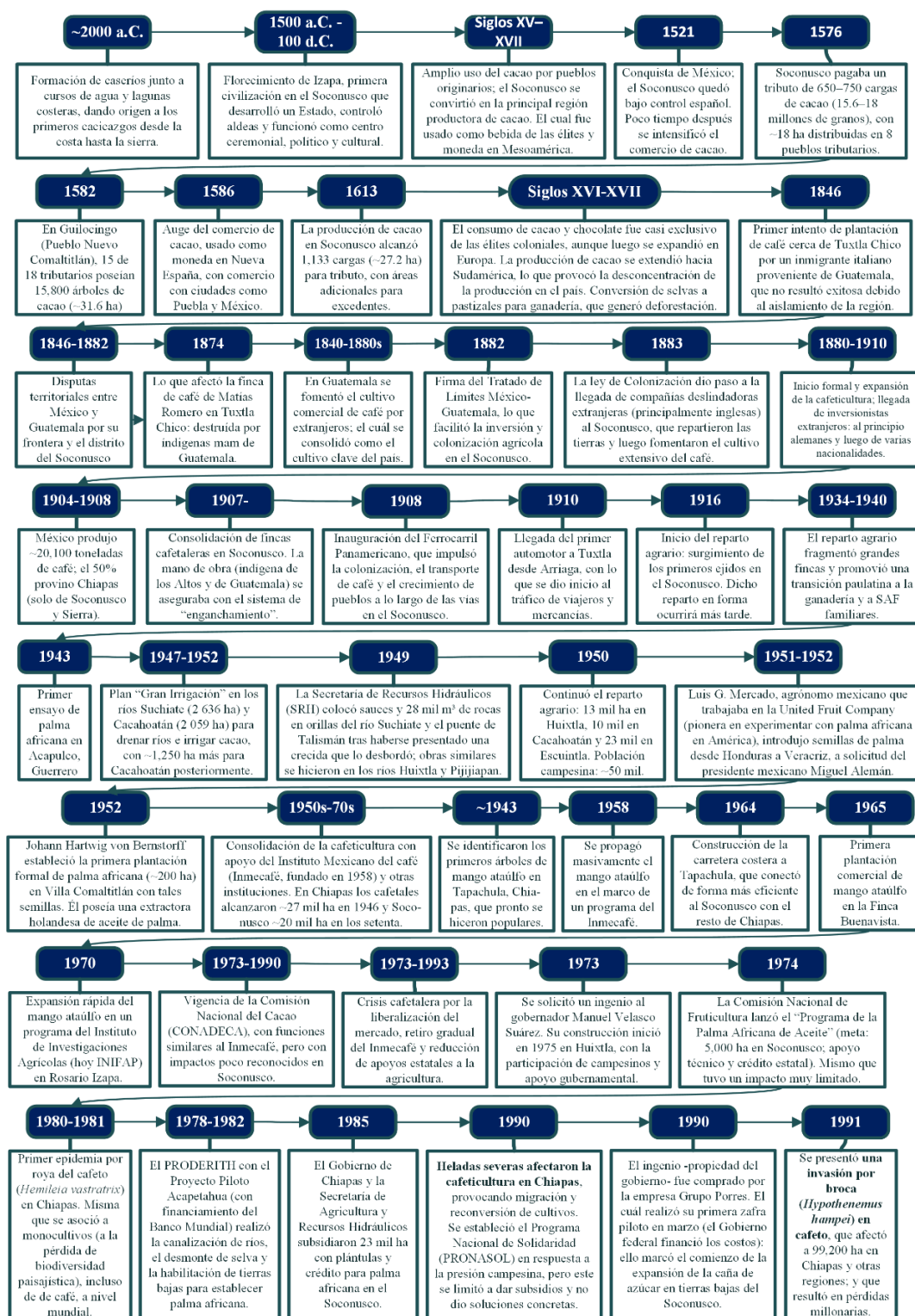
la planta hasta el territorio y la escala mundial) y propusieron 11 puntos (biotécnicos y socio-políticos) para implementar tales pilares. Por ende, las iniciativas agrícolas (no solo en cacao o SAF) deben ser respaldadas y apoyadas por políticas nacionales e internacionales consistentes. En esa transición agroecológica ya no se busca la mejora genética de un solo “objetivo agroindustrial” de un genotipo “perfecto” y de propósito general, sino que se debería buscar el objetivo agroecológico de desarrollar y difundir conjuntos de genotipos que cubran una amplia gama de condiciones ambientales, tanto bióticas como abióticas (Côte *et al.* 2022).

Literatura citada

- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A., & Morales, C. (2015). The coffee rust crisis in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), 303–321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Avelino, J., Muller, R., Eskes, A. B., Santacreo, R., & Holguín, F. (1999). La roya anaranjada del cafeto: mito y realidad. En B. Bertrand & B. Rapidel (Eds.), *Desafíos de la cafecultura en Centroamérica* (pp. 193–241). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Promecafe; Cirad; IRD; CCCR-Franca.
- Avelino, J., & Rivas, G. (2013). *La roya anaranjada del cafeto*. HAL Archives Ouvertes. <https://hal.science/hal-01071036>
- Barrera, J., Avelino, J., Huerta, G., Herrera, J., & Gómez, J. (2013). La roya del café: crónica de una devastación anunciada. *Ecofronteras*, 49, 22–25.
- CESAVE Veracruz. (2022). *Roya del cafeto (Hemileia vastatrix)*. Comité Estatal de Sanidad Vegetal de Veracruz. <https://cesave.org.mx/roya-del-cafe-hemileia-vastatrix/>
- Côte, F. X., Rapidel, B., Sourisseau, J. M., Affholder, F., Andrieu, N., Bessou, C., Caron, P., Deguine, J.-P., Faure, G., Hainzelin, E., Malezieux, E., Poirier-Magona, E., Roudier, P., Scopel, E., Tixier, P., Toillier, A., & Perret, S. (2022). Levers for the agroecological transition of tropical agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(4), 67. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00799-z>
- Libert, A. (2014). Los desafíos que plantea el cambio climático a la relación entre sociedad y naturaleza: una mirada desde Chiapas. En B. Rodríguez & O. Contreras (Eds.), *La construcción del futuro: los retos de las ciencias sociales en México* (pp. 499–510). CESMECA-UNICACH.
- Libert-Amico, A., & Paz-Pellat, F. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*, 24(núm. especial), e2401914. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914>

