



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

## DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

### DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL

#### CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CAFETALES DE VERACRUZ

#### TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

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

Presenta:

**PATRICIA RUIZ GARCÍA**

Bajo la supervisión de:

**Dr. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS**



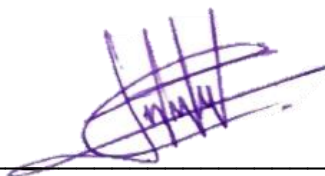
Chapingo, Estado de México, junio de 2022

**CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE MITIGACIÓN Y  
ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CAFETALES DE VERACRUZ**

Tesis realizada por **PATRICIA RUIZ GARCÍA** 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:



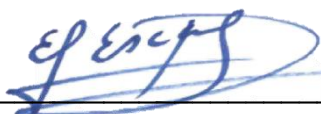
Dr. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

ASESOR:



Dr. EDUARDO VALDÉS VELARDE

ASESOR:



Dr. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

LECTOR  
EXTERNO:



Dra. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ

## CONTENIDO

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE CUADROS .....                                                                                                       | vi  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                                                       | ix  |
| DEDICATORIAS .....                                                                                                           | x   |
| AGRADECIMIENTOS .....                                                                                                        | xi  |
| DATOS BIOGRÁFICOS .....                                                                                                      | xii |
| RESUMEN GENERAL .....                                                                                                        | xiv |
| GENERAL ABSTRACT .....                                                                                                       | xv  |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....                                                                                                 | 1   |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL .....                                                                                                  | 3   |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                                                             | 3   |
| 1.3. HIPÓTESIS .....                                                                                                         | 4   |
| 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS .....                                                                                            | 4   |
| 1.5. LITERATURA CITADA.....                                                                                                  | 6   |
| 2. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO .....                                                                                        | 8   |
| 2.1. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ.....                                                             | 8   |
| 2.2. EL PAPEL DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO .....                                          | 10  |
| 2.3. MODELO BÁSICO DE SINERGIA PARA MEDIR LAS ACCIONES DE ADAPTACIÓN-MITIGACIÓN EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ ..... | 12  |
| 2.4. ESQUEMA METODOLÓGICO .....                                                                                              | 14  |
| 2.5. ÁREA DE ESTUDIO .....                                                                                                   | 14  |
| 2.6. LITERATURA CITADA.....                                                                                                  | 16  |
| 3. SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ COMO ALTERNATIVA DE PRODUCCIÓN SUSTENTABLE PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES DE MÉXICO .....      | 20  |
| 3.1. RESUMEN .....                                                                                                           | 20  |
| 3.2. ABSTRACT .....                                                                                                          | 21  |
| 3.3. INTRODUCCIÓN .....                                                                                                      | 22  |
| 3.4. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN .....                                                                               | 23  |
| 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                            | 23  |
| 3.5.1. <i>Concepto y evolución del desarrollo sustentable</i> .....                                                          | 23  |
| 3.5.2. <i>Sistemas agroforestales de café y el desarrollo sustentable</i> .....                                              | 26  |
| Beneficios ambientales .....                                                                                                 | 27  |
| Beneficios sociales.....                                                                                                     | 30  |
| Beneficios económicos.....                                                                                                   | 31  |
| 3.5.3. <i>Principales amenazas que afectan a los sistemas agroforestales de café</i> .....                                   | 32  |
| 3.6. CONCLUSIONES .....                                                                                                      | 35  |
| 3.7. RECOMENDACIONES .....                                                                                                   | 35  |
| 3.8. AGRADECIMIENTOS .....                                                                                                   | 36  |
| 3.9. LITERATURA CITADA .....                                                                                                 | 37  |
| 4. BIOPHYSICAL AND STRUCTURAL COMPOSITION CHARACTERIZATION IN AGROFORESTRY SYSTEMS OF ORGANIC COFFEE FROM VERACRUZ.....      | 43  |