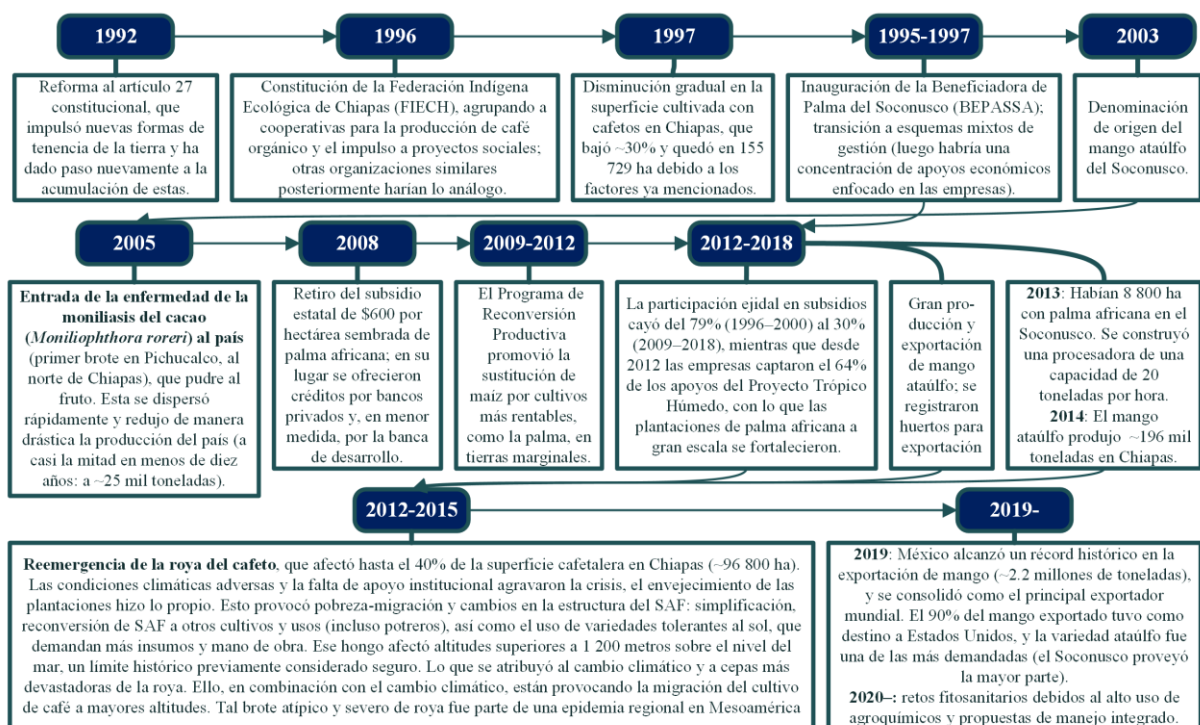
- McCook, S., & Vandermeer, J. (2015). The Big Rust and the Red Queen: Long-term perspectives on coffee rust research. *Phytopathology*, 105(9), 1164–1173. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0085-RVW>
- Rozo, Y., Escobar, C., Gaitán, Á., & Cristancho, M. (2012). Aggressiveness and genetic diversity of *Hemileia vastatrix* during an epidemic in Colombia. *Journal of Phytopathology*, 160, 732–740. <https://doi.org/10.1111/jph.12024>
- Rueda Vázquez, D. de A., & Vidal Fócil, A. B. (2022). Paisaje de café y cacao de Chiapas y Tabasco, México: Estrategia resiliente. *Journal of Tourism and Heritage Research*, 5(4), 122–133.

Apéndice 3. Historia agrícola en torno al Soconusco hasta 1991.



Fuente: elaboración propia con base en Castellanos (2023); del Carpio Penagos, (2017), Hernández Solís y Castro Martínez (2023). Mendoza-Hernández *et al.* (2020) Montoya y Toledo (2020). Ver referencias en el capítulo 5.

Apéndice 4. Historia agrícola en torno al Soconusco después de 1991.



Fuente: elaboración propia con base en Castellanos Navarrete (2023), Libert-Amico & Paz-Pellat (2018), Mendoza-Hernández *et al.* (2020) Montoya y Toledo (2020) y Roma Ardón *et al.* (2022). Ver referencias en el capítulo 5.

Apéndice 5. Indicadores de la capacidad de adaptación de los productores de cacao en la Chontalpa

Dimensión	Dimensión específica	Indicador adaptado	Codificación	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8
D1. Recursos económicos	SD1. Fuentes de ingresos	I1. Número de fuentes de ingresos (último año)	Cantidad, entre mejor.	7	5	2	3	3	3	3	4
	SD2. Tenencia y propiedad de la tierra	I2. Tipo de propiedad	1. ejidal, 0.75 privada 0.5 rentada o prestada, 0. ninguna	1	1	1	1	1	1	1	0.75
	SD3. Acceso a crédito/seguro	I3. Acceso al crédito	0. no, 1. si	0	0	0	0	1	1	1	0
		I4. Acceso al seguro agrícola	0. no, 1. si	0	0	0	0	0	0	0	0
D2. Recursos humanos	SD4. Educación	I5. Lectura y escritura	0. no, 1. si	1	1	0	1	1	1	1	1
		I6. Asistencia a la escuela de los hijos	0-100: 0-100%, 1. ninguno, pero todos estudiaron	1	1	1	1	1	1	1	1
	SD5. Adiestramiento	I7. Asistencia técnica en los últimos 5 años	1. si, 0. no	1	0	1	0	1	1	1	1
	SD6. Experiencia agrícola	I8. Porcentaje de la vida dedicada al cultivo de cacao	% del total de vida	1	1	1	1	1	1	1	1
	SD7. Percepción del cambio climático	I9. Afectación por consecuencias del cambio climático	1. no, 0. si	1	1	0	0	1	1	1	1
D3. Infraestructura para la producción y comercialización	SD8. Tecnología para la producción	I10. Uso de tecnología de riego/drenaje en la producción agrícola	0. no, 0.5 riego o drenaje, 1. ambos	0	0	0	0	1	1	1	1
		I11. Posesión de maquinaria para la producción agrícola	0. no, 1. si	1	1	0	0	1	0	1	1

		I12. Posesión de al menos una tecnología de la información y la comunicación (TICs)	0. no, 1. si	1	1	1	1	1	1	1	1
	SD9. Accesibilidad a las carreteras	I13. Grado relativo del acceso a carreteras asfaltadas de la localidad	0-100: 0-100%	1	1	1	1	1	1	1	1
D4. Capital social		I14. Partición en una organización del sector primario (funcionando)	0. no, 1. si	1	0	0	0	1	1	1	1
		I15. Partición en una organización social o comunitaria	0. no, 1. si	1	1	1	0	1	1	1	1
D5. Institucionalidad	SD11. Capacidad institucional	I16. Capacidad/recuerdo de las instituciones municipales para hacer frente al cambio climático	0-100: 0-100%	0	0	0	0	0	0	0	0
D6. Recursos naturales	SD12. Uso forestal	I17. Cubierta forestal (solo de la parcela)	0-100: 0-100% a nivel parcela	1	1	1	1	1	1	1	1
	SD13. Agua	I18. Disponibilidad de agua potable	0. no, 0.5 de pozo, 1. entubada	1	1	1	0.5	1	1	1	1
	SD14. Suelo	I19. Consideración de la calidad del suelo de la parcela por el productor	0. mala, 0.5, regular, 1. buena	0.5	0.5	0.5	0	1	1	1	0.5

Fuente: elaboración propia base en el trabajo de campo y la propuesta de Maldonado-Méndez *et al.* (2022) (hasta el nivel de dimensiones específicas) con adaptaciones personales de los indicadores y la codificación.

Apéndice 6. Registros y cálculos de la rentabilidad de las unidades productivas en la Chontalpa.