|        |                                                                                                                    |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.   | SUMMARY.....                                                                                                       | 43 |
| 4.2.   | RESUMEN .....                                                                                                      | 44 |
| 4.3.   | INTRODUCCIÓN .....                                                                                                 | 45 |
| 4.4.   | MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                         | 46 |
| 4.4.1. | <i>Caracterización del medio biofísico .....</i>                                                                   | 47 |
| 4.4.2. | <i>Clasificación de las parcelas cafetaleras.....</i>                                                              | 47 |
| 4.4.3. | <i>Composición y estructura de las parcelas cafetaleras.....</i>                                                   | 48 |
| 4.5.   | RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                       | 49 |
| 4.5.1. | <i>Caracterización del medio biofísico .....</i>                                                                   | 49 |
| 4.5.2. | <i>Clasificación de las parcelas cafetaleras.....</i>                                                              | 52 |
| 4.5.3. | <i>Composición y estructura de las parcelas cafetaleras.....</i>                                                   | 53 |
| 4.6.   | CONCLUSIONES .....                                                                                                 | 61 |
| 4.7.   | REFERENCIAS .....                                                                                                  | 62 |
| 5.     | RESERVAS DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ (C. ARABICA L.) ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO: CASO MÉXICO..... | 67 |
| 5.1.   | RESUMEN.....                                                                                                       | 67 |
| 5.2.   | ABSTRACT .....                                                                                                     | 68 |
| 5.3.   | INTRODUCCIÓN.....                                                                                                  | 69 |
| 5.4.   | MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                         | 71 |
| 5.4.1. | <i>Área de estudio.....</i>                                                                                        | 71 |
| 5.4.2. | <i>Determinación de la línea base de carbono en la biomasa aérea y del suelo .....</i>                             | 74 |
|        | Biomasa aérea .....                                                                                                | 74 |
|        | Suelo .....                                                                                                        | 76 |
| 5.4.3. | <i>Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el Escenario base .....</i>                 | 76 |
|        | Biomasa aérea .....                                                                                                | 76 |
|        | Suelo .....                                                                                                        | 77 |
| 5.4.4. | <i>Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático.....</i>                       | 78 |
| 5.4.5. | <i>Análisis de datos.....</i>                                                                                      | 79 |
| 5.5.   | RESULTADOS .....                                                                                                   | 79 |
| 5.5.1. | <i>Línea base de C en la biomasa aérea y del suelo .....</i>                                                       | 80 |
|        | Biomasa aérea .....                                                                                                | 80 |
|        | Suelo .....                                                                                                        | 81 |
| 5.5.2. | <i>Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el escenario base.....</i>                  | 81 |
|        | Biomasa aérea .....                                                                                                | 81 |
|        | Suelo .....                                                                                                        | 82 |
| 5.5.3. | <i>Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático.....</i>                       | 83 |
| 5.6.   | DISCUSIÓN .....                                                                                                    | 87 |
| 5.7.   | CONCLUSIONES.....                                                                                                  | 91 |
| 5.8.   | AGRADECIMIENTOS .....                                                                                              | 92 |
| 5.9.   | REFERENCIAS .....                                                                                                  | 92 |
| 6.1.   | ABSTRACT .....                                                                                                     | 97 |
| 6.2.   | INTRODUCTION.....                                                                                                  | 98 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3. MATERIALS AND METHODS .....                                                                                                      | 101 |
| 6.3.1. <i>Organizations and Regions</i> .....                                                                                         | 101 |
| 6.3.2. <i>Historical Analysis, Observed and Projected Changes</i> .....                                                               | 102 |
| 6.3.3. <i>Local Knowledge</i> .....                                                                                                   | 103 |
| 6.3.4. <i>Evaluation of Adaptation Strategies</i> .....                                                                               | 104 |
| Carbon Content as Indicators of Future Conditions .....                                                                               | 104 |
| Water Balance as Indicator of Future Conditions .....                                                                                 | 105 |
| 6.4. RESULTS AND DISCUSSION.....                                                                                                      | 105 |
| 6.4.1. <i>Climate and Climate Change</i> .....                                                                                        | 105 |
| 6.4.2. <i>Local Knowledge on Adaptation to Extreme Events</i> .....                                                                   | 108 |
| Carbon Content Projections for Future Conditions .....                                                                                | 113 |
| Water Balance Projections for Future Conditions .....                                                                                 | 116 |
| 6.5. CONCLUSIONS .....                                                                                                                | 118 |
| 6.6. ACKNOWLEDGMENTS: .....                                                                                                           | 119 |
| 6.7. REFERENCES.....                                                                                                                  | 120 |
| 7. RECOMENDACIONES DE ADAPTACIÓN-MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO CON<br>POTENCIAL DE SINERGIA EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ ..... | 127 |
| 7.1. RESUMEN .....                                                                                                                    | 127 |
| 7.2. ABSTRACT .....                                                                                                                   | 128 |
| 7.3. INTRODUCCIÓN .....                                                                                                               | 129 |
| 7.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                                       | 132 |
| 7.4.1. <i>Diseño de recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de<br/>sinergia</i> .....              | 132 |
| 7.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....                                                                                                     | 137 |
| 7.5.1. <i>Diseño de recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de<br/>sinergia</i> .....              | 137 |
| Recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de sinergias .....                                         | 144 |
| 7.6. CONCLUSIONES .....                                                                                                               | 147 |
| 7.7. LITERATURA CITADA.....                                                                                                           | 148 |
| 8. CONCLUSIONES GENERALES .....                                                                                                       | 150 |
| 9. APÉNDICES.....                                                                                                                     | 152 |

## LISTA DE CUADROS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Cuadro 2.1.</b> Impactos directos en el cafetal a causa de diferentes amenazas climáticas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10 |
| <b>Cuadro 3.1.</b> Principales servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas agroforestales de café en México. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 28 |
| <b>Cuadro 4.1.</b> Clasificación de los diferentes sistemas cafetaleros en México.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 48 |
| <b>Cuadro 4.2.</b> Variables del medio biofísico y topoformas encontradas en las parcelas de café orgánico bajo sombra en el municipio de Chocamán, Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                                                                                              | 51 |
| <b>Cuadro 4.3.</b> Distribución mensual de la precipitación (mm) en las parcelas cafetaleras del municipio de Chocamán, Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 51 |
| <b>Cuadro 4.4.</b> Valores estructurales de la vegetación arbórea y arbustiva del policultivo tradicional en las diferentes topoformas del municipio de Chocamán, Veracruz.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 55 |
| <b>Cuadro 4.5.</b> Valores estructurales de la vegetación arbórea y arbustiva del policultivo comercial en el municipio de Chocamán, Veracruz.....                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| <b>Cuadro 5.1.</b> Característica de los diseños agroforestales y las principales cohortes en las fincas cafetaleras ( <i>C. arabica</i> L.) de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.....                                                                                                                                                                                                                    | 74 |
| <b>Cuadro 5.2.</b> Ecuaciones alométricas usadas para determinar el contenido de C orgánico total (t C ha <sup>-1</sup> ) en la línea base de la biomasa aérea en sistemas agroforestales de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México .....                                                                                                                                                                            | 75 |
| <b>Cuadro 5.3.</b> Principales parámetros de entrada para modelar la biomasa aérea con CO2Fix en las cohortes de los diseños agroforestales de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México .....                                                                                                                                                                                                                          | 75 |
| <b>Cuadro 5.4.</b> Medias de la Biomasa máxima + SD (t ha <sup>-1</sup> ) y C orgánico total en la biomasa aérea + SD (t C ha <sup>-1</sup> ), así como de follaje, raíces, ramas y tallos en las principales cohortes identificadas en los diseños agroforestales de café ( <i>C. arabica</i> L.) de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S., Chocamán, Veracruz, México. ....                                                                  | 80 |
| <b>Cuadro 5.5.</b> Cambios realizados en los parámetros generales de temperatura (°C), precipitación (mm) y ET0 del periodo de crecimiento del escenario base para simular las existencias de C bajo escenarios de cambio climático en cada horizonte de tiempo de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. ....                                                                                                      | 84 |
| <b>Cuadro 5.6.</b> Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha <sup>-1</sup> ) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D1= árboles de sombra-café ( <i>C. arabica</i> L.) en el valle evaluado en la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano).....        | 85 |
| <b>Cuadro 5.7.</b> Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha <sup>-1</sup> ) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D2= árboles de sombra-café ( <i>C. arabica</i> L.) plátano en laderas evaluado en la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes Escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano)..... | 86 |
| <b>Cuadro 5.8.</b> Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha <sup>-1</sup> ) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D3= árboles de sombra-café ( <i>C. arabica</i> L.) plátano en el valle evaluado en la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán,                                                                                                                        |    |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano).....                                                                        | 87  |
| <b>Table 6.1.</b> Classification of observed change in climate indices. ....                                                                                                                   | 103 |
| <b>Table 6.2.</b> Observed changes in trends in weather stations and adaptation actions (individual and collective).....                                                                       | 106 |
| <b>Table 6.3.</b> Carbon stocks in aerial biomass (Mg Cha <sup>-1</sup> ) projected for 50 years according to agroforestry designs (Chocamán,Veracruz).....                                    | 114 |
| <b>Table 6.4.</b> Changes in growing season variables. ....                                                                                                                                    | 117 |
| <b>Cuadro 7.1.</b> Métricas climáticas y fórmulas propuestas por Cavazos et al. (2013) para analizar el desempeño de los modelos de circulación general.....                                   | 134 |
| <b>Cuadro 7.2.</b> Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para precipitación para evaluar su desempeño en la región sureste de México.....                                                   | 135 |
| <b>Cuadro 7.3.</b> Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura media para evaluar su desempeño en la región sureste de México.....                                               | 135 |
| <b>Cuadro 7.4.</b> Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura mínima para evaluar su desempeño en la región sureste de México.....                                              | 136 |
| <b>Cuadro 7.5.</b> Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura máxima para evaluar su desempeño en la región sureste de México. ....                                             | 136 |
| <b>Cuadro 7.6.</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura anual con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. ....                  | 139 |
| <b>Cuadro 7.7.</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura mínima con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. ....                 | 139 |
| <b>Cuadro 7.8.</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura máxima con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. ....                 | 140 |
| <b>Cuadro 7.9.</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación anual con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. ....   | 142 |
| <b>Cuadro 7.10.</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación mínima con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. .... | 142 |
| <b>Cuadro 7.11</b> Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación máximas con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz. .... | 143 |
| <b>Cuadro 7.12.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> (kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> ) en las diferentes estaciones del año. ....                                                           | 144 |
| <b>Cuadro 7.13.</b> Recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de generar sinergias en sistemas cafetaleros de Catuaí Amarillo S.S.S. Chocamán, Veracruz. .... | 146 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 2.1.</b> Esquema metodológico .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 14  |
| <b>Figura 2.2.</b> Localización de las parcelas cafetaleras pertenecientes a la Sociedad de Solidaridad Social Catuái Amarillo, Chocamán, Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 15  |
| <b>Figura 4.1.</b> Distribución geográfica de las diferentes topoformas obtenidas mediante la metodología SOTER (Oldeman y van Engelen, 1993) y tipo de suelo de acuerdo con INEGI (2013) en las parcelas cafetaleras de Chocamán, Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                  | 50  |
| <b>Figura 4.2.</b> Tipo de clima de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificado por García (2004) en las parcelas cafetaleras de Chocamán, Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 54  |
| <b>Figura 4.3.</b> Perfil semi-realista del policultivo tradicional de café en el municipio de Chocamán, Veracruz:.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 57  |
| <b>Figura 4.4.</b> Perfil semirealista del policultivo comercial de café en el municipio de Chocamán, Veracruz.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 58  |
| <b>Figura 5.1.</b> Ubicación de las fincas cafetaleras ( <i>C. arabica</i> L.) evaluadas en la Sociedad de Solidaridad Social Catuái Amarillo S. de SS. Localizadas en el municipio de Chocamán, Veracruz, México entre los paralelos 18° 58' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 97° 00' y 97° 06' de longitud oeste. 2020. ....                                                                                                          | 72  |
| <b>Figura 5.2.</b> Evolución en un periodo de cincuenta años de las existencias de C en la biomasa aérea (CBA) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base de los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México.....                                                                                                                                                                    | 82  |
| <b>Figura 5.3.</b> Evolución en un periodo de 50 años de las existencias de carbono orgánico del suelo (COS) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base en los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. ....                                                                                                                                                                     | 83  |
| <b>Figure 6.1.</b> Regional coffee-producing associations studied in the state of Veracruz.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 102 |
| <b>Figure 6.2.</b> Projections for 50-year carbon contents (Mg C ha <sup>-1</sup> ) in aerial biomass samples for (a) agroforestry design 1 (Af1), involving coffee plants with shade trees and living barriers; (b) agroforestry design 2 (Af2), involving coffee plants with shade trees, banana trees, and living barriers; and (c) agroforestry design 3 (Af3), involving coffee plants with shade trees, banana trees, and living fences..... | 116 |
| <b>Figura 7.1.</b> Localización del área de estudio en la zona sureste propuesta por Cavazos et al. (2013).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 133 |
| <b>Figura 7.2.</b> Temperatura media, mínima y máxima bajo los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos CNRM-CM6-1, MIROC6 y MRI-ESM2-0 comparada con la línea base en el municipio de Chocamán, Veracruz.....                                                                                                                                                                                                                               | 138 |
| <b>Figura 7.3.</b> Precipitación total anual, mínima y máxima bajo los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos CNRM-CM6-1, MIROC6 y MRI-ESM2-0 comparada con la línea base en la región cafetalera del centro de Veracruz. ....                                                                                                                                                                                                             | 141 |