Cálculos al nivel de sistema productivo

Cacao, según nivel de manejo

Concepto / Sistema		Cacao convencional (antes de la moniliasis*), productor C-3	Cacao convencional	Cacao orgánico (productores C-5, C-6, C-7 y C-8)
Rendimiento en fresco	2,000 (kg/ha/año)		550**	
Rendimiento en seco				675 (kg/ha/año)
Precio de venta promedio	\$ 7.3 (\$/kg)		\$ 16	\$ 54
Valor agregado bruto (VAB) por ha tipo	\$ 14,600		\$ 8,800	\$ 36,450
Superficie promedio (ha) por UPP	1		1	0.5
Valor agregado bruto (VAB) por UPP	\$ 14,600		\$ 8,800**	\$ 18,225
Costos intermedios	\$ 2,920		\$ 7,202**	\$ 3,000
Valor agregado neto (VAN) por UPP	\$ 11,680		\$ 1,598**	\$ 15,225
Edades de la plantación	20 a 70 años		20 a 70 años+ renovación	25 a 50 años+ renovación
% perdido por moniliasis	0%		30 al 80%	5 al 10%
Causa de mayor pérdida	Mancha negra		Moniliasis	Robo (10 a 30%)
Variedades de cacao dominantes	Guayaquil		Guayaquil	Guayaquil y neocriollo

UPP: unidad productiva promedio. *Es decir, antes de 2005. **Estos valores eran muy variables (e incluso ignorados o desconocidos) ente estos productores convencionales; este fue el caso específico del productor C-3.

Sistemas de cultivo complementarios

Maíz (independiente del SAF cacao, productor C-3)

Sistema	Valores
Cosecha total en seco (kg)	1,350
Precio de venta (\$/kg)	\$ 5
Venta por ha	\$6,750
Valor agregado bruto (VAB)	\$ 6,750.0

Costos intermedios*	\$ 5,450.0
Valor agregado neto (VAN)	\$ 1,300.0
% perdido por moniliasis	

*Este productor hizo un uso indiscriminado de agroquímicos, por lo que sus costos intermedios fueron exagerados; algunos agroquímicos (incluido glifosato), también se aplicaron en el intento de “controlar plagas” en el SAF cacao. El productor C-1 usó menos agroquímicos, por lo que sus costos intermedios fueron menores (\$2,850.00), aunado a que partitipaba en un CACs de Sembrando Vida, donde se elaboran bioinsumos que reducen tales costos.

Sistemas pecuarios

Colmenas, productor C-8

Sistema	Valor
Volumen producido (kg/ha/año)	80
Precio de venta (\$/kg)	\$ 150
Producción total	\$ 12,000
Cajones	3
Costos fijos	\$ 831
Margen bruto	\$ 11,169

Integración del cálculo al nivel de unidades productivas (cálculo del ingreso agrícola)

Productor(es) y localidad	Cacao	Miel	Maíz	Ingreso agrícola	Comentarios
C-1 Miguel Hidalgo 2da. Sección, Cárdenas	16,800		3,900	20,700	4 ha de cacao y 1 ha de maíz
C-3 Carlos Rovirosa, Cunduacán**	1,598		1,300	2,898	Hubo exceso de agroquímicos; 1 ha de superficie
C-4 Tulipán, Cunduacán**	8,800			8,800	Muy poco manejo, al nivel de recolección; 1 ha de superficie
C-5, C-6 y C-7: Santanna 2ª sección B, Cárdenas*	15,225			15,225	0.5 ha de superficie
C-8 Huimango, Cunduacán*	15,225	11,169		26,394	0.5 ha de superficie

*Cacao orgánico. **Cacao convencional. El ingreso agrícola es la suma de los VAN de cada sistema productivo.

Integración del cálculo del ingreso agrícola con el no agrícola (incluidos programas sociales)

Productor(es) localidad	y	Ingreso agrícola	Producción para Bienestar	Sembrando el vida	Pensión para el Bienestar	Empleo como jornalero	Ingreso anual
C-1 Miguel Hidalgo 2da. Sección, Cárdenas		20,700	6,200	60,000	19,650	-	106,550
C-3 Carlos Rovirosa, Cunduacán		2,898	-	-	19,650	-	22,548
C-4 Tulipán, Cunduacán		8,800	-	-	-	49,000	57,800
C-5 Santanna 2ª sección B, Cárdenas		15,225	6,200	-	19,650	-	41,075
C-6 Santanna 2ª sección B, Cárdenas		15,225	6,200	-	-	34,560	55,985
C-8 Huimango, Cunduacán		26,394	6,200	-	7,860	-	40,454

Apéndice 7. Lista de innovaciones agrícolas reportadas por los productores de cacao en la Chontalpa

ID	Innovación	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8
1	Aplica composta orgánica								
2	Uso de análisis de suelo para la determinación de dosis de fertilización								
3	Aplica abonos líquidos								
4	Aplica fertilizantes químicos								
5	Aplicación de fertilizantes foliares (macro y micro nutrientes)								
6	Efectúa podas sanitarias (eliminación de ramas innecesarias)								
7	Aplicación de pasta cicatrizante								
8	Aplicación de caldo sulfocálcico								
9	Remoción de frutos enfermos								
10	Aplicación de fungicidas (base cobre, otros)								
11	Usa control biológico (depredadores, parasitoides, antagonistas)								
12	Aplica extractos naturales								
13	Uso de podadora de ramas altas, tijeras, motosierras telescópicas								
14	Desinfecta herramientas de trabajo								
15	Limpia y manejo del quebradero								
16	Incorpora arvenses y residuos al suelo								
17	Recolecta envases de agroquímicos para su depósito y/o destrucción								
18	Emplea estrategias de conservación de suelo (coberteras, barreras, mulch, entre otras)								
19	Elabora y aplica composta orgánica y/o vermicomposta								
20	Elabora abonos líquidos								
21	Realiza manejo del agua (Drenes y riego)								
22	Cuenta con cultivos asociados / intercalados								
23	Efectúa podas de formación (estructuración del árbol)								
24	Efectúa podas de mantenimiento								
25	Efectúa podas de rehabilitación								
26	Aplica estimulantes con base a plan de producción								
27	Regula sombra								
28	Cuenta con un calendario de actividades / procesos								

29	Registra las prácticas Efectuadas (fecha, insumos, práctica)								
30	Registra los ingresos y egresos de la unidad de producción								
31	Cumplimiento de la NMX-F352-1980 y NOM 186-SSA/SCF1- 2002								
32	Desarrollo de esquemas de financiamiento								
33	Implementación de la trazabilidad								
34	Recibe servicios de manera grupal (asesoría, financieros, entre otros)								
35	Pertenece a organización económica funcionando								
36	Cuenta con esquema de articulación con la agroindustria de manera grupal								
37	Efectúa compras/ventas consolidadas								
38	Ha participado en giras de intercambios de experiencias								
39	Ha asistido a días demostrativos								
40	Vinculación institucional con otras agencias y/o centros de Investigación								
41	Cuenta con registros de cosechas (volúmenes)								
42	Cosecha empleando criterios de madurez, tamaño y variedad								
43	Realiza un control de calidad en el producto que vende (baba/seco)								
44	Manejo post cosecha (selección, fermentación, secado)								
45	Propaga plantas por injerto								
46	Identifica arboles campeones (rendimiento, resistencia) en la plantación								
47	Renueva plantas de cacao								
48	Reproduce sus propias plantas/ Establece vivero								
TOTAL DE INNOVACIONES		22	23	13	10	45	44	44	43

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de campo y la lista de innovaciones de Díaz-José *et al.* (2013).