## **DEDICATORIAS**

A mis tres amores, mi esposo Moisés Matías Ramos, y mis dos hijas Yamili y Denise. Mi amorcito corazón, gracias por acompañarme en esta etapa de mi vida, sin tu presencia, consejos, paciencia y amor, mi camino estaría incompleto. Espero que sigamos caminando juntos por siempre. Yamili y Denise, gracias a ustedes no tendría la inspiración para seguir adelante. Son mi luz y mi motivación, las amo.

A mis padres, José Ignacio y Martha por darme las bases para seguir creciendo y otorgarme su apoyo incondicional en todo momento. Los amo.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por su amistad, apoyo y consejos. Gracias por confiar en mí.

En especial al Dr. Jesús David Gómez Díaz por brindarme la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente, y por darme una verdadera amistad, confiar en mí y aconsejarme. Por contarme tantas historias que me motivaron a no retroceder nunca. Por hacerme reír en los momentos más complicados, pero sobre todo por ser una parte fundamental en mi vida profesional y de amistad. Estaré eternamente agradecida con todo el apoyo que me brindaste. Gracias por confiar en mí en todo momento. Sigue tu camino mi gran amigo, espero que algún día nos volvamos a reunir nuevamente para tener esas largas conversaciones y anécdotas que siempre me brindaron conocimiento, motivación y sabiduría.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia y Suelos, así como al Programa de Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para el desarrollo y culminación de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jesús David Gómez Díaz que en paz descanse, por motivarme a seguir con mis estudios de posgrado, por compartir sus conocimientos y comentarios que fueron la base para el adecuado desarrollo de este proyecto de investigación. Muchas gracias por todo.

Al Dr. Alejandro Ismael Monterroso Rivas por ser el pilar de esta investigación y brindarme su apoyo, su paciencia y tiempo. Gracias por compartir sus conocimientos y experiencias que fueron de gran utilidad, por creer siempre en mi capacidad, por corregirme, aconsejarme y motivarme cuando fue necesario. Gracias por todo su apoyo.

A la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez quien fue parte fundamental en la etapa final de esta investigación y quien me brindó la oportunidad de obtener mayores conocimientos durante la estancia Doctoral en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM.

Al Dr. Esteban Escamilla Prado por brindarme la oportunidad de trabajar en la cooperativa Catuaí Amarillo S. de S.S. Gracias por todo su apoyo, motivación y orientación, por su mejor disposición en todo momento, además de sus acertados comentarios

Al Dr. Eduardo Valdés Velarde por su disposición y tiempo dedicado, sus comentarios y atención brindada en esta investigación.

A los productores de la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo por que de manera desinteresada proporcionaron información, sin la cual este estudio no hubiera sido posible.

## DATOS BIOGRÁFICOS



### Datos personales

|                     |                            |
|---------------------|----------------------------|
| Nombre              | Patricia Ruiz García       |
| Fecha de nacimiento | 05 de marzo de 1987        |
| Lugar de nacimiento | Ecatepec, Estado de México |
| CURP                | RUGP870305MMCZRT08         |
| Cédula profesional  | 09059500                   |

### Desarrollo académico

|                           |                                                                                                                                             |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maestría (2013-2014):     | Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Grado obtenido: Maestro en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. |
| Licenciatura (2005-2009): | División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Grado obtenido: Ingeniero en Restauración Forestal.                         |
| Preparatoria (2002-2005): | Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo.                                                                                       |

## **RESUMEN GENERAL**

### **CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CAFETALES DE VERACRUZ<sup>1</sup>**

Las sinergias entre acciones de adaptación-mitigación pueden disminuir el impacto del cambio climático en el cultivo de café en México. El objetivo de esta investigación fue diseñar un modelo de adaptación-mitigación al cambio climático en un sistema cafetalero mediante el análisis de sus sinergias que maximicen los beneficios ambientales, sociales y económicos, bajo distintos escenarios que permita al sistema cafetalero contar con elementos para enfrentar los efectos del cambio climático de forma programada. Se evaluaron 25 parcelas cafetaleras que pertenecen a la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo, ubicada en el municipio de Chocamán, Veracruz. Se obtuvieron los principales aspectos biofísicos y de composición estructural arbórea y arbustiva de los sistemas cafetaleros para simular el carbono total y potencial bajo distintos escenarios, mediante el modelo CO2FiX. Se realizó un análisis de riesgo y vulnerabilidad actual y futura, y se evaluaron las estrategias de adaptación basadas en el conocimiento tradicional de los productores para proyectar los principales cobeneficios ambientales (carbono). Se identificaron las amenazas climáticas y de manejo del sistema. Posteriormente se diseñaron algunas recomendaciones sinérgicas entre adaptación-mitigación que pueden considerarse efectivas para que se den situaciones ganar-ganar. Las recomendaciones diseñadas se enfocaron a reducir el estrés hídrico de la planta, aumentar la diversificación de especies y mejorar las prácticas agronómicas, al mismo tiempo que incrementan el potencial de captura de CO<sub>2</sub> y reducen las emisiones bajo distintos escenarios. Se deben realizar nuevas investigaciones en donde se consideren todos los sectores tanto políticos como sociales y académicos para incrementar el enfoque sinérgico en los sistemas cafetaleros.

**Palabras clave:** cobeneficios, captura de carbono, capacidad adaptativa.

---

<sup>1</sup> Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Patricia Ruiz García

Director de Tesis: Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas

## **GENERAL ABSTRACT**

### **CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF SYNERGIES BETWEEN MITIGATION AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN COFFEE FARMING IN VERACRUZ<sup>2</sup>**

Synergies between adaptation-mitigation actions can address climate change in coffee cultivation in Mexico. The objective of this research was to design a model of adaptation-mitigation to climate change in a coffee system through the analysis of its synergies that maximize environmental, social and economic benefits, under different scenarios that allow the coffee system to have elements to face the effects of climate change on a scheduled basis. Twenty-five coffee plots belonging to the Catuaí Amarillo Social Solidarity Society, located in the municipality of Chocamán, Veracruz, were evaluated. The main biophysical aspects and tree and shrub structural composition of coffee systems were obtained to simulate total and potential carbon under different scenarios using the CO2FiX model. An analysis of current and future risk and vulnerability was carried out and the adaptation strategies based on the traditional knowledge of the producers were evaluated and the main environmental co-benefits (carbon) were projected for 50 years. Climate and management threats to the system were identified. Subsequently, synergistic actions of adaptation-mitigation to climate change were elaborated. Some recommendations were designed that can be considered effective for win-win situations. The recommendations are focused on reducing the water stress of the plant, increasing the diversification of species and improving agronomic practices, while increasing the potential for capturing CO<sub>2</sub> and reducing emissions under different scenarios. New research should be carried out where all political, social and academic sectors are considered to increase the synergistic approach in coffee systems.

**Keywords:** co-benefits, carbon sequestration, adaptive capacity

---

<sup>2</sup> Doctor of Science in Multifunctional Agriculture for Sustainable Development.  
Universidad Autónoma Chapingo.  
Author: Patricia Ruiz García  
Advisor: Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Una de las mayores amenazas para el cultivo de café en México es el cambio climático (Almazroui et al., 2021; Ruiz-García et al., 2020) que está incrementando la temperatura media global y está alterando el régimen de lluvias (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021). Los cambios en el clima, tanto actuales como futuros, pueden perjudicar la fenología de *Coffea arabica* L. al alterar la floración, afectar el crecimiento y maduración del fruto, así como causar anomalías y aborto de hojas, flores y frutos (Parada-Molina et al., 2020; Ruiz-García et al., 2021). Además, se espera un incremento en la incidencia y severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*), así como otras enfermedades fúngicas para el 2050 (Parada-Molina et al., 2020).

Esta investigación se llevó a cabo en sistemas cafetaleros pertenecientes a la Sociedad de Solidaridad Social Catuái Amarillo, que se ubica en el municipio de Chocamán, Veracruz, siendo éste el segundo estado con mayor producción de café en México (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA], 2019). En el municipio de Chocamán, se detectó que, en el clima actual, se está presentando una irregularidad en el patrón de lluvias, así como periodos cálidos más prolongados y mínimos extremos más frecuentes (Ruiz-García et al., 2021). Además, se espera un incremento de la temperatura de hasta 5.5 °C y una disminución de la precipitación mayor a 300 mm para el periodo 2081-2100 (CMIP5, RCP 8.5) (Ruiz-García et al., 2021; Granados-Ramírez et al., 2018; Brígido et al., 2015).

Si continua el incremento de la temperatura y la variación en el régimen de lluvias en la región central cafetalera de Veracruz, se pronostica una caída en la producción de grano de hasta 34 % en comparación con el volumen de producción actual para el año 2050 (Brígido et al., 2015). Los pequeños productores que se dedican al cultivo de café bajo diferentes sistemas de producción en la región central de Veracruz (sistema especializado, policultivo tradicional y comercial, sistema de montaña y sistema a pleno sol) podrían verse afectados seriamente por esta caída en la producción.

Ante esta problemática el último informe del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC propone la integración de las estrategias de adaptación y mitigación para obtener sinergias entre ambas acciones y hacer frente al cambio climático (IPCC, 2022). Si bien existe consenso en que es necesario centrarse tanto en la adaptación como en la mitigación para abordar los impactos del cambio climático, se necesita una mejor comprensión de sus interacciones para maximizar de manera eficiente sus potenciales (Sharifi, 2021).

El uso de sistemas agroforestales tiene un alto potencial de generar acciones de adaptación con sinergias en mitigación (IPCC, 2022; Ruiz-García et al., 2021). A pesar de que los sistemas agroforestales tienen dicho potencial, es indispensable generar información de cómo evaluar y promover los cobeneficios entre ambas acciones y promover el efecto sinérgico (Zhao et al., 2018) con el objeto de mejorar los medios de vida de los pequeños productores de café en México ante el cambio climático actual y futuro.

El modelo básico de sinergia superaditiva podría ayudar a encontrar un punto de equilibrio entre acciones de adaptación-mitigación en sistemas agroforestales de café. Este paradigma menciona que el todo es mayor que la suma de las partes, ya que hay un resultado mejorado cuando los componentes interactúan entre sí (von Eye et al., 1998). Con esta perspectiva se busca lograr de manera óptima múltiples cobeneficios simultáneos mientras se mantiene y mejora la funcionalidad del sistema (Tschora & Cherubini., 2020). Sin embargo, existe información limitada sobre cómo medir el éxito de este enfoque y cuales prácticas

pueden considerarse efectivas para que se den situaciones ganar-ganar, con el objeto de ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático y al mismo tiempo, generar acciones de mitigación (Donnati, 2020; Harvey et al., 2017).