Apéndice 8. Historia agrícola regional del cacao en la Chontalpa, Tabasco

Periodo prehispánico-colonial

A lo largo de la historia, Tabasco ha sufrido un impacto significativo por actividades antrópicas sobre sus ecosistemas (INEGI, 2001; Marín Olán, 2020); por ejemplo, entre 1940 y 1996, se perdió el 95% de la vegetación original, que fue sustituida mayoritariamente por pastizales (Zavala y Castillo, 2007) debido a actividades como deforestación, ganadería extensiva, expansión agrícola, incendios forestales y actividades petroleras.

En este contexto, el cultivo de cacao constituyó un eje central de la economía y de la cultura agrícola regional desde hace al menos 500 años, con presencia marcada en la Chontalpa y en la Sierra. En estas regiones, grupos indígenas como los Zoques y los Chontales desarrollaron sistemas productivos ligados al cacao que se transmitieron generacionalmente (Flores López, 2006). Y tras la instauración del virreinato de la Nueva España, se fomentaron en primer lugar las haciendas cacaoteras y, posteriormente, las ganaderas, en las que la población local, incluida la indígena, trabajó bajo esquemas de explotación (Vásquez, 2000). Esta dinámica perduró durante buena parte de la Colonia y se transformó lentamente con el paso de los siglos.

El municipio de Cárdenas fue fundado en 1788 bajo el nombre de San Antonio de los Naranjos, como parte del proceso de expansión territorial en la región. Por su parte, Cunduacán fue reconocido oficialmente como pueblo en 1739, y posteriormente, en 1826, se le otorgó la categoría de villa con el nombre de Natividad de Cunduacán (INEGI, 2001). Ambos municipios cultivaban cacao incluso desde antes de su fundación.

Vulnerabilidad climática regional

A lo largo del último siglo, Tabasco ha sido escenario de eventos climáticos extremos que evidencian la alta exposición de sus sistemas agropecuarios a la variabilidad climática —y, por extensión, al cambio climático (Marín Olán, 2020). La gran sequía de 1949, que se prolongó de marzo a septiembre —cuando lo habitual es de febrero a mayo—, provocó una de las mayores catástrofes agropecuarias registradas en el estado: cosechas fallidas, mortandad masiva de ganado y enormes pérdidas

económicas que impactaron la seguridad alimentaria regional. Cultivos comerciales como el plátano (*Musa paradisiaca* L.), la copra o el coco (*Cocos nucifera* L.) y el cacao (*Theobroma cacao* L.) fueron severamente afectados: más de 7 millones de matas de cacao resultaron afectadas, lo que implicó pérdidas de 35 mil toneladas de grano, valuadas en 175 millones de pesos. Apenas tres años después, en 1952, una inundación mayor desbordó la capacidad de respuesta local, afectando enormemente al ganado y haciendo que se perdieran hectáreas de cultivo. Estos eventos, lejos de ser aislados, marcaron el inicio de una secuencia de impactos climáticos exacerbados por modificaciones de la hidrología regional y cambios de uso de suelo.

Si bien desde el siglo XVI, ya existían cimatanes (sabanas o pastizales de 20 leguas de ancho y de largo), que atrajeron la ganadería de bueyes y mulas usadas para la tracción y el transporte agrícola (Marín Olán, 2020), lo que vino después fue mayor: el cambio de uso de suelo —principalmente debido a proyectos como el Plan Chontalpa (con 260 mil hectáreas factibles de aprovechamiento para ganadería) y el Plan Tenosique, que implicó la expansión ganadera hacia cerros y sabanas— agravó la deforestación (163,000 ha), con lo que se redujo la capacidad de regulación térmica e hídrica del paisaje. Entre 1961 y 2010, la temperatura media anual en Tabasco aumentó cerca de 0.9°C, lo que impacta directamente en la producción agropecuaria (Hernández *et al.*, 2016). La reducción de la cubierta forestal, humedad y biodiversidad asociada a los desmontes masivos entre 1968 y 2000 fragmentó los ecosistemas (Marín Olán, 2020), haciendo más vulnerables tanto a los cultivos como al ganado frente a sequías prolongadas, inundaciones irregulares y olas de calor. Aunado a lo anterior, la subida del mar como consecuencia del cambio climático, amenaza a las poblaciones costeras del estado.

El Plan Chontalpa y su impacto socioambiental

Al ser importantes los poblados del antiguo Plan Chontalpa en la producción cacaotera y al haberse modificado la estructura social y los patrones de asentamiento humano, así como el régimen hídrico de la región entera con dicho plan, se hace necesario exponer su origen. El Plan Chontalpa, cuyo inicio formal se dio en 1966, pero con trabajos previos por la Comisión del Grijalva, fue propuesto como un esfuerzo nacional

de inversión y articulación para convertir al sureste mexicano en el “granero de México” bajo un crecimiento sostenido y un “desarrollo modernizador” (Chávez-García *et al.*, 2012; Córdova Ávalos *et al.*, 2001; Fuentes Aguilar, 1977).

Si bien el Plan Chontalpa no construyó presas directamente, sí incluyó la implementación de bordos, drenes y, de forma limitada y localizada, sistemas de riego. Además, se benefició de las presas construidas previamente aguas arriba en la cuenca del Grijalva por la Comisión del Río Grijalva, como Malpaso, La Angostura, Chicoasén y Peñitas, ubicadas en Chiapas. Las cuales regulan el caudal en esta región, pero que alteraron los ciclos de inundación estacional que rejuvenecían y fertilizaban los suelos de manera natural; ello implicó una degradación ambiental a nivel regional (Sánchez y Barba, 2005). Además, la modificación del cauce de los ríos (por ejemplo, del “río Seco”) puede influir en una mayor exposición al cambio climático, pues los cuerpos de agua termorregulan el clima a nivel regional y, como se indicó, tienen implicaciones importantes en los ciclos naturales, principalmente biogeoquímicos e hídricos.

Previamente la forma de organización agrícola de sus pobladores implicaba la producción en forma colectiva (acción colectiva), no remunerada y colaborativa, que funcionó durante largo tiempo, de forma más o menos ininterrumpida. Para lo cual se optó por implementar el modelo ejidal, así como la reubicación de las familias productoras en centros urbanos de 22 poblados-ejidos, en Huimanguillo y Cárdenas; ello para arraigar a los productores a su tierra, al mejorar su vida mediante una mejor y más diversa productividad agrícola (que incluía al cultivo del cacao), mejora de la salud poblacional y la reducción de las inundaciones. Tal programa también incluyó la dotación de terrenos, introducción de cultivos comerciales, extensionismo agrícola, otorgamiento de créditos (agrícolas y para la construcción de viviendas), constitución de asociaciones de productores (incluso de cacao) y construcción de centros urbanos. Los beneficios más evidentes fueron los que se refieren a los servicios públicos (incluidos los de salud) y en cuanto a la infraestructura hidráulica, con la cual, se ha reducido la incidencia de inundaciones (de manera general).