En la actualidad, aún no hay estudios de caso que aborden esta temática en sistemas agroforestales de café en México. Es indispensable generar mayor investigación sobre el tema, así como, adaptar y mejorar las metodologías existentes a las condiciones locales. Por tal motivo, en esta investigación se planteó el siguiente objetivo general y tres objetivos específicos:

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar un modelo de adaptación-mitigación al cambio climático en un sistema cafetalero mediante el análisis de sus sinergias, que maximice los beneficios ambientales, sociales y económicos, bajo distintos escenarios con cambio climático, que permita al sistema cafetalero contar con elementos para enfrentar los efectos del cambio climático de forma programada.

### **1.2. Objetivos específicos**

1. Determinar el potencial de captura de CO<sub>2</sub> en sistemas cafetaleros relativamente homogéneos mediante la modelación y balance de sus reservorios y emisiones, bajo diferentes escenarios en la condición actual y con cambio climático, para seleccionar las combinaciones de especies arbóreas que incrementen el potencial de almacenamiento de carbono y reducción de emisiones.
2. Analizar la capacidad adaptativa de los sistemas cafetaleros y de los productores organizados mediante el análisis de riesgo y vulnerabilidad actual y futura, para seleccionar las acciones y combinaciones entre ellas que satisfacen las necesidades de adaptación.
3. Obtener un modelo que muestre las sinergias entre mitigación y adaptación, así como los máximos beneficios ambientales, sociales y económicos, a partir del análisis de posibles disyuntivas y condiciones de equilibrio, para que los

productores y la sociedad cafetalera tengan elementos para detonar la adaptación al cambio climático.

Las hipótesis planteadas para cada objetivo específico se describen a continuación:

### **1.3. Hipótesis**

1. La combinación de especies arbóreas de lento crecimiento usadas para sombra en los sistemas cafetaleros evaluados incrementa el potencial de captura de CO<sub>2</sub> y reduce las emisiones bajo distintos escenarios en la condición actual y con cambio climático.
2. Mediante el análisis de riesgo y vulnerabilidad actual y futura es posible identificar la capacidad adaptativa de los sistemas cafetaleros y de los productores. La adaptación al cambio climático deberá enfocarse en prácticas que reduzcan el estrés hídrico, aumenten la diversificación de especies y mejoren las prácticas agronómicas.
3. El modelo propuesto permitirá identificar sinergias que maximizan beneficios ambientales, sociales y económicos en los sistemas cafetaleros estudiados.

### **1.4. Estructura de la tesis**

El cuerpo de la tesis se encuentra estructurado por Capítulos. En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico y metodológico que se utilizó para cumplir con los objetivos de esta investigación.

Los resultados más relevantes que se obtuvieron se presentan en los Capítulos 3 a 7 bajo la modalidad de artículos científicos, los cuales se adaptaron a las normas de las revistas científicas donde fueron publicados y/o aceptados para su publicación.

En el Capítulo 3 se analizó el papel que juegan los sistemas agroforestales de café en el desarrollo sostenible de pequeños productores de México, y se identificaron las principales amenazas sociales, ambientales y económicas que

afectan al cultivo de café con el objeto de ayudar a futuras investigaciones en su mejoramiento y conservación.

En los Capítulos 4 y 5 se abordan los resultados que se obtuvieron del objetivo específico 1. El Capítulo 4 evaluó los aspectos biofísicos y de composición estructural arbórea y arbustiva de los sistemas cafetaleros estudiados para tener información local que sea de utilidad en la toma de decisiones. Mientras que en el Capítulo 5 se simularon las reservas de C en la biomasa aérea (CBA) y suelo (COS) a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático en los sistemas cafetaleros estudiados mediante el modelo CO2Fix.

El Capítulo 6 se enfoca a los resultados obtenidos en el objetivo específico 2, en donde se evaluaron las estrategias de adaptación basadas en el conocimiento tradicional, tanto individuales como colectivas, para proyectar su viabilidad actual y futura bajo escenarios de cambio climático. Finalmente, en el Capítulo 7, se atiende lo que se planteó en el objetivo específico 3, en donde se proponen algunas acciones con capacidad de generar adaptación-mitigación de manera sinérgica para hacer frente a los impactos del cambio climático y mantener la viabilidad futura del cultivo de café dentro de la Sociedad Catuaí Amarillo. Estas acciones se generaron con base en la evaluación del comportamiento del clima, actual y futuro en el municipio de Chocamán y mediante observaciones directas en campo en las parcelas de Catuaí Amarillo, donde se visualizó la problemática que debe ser atendida para mantener al sistema a través del tiempo.