Pese a ello, dado que tales cambios se dieron mediante un impulso político y económico externo (fondos nacionales e internacionales), que no tomó en cuenta a la

opinión y necesidades de la población, se generaron una serie de problemas sociales; por ejemplo, la asignación al azar de 1.2 ha de los terrenos del colectivo a cada uno de los productores (ahora ejidatarios), condujo a nuevos conflictos por diferencias personales entre vecinos que antes no lo eran (Chávez-García *et al.*, 2012; Fuentes Aguilar, 1977); o bien, la nueva forma de posesión de la tierra (parcelas ejidales, que se trabajan de forma individual) lejos de beneficiar a los productores (como había sido planteado), les condujo a la disolución del trabajo colectivo y por ende, a la necesidad de contratar mano de obra externa, muchas veces escasa (Martínez Assad, 1996).

Influencia de la industria petrolera

La expansión de la industria petrolera a partir de la década de 1970 por Petróleos Mexicanos (Pemex) en la región, no solo redefinió la economía regional al orientar su enfoque hacia el petróleo, sino que también tuvo un impacto significativo en la producción agrícola y la contaminación ambiental. Además, a medida que los trabajadores petroleros lograron capitalizarse, incursionaron en la ganadería; sin embargo, su nula experiencia en el sector, sumada a problemas políticos, tanto dentro como fuera de su organización regional, así como problemas estructurales (incluida la liberalización del mercado), terminaron afectando la viabilidad del sistema ganadero, llevándolo eventualmente a su desarticulación (Marín Olán, 2020). Antes del quiebre de tal sistema, la ganadería era una alternativa muy atractiva y viable para la conversión de los SAF cacao, pero tras esta sólo quedaron como opciones interesantes la siembra de caña de azúcar o la venta de la propiedad.

Además, la contaminación ambiental derivada de la actividad petrolera también impactó al sector agrícola, a la salud humana y a la ambiental. En particular, esta actividad solo empleó temporalmente a la población agrícola (a quienes se les nombró como “changos”), pero no mejoró la economía de la región, solo la de los grandes núcleos urbanos aledaños (como Villahermosa). Asimismo, Pemex se negaba a pagar indemnización por las afectaciones ambientales a los productores, por lo que se suscitaron manifestaciones dentro del llamado “movimiento del Pacto Ribereño” para exigir el pago respectivo, que se obtuvo tras varias complicaciones (Martínez Assad, 1996).

Auge del cacao y su declive

La historia reciente del cacao en Tabasco está marcada por un proceso de organización productiva que, durante varias décadas, buscó consolidar una cadena agroindustrial con base social, pero que al final fracasó (Aguilar, 2023; Somos Más Tabasco, 2023). En 1960 se creó la Unión Nacional de Productores de Cacao (UNPC), con respaldo estatal y federal, como instancia de representación nacional para los cacaoteros. Su función era coordinar el acopio, la comercialización y la transformación del grano; estaba conformada por cooperativas, asociaciones o intermediarios, que estaban encabezados por una mesa directiva. La cual se consolidó como instancia nacional de acopio y representación durante las décadas siguientes (Aguilar, 2023).

En 1959 se fundó la Industrializadora de Cacao de Tabasco, S.A. (INCATABSA), como empresa agroindustrial principal, propiedad de los productores organizados. Con fuerte respaldo estatal, se construyó la planta en Cárdenas con una inversión inicial de 70 millones de pesos, ampliada años después con 26 millones más (Aguilar, 2023). Su objetivo era transformar el cacao tabasqueño en productos de alto valor agregado como chocolate, manteca y pasta. En su época de mayor actividad, INCATABSA llegó a procesar hasta 15,000 toneladas anuales, lo que representaba la práctica totalidad del volumen estatal; por ende, fue el principal centro de transformación del país (Somos Más Tabasco, 2023). Esta articulación permitió consolidar una red de actores locales que abastecían directamente a esta empresa, eliminando intermediarios y fortaleciendo el ingreso de los productores (Aguilar, 2023).

Durante la década de 1970, los precios pagados al productor de cacao en Tabasco fueron considerados —según informes estatales— los más altos del mundo. El esquema de comercialización incluía anticipos por kilogramo de grano entregado, que pasaron de 6 pesos en 1970 a 14 pesos en 1975; estos anticipos funcionaban como adelantos sin intereses al cacao del ciclo productivo en turno. En 1975 se formalizó la entrega de acciones de INCATABSA a las asociaciones locales, con lo que se garantizó que la empresa fuera propiedad exclusiva de los productores (Aguilar, 2023).

Durante la década de 1980, Tabasco alcanzó el primer lugar nacional en producción de cacao, con el 83% del total nacional, mientras que el país ocupó el séptimo lugar a

nivel mundial. Este auge coincidió con el fortalecimiento de la UNPC y su estrecha colaboración con la Comisión Nacional del Cacao (CONADECA), instancia federal encargada de impulsar la investigación, extensión y organización social del sector, misma que se detallará más adelante. La CONADECA operaba en estrecha coordinación con la UNPC, apoyando la tecnificación y el financiamiento de la cadena productiva. Durante ese mismo periodo, México fue miembro activo de la Organización Internacional del Cacao (ICCO), con la UNPC como instancia representativa ante dicho organismo, desde aproximadamente 1975 hasta principios de los años 2000. Esta participación permitió al país intervenir en foros internacionales sobre comercio, calidad y sostenibilidad del cacao, lo que fortaleció la posición institucional de la UNPC y daba mayor visibilidad al cacao mexicano en el mercado global (Aguilar, 2023). Posterior a esas fechas México ya no figuró como miembro de la ICCO.

La CONADECA (1973-1990), por su parte, impulsó el desarrollo de la cacaocultura mexicana mediante investigación, incentivos en especie, como paquetes tecnológicos, agroquímicos y plantas de viveros especializados (clones), además de regular precios, organizar el acopio del grano y, en algunos casos, promover la postcosecha (Córdova Ávalos *et al.*, 2001). Este esfuerzo resultó en un notable auge de la producción durante las décadas de 1970-1990 (SIAP, 2022). Los apoyos se canalizaban y ejecutaban a través de numerosas asociaciones locales de cacao, las cuales también acopiaban el grano y se caracterizaban por un gran número de agremiados con una producción convencional (distinta de las asociaciones de cacao orgánico mencionadas en el capítulo 6, las cuales son más localizadas, cuentan con muchos menos agremiados y operan bajo un modelo orgánico).