## 1.5. Literatura citada

- Almazroui, M., Islam, M.N., & Saeed, F. (2021). Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.
- Brígido, J. G., Nikolskii I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101-116. [http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf\\_11](http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf_11)
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2019). *Investigación interna. Comercio internacional del café, el caso de México*. Editorial Palacio Legislativo de San Lázaro. <https://bit.ly/3tTv4p6>
- Donatti, C.I., Harvey, C.A., Hole, D., Panfil, S.N., & Schurman, H. (2020). Indicators to measure the climate change adaptation outcomes of ecosystem-based adaptation. *Climatic Change*, 158, 413–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02565-9>.
- Dooley, K., Stabinski, D., Stone, K., Sharma, S., Anderson, T., Gurian-Serman, D., & Riggs, P. (2018). Missing Pathways to 1.5°C. The role of the land sector in ambitious climate action. Climate Land Ambition and Rights Alliance (CLARA). <https://climatelandambitionrightsalliance.org/report>.
- Duguma, L., Minang, P., & Noordwijk, M. (2014). Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: from complementarity to synergy. *Environmental Management*, 54(3), 420-432.
- Granados-Ramírez, R., Medina-Barrios, M.D., & Peña-Manjarrez, V. (2018). Variación y cambio climático en la vertiente del Golfo de México. Impactos en la cafecultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5, 473–485. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i3.951>.
- Harvey, C.A., Martínez-Rodríguez, M.R., Cárdenas, J.M., Avelino, J., Rapidel, B., Vignola, R., Donatti, C.I., & Vilchez-Mendoza, S. (2017). The use of Ecosystem-based Adaptation practices by smallholder farmers in Central America. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 279–290.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Summary for policymakers. In *Climate change 2022. Impacts, adaptation and vulnerability*. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R.

- Yu and B. Zhou (Eds.). *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://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>]
- Parada-Molina, P. C., Cerdán, C. R., Ceballos, G. O., & Cervantes-Pérez, J. (2020). *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), 1–9.
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Revista Ingeniería y Región*, 24, 61–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A.I. (2021). Projections of Local Knowledge-Based Adaptation Strategies of Mexican Coffee Farmers. *Climate*, 9(60), <https://doi.org/10.3390/cli9040060>.
- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J.D., Valdés-Velarde, E., & Monterroso-Rivas, A.I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16(4), 137–158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>.
- Tschora, H., & Cherubin, F. (2020). Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00919. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>
- von Eye, A., Schuster, C., & Rogers, W.M. (1998). Modelling synergy using manifest categorical variables. *International Journal of Behavioral Development*, 22(3), 537–557.

## **2. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO**

### **2.1. Impactos del cambio climático en la producción de café**

El cambio climático representa una de las mayores amenazas actuales y futuras para los diferentes sistemas de producción, incluido el cultivo de café (Almazroui et al., 2021; Ruiz-García et al., 2020). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2021) los últimos seis años, han sido los más cálidos registrados hasta el momento. Del mismo modo, varias regiones están experimentando un aumento de las temperaturas mínimas (Batibeniz et al., 2020) y precipitaciones extremas más intensas y generalizadas (Rastogi et al. 2020). Esto ha provocado eventos climáticos y meteorológicos extremos que han afectado de manera directa a poblaciones vulnerables (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). De seguir a este ritmo, todo indica que el aumento de 1.5 °C se alcanzará antes del 2040, por lo que, si no se realizan acciones pertinentes, será difícil cumplir con el objetivo de límite de temperatura del Acuerdo de París (Dooley et al., 2018).

Bajo los datos del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) se proyecta que en México la temperatura media anual incremente hasta 6°C para el futuro lejano (2081-2100) con el SSP5-8.5. En América Central, se prevé que las precipitaciones disminuyan en todas las estaciones excepto otoño (Almazroui et al., 2021). Estos cambios esperados en las características climáticas probablemente intensificarán el ciclo hidrológico regional (Naz et al. 2018), exacerbarán el riesgo de estrés hídrico en las plantas (Pagan et al. 2016), y aumentarán la población con exposición a extremos climáticos (Batibeniz et al. 2020).

Actualmente, la región cafetalera de Córdoba, Veracruz está experimentando un cambio en el patrón de lluvias que registra eventos cada vez más irregulares. En cuanto a la temperatura, se están presentando periodos cálidos más prolongados y mínimos extremos más frecuentes (Ruiz-García et al., 2021). Bajo diferentes escenarios de cambio climático del CMIP5 utilizando el RCP 8.5 W/m<sup>2</sup> en el futuro lejano (2081-2099) se proyectan aumentos de la temperatura media anual de entre 2 °C hasta 5.5 °C (Ruiz-García et al., 2021; Granados-Ramírez et al., 2018; Brígido et al., 2015). Se estima que la precipitación tendrá una disminución de entre 100 a 381 mm (Ruiz-García et al., 2021; Brígido et al., 2015).

Estos cambios en el clima, tanto actuales como futuros, pueden tener impactos profundos en el desarrollo y fenología del café (Cuadro 2.1), ya que se pronostican afectaciones importantes en la floración y fructificación (Parada-Molina et al., 2020) que pueden ocasionar una disminución en el rendimiento del grano de hasta 34 % en el centro de Veracruz (Brígido et al., 2015). Además, se estima que pueden aumentar los riesgos de incidencia de plagas y enfermedades tales como la roya (*Hemileia vastatrix*) y la broca (*Hypothenemus hampei*) (Libert et al., 2020; Parada-Molina et al., 2020). Estos impactos generarán una reducción de los ingresos de los productores de pequeña escala dedicados a esta actividad, por la disminución de la cantidad y/o la calidad del café, aunado con un mayor riesgo de sequías, incendios y tormentas, que ocasionará un aumento de los costos de cultivo, cosecha y procesamiento del café (Granados-Ramírez et al., 2018).