Sin embargo, el modelo comenzó a desmoronarse en la década de 1990. En ese año, la UNPC solicitó un crédito de siete millones de pesos para maquinaria y vehículos, pero la deuda se acumuló y entró en cartera vencida. Así pues, en 2003 BANCOMER (Banco de Comercio) embargó a INCATABSA por un adeudo de 22 millones de pesos, con lo que la empresa quedó fuera del control de los productores. Sumado a lo anterior, la CONADECA fue disuelta por decreto presidencial en 1990, bajo el “entendido” de que su objetivo inicial —la mejora y organización del sector cacaotero— ya se había cumplido, y que las asociaciones de productores podrían continuar de forma autónoma

(Córdova Ávalos *et al.*, 2001; DOF, 1990); pero que realmente se explica por un periodo político de desaparición de empresas paraestatales y privatización de sectores y empresas clave (incluidos los ingenios azucareros) en el país. Además, la desaparición de esta instancia dejó a la UNPC sin respaldo institucional, lo que contribuyó al declive de INCATABSA. Pese a tal contexto desfavorable, algunas de las asociaciones continuaron acopiando cacao (Córdova-Avalos *et al.*, 2008), pero la mayoría colapsaron por falta de liquidez y también, en parte, debido a la desconfianza en sus líderes, así como la falta de organización social e incentivos gubernamentales. En consecuencia, hoy en día la mayoría de las instalaciones de tales organizaciones han quedado en desuso, convertidas en “elefantes blancos” que evocan al esplendor del pasado.

Este contexto, sumado a la liberalización comercial emprendida entre 1985 y 1987, provocó en primer término el desplome del precio del grano, dejando a los productores de cacao expuestos a la volatilidad de los mercados internacionales; esta caída respondió a las desventajas competitivas estructurales del cacao mexicano frente a los grandes países exportadores (Priego-Castillo *et al.*, 2009), lo que dejó a los productores sin un respaldo institucional (pues el Estado dejó de fungir como garante comercial), en un entorno marcado por la desregulación. Dichos eventos provocaron que algunos productores cambiaran de cultivo o se dedicaran a actividades económicas ajenas al sector agrícola.

Posteriormente, con la reforma al artículo 27 constitucional en 1992, se facilitó la compra-venta de propiedades ejidales, al permitir que los ejidatarios obtuvieran el dominio pleno de sus parcelas y, por ende, pudieran venderlas legalmente (incorporándolas así al mercado inmobiliario). Además, un mayor fomento gubernamental de otras actividades agrícolas, como ganadería (principalmente ganado vacuno) y la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), impulsó el abandono del cultivo de cacao en favor de opciones con mayores subsidios y rentabilidad, alineándose con la lógica de maximización de ganancias y desplazando la lógica de seguridad alimentaria (que se basa en la subsistencia y la reproducción familiar). En suma, esto incentivó el reemplazo documentado (tanto en la literatura como en campo) de SAF de cacao por sistemas agrícolas más intensivos y menos sostenibles.

Literatura citada

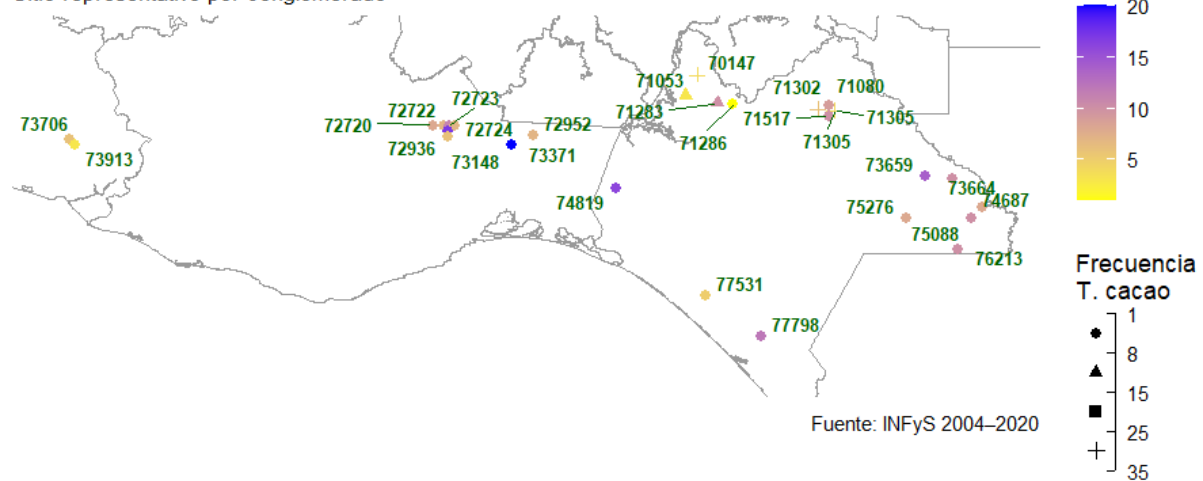
- Aguilar, L. (2023). *INCATABSA*. <https://detabascosoy.com/incatabsa/> (Consultado el 6 de octubre de 2025)
- Chávez-García, E., Stephan, R., y Galmiche-Tejeda, Á. (2012). Lógica de manejo del huerto familiar en el contexto del impacto modernizador en Tabasco, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 9(68), 177–200.
- Córdova Ávalos, V., Sánchez Hernández, M., Estrella Chulím, N. G., Macías Layalle, A., Sandoval Castro, E., Martínez Saldaña, T., y Ortiz García, C. F. (2001). Factores que afectan la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en el ejido Francisco I Madero del Plan Chontalpa Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 34(17), 93–100.
- Córdova-Avalos, V., Mendoza-Palacios, J. D., Vargas-Villamil, L., Izquierdo-Reyes, F., y Ortiz-García, C. F. (2008). Participación de las asociaciones campesinas en el acopio y comercialización de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 24(2), 147–158.
- Flores López, J. M. (2006). *Chontales de Tabasco*. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CDI). (Pueblos indígenas del México contemporáneo). <https://www.gob.mx/inpi/documentos/monografia-de-los-chontales-de-tabasco>
- Fuentes Aguilar, L. (1977). El Estado como organizador del espacio: El plan Chontalpa, un ejemplo. *Investigaciones Geográficas*, 8(5), 67–82. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111977000100005&lang=es
- Hernández, B. R., Armando, L., Navarro, A., Rivera, A. A., Francisco, J., y López, J. (2016). Evidencias del cambio climático en el estado de Tabasco 1961- 2010. *Cienc. Agríc*, 7(Pub. Esp. Núm. 14), 2645–2656. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016001002645&lng=es
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2001). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Tabasco* (Primera ed). INEGI. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223939/702825223939_1.pdf
- Marín Olán, P. (2020). *Y llegaron las panzonas: Ensayo regresivo sobre la ganadería bovina en Tabasco, 2015-1949* (First). Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Ediciones académicas en Sociología (Colofón S.A. de C.V.). <https://doi.org/10.19136/book241>
- Martínez Assad, C. (1996). *Breve historia de Tabasco* (1era ed.). FIDEICOMISO HISTORIA DE LAS AMÉRICAS; COLEGIO DE MÉXICO; FONDO DE CULTURA ECONÓMICA. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/estados/libros/tabasco/html/tabasco.html>

- Sánchez, A. J., y Barba, E. (2005). Biodiversidad de Tabasco. *En* J. Bueno, F. Álvarez, y S. Santiago (Eds.), *Biodiversidad del Estado de Tabasco* (pp. 1–16). Instituto de Biología, UNAM-CONABIO.
- SIAP. (2022). *Datos Abiertos: Estadística de Producción Agrícola*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php (Consultado el 8 de octubre de 2022)
- Somos Más Tabasco. (2023). *INCATABSA: Una historia de décadas de esfuerzos por mantener viva la tradición chocolatera*. <https://somosmas.news/incatabsa-una-historia-de-decadas-de-esfuerzos-por-mantener-viva-la-tradicion-chocolatera-de-tabasco/> (Consultado el 8 de octubre de 2025)
- Vásquez, M. A. (Ed.). (2000). *Chontales de Tabasco*. Proyecto Perfiles Indígenas de México, Documento de trabajo. <https://www.aacademica.org/salomon.nahmad.sitton/61>
- Zavala, C. J., y Castillo A., O. (2007). Cambios de uso de la tierra en el Estado de Tabasco. *En* D. J. Palma-López y A. Triano S. (Eds.), *Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco: Vol. II* (pp. 38–56). Colegio de Postgraduados–ISPROTAB–FUPROTAB.

Apéndice 9. Mapa de los conglomerados del INFyS 2004-2020

Conglomerados INFyS con presencia de *T. cacao*

Sitio representativo por conglomerado



Fuente: elaboración propia en RStudio con datos del INFyS

Apéndice 10. Análisis ecológico de los sitios del INFyS con presencia de *T. cacao*.

UMP	Sitio	Localidad	X	Y	Año	Dq (cm)	Fr.	Sp.	% de Fr. <i>T. cacao</i>	Fr. <i>T. cacao</i>	Las cuatro especies más frecuentes
71080	4	Salto de Agua, Chiapas	-92.0299	17.3246	2006	13.3	25	9	16	4	<i>Alchornea latifolia</i> (16%), <i>Ocotea sinuata</i> (16%), <i>Saurauia yasicae</i> (16%), <i>T. cacao</i> (16%)
71305	1	Salto de Agua, Chiapas	-91.9861	17.2767	2006	12.9	39	5	76.9	30	<i>T. cacao</i> (76.9%), <i>Gliricidia sepium</i> (10.3%), <i>Inga vera</i> (7.7%), <i>Erythrina americana</i> (2.6%)
71305	2	Salto de Agua, Chiapas	-91.9861	17.2770	2006	12.4	13	2	69.2	9	<i>T. cacao</i> (69.2%), <i>Gliricidia sepium</i> (30.8%).
71305	3	Salto de Agua, Chiapas	-91.9858	17.2765	2006	10.3	39	4	76.9	30	<i>T. cacao</i> (76.9%), <i>Cecropia peltata</i> (10.3%), <i>Erythrina americana</i> (7.7%), <i>Ochroma pyramidale</i> (5.1%)
72720	2	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.5231	17.1559	2005	17.1	18	8	16.7	3	<i>Bursera simaruba</i> (22.2%), <i>Ficus insipida</i> (22.2%), <i>Andira inermis</i> (16.7%), <i>T. cacao</i> (16.7%)
72720	4	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.5233	17.1553	2005	17.9	16	6	25	4	<i>Schefflera morototoni</i> (25%), <i>T. cacao</i> (25%), <i>Brosimum alicastrum</i> (18.8%), <i>Trichilia hirta</i> (18.8%)
72722	3	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.4294	17.1516	2005	19.2	18	7	11.1	2	<i>Ficus insipida</i> (22.2%), <i>Spondias mombin</i> (22.2%), <i>Brosimum alicastrum</i> (16.7%), <i>Andira galeottiana</i> (11.1%)
72723	2	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.3824	17.1498	2005	19.7	23	11	4.4	1	<i>Brosimum alicastrum</i> (21.7%), <i>Andira galeottiana</i> (13%), <i>Ceiba aesculifolia</i> (13%), <i>Cordia alliodora</i> (13%)
72724	3	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.3355	17.1474	2005	20	21	7	9.5	2	<i>Calophyllum brasiliense</i> (33.3%), <i>Croton glabellus</i> (19%), <i>Ceiba aesculifolia</i> (14.3%), <i>Ficus insipida</i> (9.5%)
72936	3	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.3849	17.1044	2005	19.8	27	17	7.4	2	<i>Andira galeottiana</i> (14.8%), <i>Ficus insipida</i> (11.1%), <i>Brosimum alicastrum</i> (7.4%), <i>Bursera simaruba</i> (7.43%)

UMP	Sitio	Localidad	X	Y	Año	Dq (cm)	Fr.	Sp.	% de Fr. T. cacao	Fr. T. cacao	Las cuatro especies más frecuentes
73148	3	San Juan Mazatlan, Oaxaca	-95.3864	17.0592	2005	19.4	16	6	18.8	3	<i>Ficus insipida</i> (25%), <i>AndirQqa galeottiana</i> (18.8%), <i>Spondias mombin</i> (18.8%), <i>T. cacao</i> (18.8%)
73371	4	Santa Maria Chimalapa, Oaxaca	-94.8266	16.9878	2005	45.8	31	20	3.2	1	<i>Brosimum alicastrum</i> (9.7%), <i>Schefflera morototoni</i> (9.7%), <i>Symplocos coccinea</i> (9.7%), <i>Cassia grandis</i> (6.5%)
73659	3	Ocosingo, Chiapas	-91.1813	16.7227	2005	25.6	30	14	3.3	1	<i>Licania platypus</i> (30%), <i>Acacia collinsii</i> (13.3%), <i>Guatteria anomala</i> (10%), <i>Spondias mombin</i> (10%)
73664	1	Ocosingo, Chiapas	-90.9477	16.7054	2006	26.3	25	10	4	1	<i>Brosimum alicastrum</i> (28%), <i>Guarea glabra</i> (28%), <i>Spondias mombin</i> (12%), <i>Dialium guianense</i> (8%)
73706	3	Malinaltepec, Guerrero	-98.7209	17.0342	2005	18.8	9	6	22.2	2	<i>Carica papaya</i> (22.2%), <i>Mangifera indica</i> (22.2%), <i>T. cacao</i> (22.2%), <i>Brosimum alicastrum</i> (11.1%)
73913	4	San Luis Acatlan, Guerrero	-98.6753	16.9881	2005	22.7	6	3	16.7	1	<i>Inga</i> spp. (66.7%), <i>Arbutus xalapensis</i> (16.7%), <i>T. cacao</i> (16.7%)
74687	3	Ocosingo, Chiapas	-90.6861	16.4589	2006	43.3	12	8	8.3	1	<i>Attalea butyracea</i> (33.3%), <i>Rinorea guatemalensis</i> (16.7%), <i>Ampelocera hottlei</i> (8.3%), <i>Amphitecna apiculata</i> (8.3%)
76213	3	Marques de Comillas, Chiapas	-90.9015	16.1137	2005	18.9	17	10	5.9	1	<i>Posoqueria latifolia</i> (29.4%), <i>Hirtella americana</i> (17.6%), <i>Eugenia axillaris</i> (11.8%), <i>Calophyllum brasiliense</i> (5.9%)
77531	2	Pijijiapan, Chiapas	-93.1228	15.7222	2009	11.2	13	5	15.4	2	<i>Guazuma ulmifolia</i> (53.8%), <i>Anacardium occidentale</i> (15.4%), <i>T. cacao</i> (15.4%), <i>Annona purpurea</i> (7.7%)
75276	3	Las Margaritas, Chiapas	-91.3489	16.3719	2010	31.1	17	8	17.7	3	<i>Inga micheliana</i> (29.4%), <i>T. cacao</i> (17.6%), <i>Castilla elastica</i> (11.8%), <i>Cecropia obtusifolia</i> (11.8%)
75088	1	Ocosingo, Chiapas	-90.7833	16.3769	2009	22.2	19	7	5.3	1	<i>Schizolobium parahyba</i> (31.6%), <i>Guarea glabra</i> (26.3%), <i>Cymbopetalum</i>

UMP	Sitio	Localidad	X	Y	Año	Dq (cm)	Fr.	Sp.	% de Fr. T. cacao	Fr. T. cacao	Las cuatro especies más frecuentes
											<i>penduliflorum</i> (21.1%), <i>Ampelocera hottlei</i> (5.3%)
75088	4	Ocosingo, Chiapas	-90.7834	16.3767	2009	18.6	21	10	14.3	3	<i>Cryosophila stauracantha</i> (19%), no identificado (19%), <i>Schizolobium parahyba</i> (14.3%), <i>T. cacao</i> (14.3%)
74819	4	Cintalapa, Chiapas	-93.9085	16.6244	2009	11.9	63	16	4.8	3	<i>Psidium sartorianum</i> (19%), <i>Randia aculeata</i> (14.3%), no identificado (11.1%), <i>Bursera diversifolia</i> (7.9%)
74687	3	Ocosingo, Chiapas	-90.6861	16.4590	2010	30.2	11	7	9.1	1	<i>Cecropia obtusifolia</i> (27.3%), <i>Brosimum alicastrum</i> (18.2%), <i>Ilex discolor</i> (18.2%), <i>Alseis yucatanensis</i> (9.1%)
72952	1	Santa Maria Chimalapa, Oaxaca	-94.6341	17.0692	2011	19.6	18	7	5.6	1	<i>Nectandra ambigens</i> (55.6%), <i>Piper aduncum</i> (11.1%), <i>Terminalia amazonia</i> (11.1%), <i>Alchornea latifolia</i> (5.6%)
71517	1	Chilon, Chiapas	-92.0361	17.2347	2010	18.7	17	10	5.9	1	<i>Brosimum alicastrum</i> (17.6%), <i>Trophis racemosa</i> (17.6%), <i>Cojoba arborea</i> (11.8%), <i>Spondias purpurea</i> (11.8%)
71305	3	Salto de Agua, Chiapas	-91.9859	17.2764	2013	13.4	10	4	50	5	<i>T. cacao</i> (50%), <i>Cordia alliodora</i> (20%), <i>Heliocarpus donnellsmithii</i> (20%), <i>Inga punctata</i> (10%)
71302	1	Tumbalá, Chiapas	-92.1268	17.2866	2014	11.1	35	7	82.9	29	<i>T. cacao</i> (82.9%), <i>Cedrela odorata</i> (2.9%), <i>Cupania scrobiculata</i> (2.9%), <i>Leucaena collinsii</i> (2.9%)
71302	2	Tumbalá, Chiapas	-92.1269	17.2869	2014	14.4	12	7	25	3	<i>T. cacao</i> (25%), <i>Ardisia revoluta</i> (16.7%), <i>Gliricidia sepium</i> (16.7%), <i>Heliocarpus donnellsmithii</i> (16.7%)
71302	4	Tumbalá, Chiapas	-92.1271	17.2863	2014	11.7	41	6	82.9	34	<i>T. cacao</i> (82.9%), no identificado (7.3%), <i>Cecropia obtusifolia</i> (2.4%), <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (2.4%)
71286	4	Amatan, Chiapas	-92.8772	17.3333	2009	16.2	1	1	100	1	<i>T. cacao</i> (100%)

UMP	Sitio	Localidad	X	Y	Año	Dq (cm)	Fr.	Sp.	% de Fr. T. cacao	Fr. T. cacao	Las cuatro especies más frecuentes
71283	2	Solosuchiapa, Chiapas	-93.0183	17.3434	2014	16.7	31	8	22.6	7	<i>Heliocarpus appendiculatus</i> (35.5%), <i>T. cacao</i> (22.6%), <i>Lippia myriocephala</i> (12.9%), <i>Symplocos pycnantha</i> (9.7%)
71053	4	Ostuacan, Chiapas	-93.2972	17.4039	2012	15.6	26	3	42.3	11	<i>T. cacao</i> (42.3%), no identificado (30.8%), <i>Gliricidia sepium</i> (26.9%), <i>T. cacao</i> (68.6%), no identificado (23.5%), <i>Castilla elastica</i> (5.9%), <i>Guazuma ulmifolia</i> (2%)
70147	1	Juarez, Chiapas	-93.1914	17.5789	2012	15	51	4	68.6	35	<i>T. cacao</i> (73.7%), <i>Cedrela odorata</i> (10.5%), no identificado (10.5%), <i>Guazuma ulmifolia</i> (5.3%)
70147	2	Juarez, Chiapas	-93.1914	17.5792	2012	20.7	38	4	73.7	28	<i>T. cacao</i> (69.7%), no identificado (18.2%), <i>Cedrela odorata</i> (9.1%), <i>Cocos nucifera</i> (3%)
70147	3	Juarez, Chiapas	-93.1912	17.5786	2012	20.8	33	4	69.7	23	No identificado (42.9%), <i>T. cacao</i> (28.6%), <i>Castilla elastica</i> (14.3%), <i>Diphysa carthagenensis</i> (14.3%)
70147	4	Juarez, Chiapas	-93.1916	17.5787	2012	17.7	7	4	28.6	2	<i>T. cacao</i> (45.5%), <i>Heliocarpus donnellsmithii</i> (18.2%), <i>Muntingia calabura</i> (9.1%), <i>Cecropia obtusifolia</i> (6.1%)
71283	2	Solosuchiapa, Chiapas	-93.0183	17.3431	2016	21.4	33	10	45.5	15	<i>Pouteria sapota</i> (38.5%), <i>Albizia adinocephala</i> (15.4%), <i>Cordia alliodora</i> (7.7%), <i>Inga jinicuil</i> (7.7%)
77798	1	Acacoyagua, Chiapas	-92.6340	15.3769	2015	12.3	13	8	7.7	1	<i>Persea americana</i> (35.9%), <i>Albizia adinocephala</i> (12.8%), <i>Citrus aurantiifolia</i> (10.3%), no identificado (10.3%)
77798	2	Acacoyagua, Chiapas	-92.6340	15.3769	2015	16	39	12	7.7	3	

UMP (Unidad de Muestreo Primaria): Conglomerado. Fr.: frecuencia por sitio. Sp.: Número de especies por sitio. Dq: Diámetro cuadrático promedio. Fuente: elaboración propia con base los datos del arbolado del INFyS (CONAFOR, 2025), con la integración de datos de los tres periodos (2004-2007, 2009-2015 y 2015-2020). El Dq se define como el diámetro correspondiente al árbol de área basal promedio dentro de una muestra o rodal forestal.