**Cuadro 2.1.** Impactos directos en el cafetal a causa de diferentes amenazas climáticas.

| <b>Amenaza climática</b>                      | <b>Impacto directo en el cafetal</b>                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incremento de la temperatura                  | Maduración temprana del fruto, anormalidades y aborto (caída de hojas tallo y flor). Aumento de plagas y enfermedades.                                                           |
| Aumento de suradas y olas de calor            | Marchitamiento de las flores y estrés hídrico en la planta.                                                                                                                      |
| Nortes                                        | Afectación en crecimiento y maduración del fruto.                                                                                                                                |
| Lluvias fuertes, granizadas y vientos fuertes | Se incrementa el aborto de frutos, especialmente cerca de la cosecha.                                                                                                            |
| Lluvias irregulares                           | Mayor frecuencia de floración.                                                                                                                                                   |
| Sequías y canículas más prolongadas           | Incremento de plagas y enfermedades (ojo de gallo, broca del grano, barrenadores del tallo, antracnosis).<br>Plantas débiles, marchitez y posible mortalidad de plantas jóvenes. |

**Fuente:** Ruiz et al. (2021); Granados-Ramírez et al. (2018).

## **2.2. El papel de los sistemas agroforestales de café ante el cambio climático**

El uso de sistemas agroforestales puede ayudar a reducir significativamente el impacto potencial que tendrá el cambio climático en la producción y desarrollo del café (Gomes et al., 2020). Se estima que para el año 2050 los diferentes usos de la tierra (AFOLU) entre los que se encuentra a los sistemas agroforestales, pueden convertirse en sumideros netos de CO<sub>2</sub> antes del final del siglo (IPCC, 2021).

Suponiendo que las prácticas agroforestales se mantengan en el 20 % de las tierras agrícolas durante 50 años, pueden adicionar entre 1.04 - 2.43 Gt por año de carbono por encima del suelo a través de 300 Mha de tierra agrícola (Dooley

et al., 2020). Se estima que los sistemas agroforestales de café en el centro de Veracruz pueden almacenar hasta 188 mg ha<sup>-1</sup> de C (Masuhara et al., 2015). Por esta razón, el uso de sistemas agroforestales de café desempeña un papel vital en la mitigación de los efectos del cambio climático antropogénico (Tschora and Cherubini., 2020; Gomes et al., 2020). Además de que son considerados como una estrategia de adaptación al cambio climático basada en el conocimiento local de los pequeños productores que, si son mejoradas y manejadas bajo un enfoque sistémico, pueden mantener la viabilidad futura de dichos sistemas (Ruiz-García et al., 2021). Se ha demostrado que la mejora de los sistemas agroforestales puede reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia del sistema. De hecho, la diversificación de los agroecosistemas puede ser necesaria para mantener y estabilizar los rendimientos en un clima cada vez más impredecible (Dooley et a., 2020).

La diversidad de árboles y arbustos dentro de los cafetales protege al cultivo ante el aumento de fenómenos extremos recurrentes (lluvias intensas, sequías prolongadas en la época de canícula, heladas y granizadas) (Gomes et al., 2020). Así mismo, crea mayor capacidad adaptativa ya que no existe una dependencia total del grano del café (Rah et al., 2018). En caso de existir una caída en el precio del café o baja producción ocasionada por plagas o enfermedades, el productor puede obtener ingresos económicos por la venta de otros productos generados dentro del sistema agroforestal (Rah et al., 2018).

A su vez, el uso de árboles de sombra dentro del cafetal genera múltiples beneficios al sistema, los cuales, pueden ayudar a minimizar el impacto que tendrá el cambio climático en la producción de café. Por ejemplo, la incorporación de materia orgánica al suelo provoca mayor infiltración y almacenamiento de agua; así mismo, evitan la destrucción de agregados y el desecamiento del suelo (Solis et al., 2020). También, mediante la regulación del microclima, los árboles del dosel en los sistemas agroforestales ayudan a controlar el equilibrio hídrico al influir en la energía radiante del sistema que afecta la evaporación del suelo y la transpiración de las hojas (Zaro et al., 2020). Las plantas de café a pleno sol están expuestas a radiación más alta, por lo que experimentan temperaturas más

elevadas y menos humedad relativa, causando mayores tasas de transpiración (Solis et al., 2020). El uso de árboles de sombra genera que el café reciba menos luz directa y por consecuencia experimente temperaturas del aire más bajas y mayor humedad, perdiendo menos agua por la transpiración (Jansson & Hofmocke, 2020).

A pesar del potencial que tienen estos sistemas para generar dichas estrategias, todavía existe información limitada sobre cómo medir cuales prácticas pueden considerarse efectivas para que se den situaciones ganar-ganar, con el objeto de ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático y al mismo tiempo, generar acciones de mitigación (Donnati, 2020; Harvey et al., 2017). Se necesita una mejor comprensión de sus interacciones para maximizar de manera eficiente sus potenciales (Sharifi, 2021). La amplia gama de actividades y resultados de estas acciones impide el uso de una única forma métrica o indicador para medir los resultados de adaptación de la misma manera que la mitigación (Leiter et al., 2019).

### **2.3. Modelo básico de sinergia para medir las acciones de adaptación-mitigación en los sistemas agroforestales de café**

El modelo básico de sinergia superaditiva podría ayudar en la medición y mejora de las acciones de adaptación-mitigación dentro de los sistemas agroforestales de café para encontrar un punto de equilibrio. Este paradigma menciona que el todo es mayor que la suma de las partes, ya que hay un resultado mejorado cuando los componentes interactúan entre sí (von Eye et al., 1998). Con esta perspectiva se busca lograr de manera óptima múltiples cobeneficios simultáneos mientras se mantiene y mejora la funcionalidad del sistema (Sharifi, 2021). Así mismo, se busca reducir los impactos negativos o posibles disyuntivas que podrían ocurrir si las intervenciones se implementan individualmente (Thornton & Comberti, 2017) con el objeto de identificar que tipos de medidas pueden generar situaciones ganar-ganar, o en cuáles circunstancias no sería posible (Zhao et al., 2018).

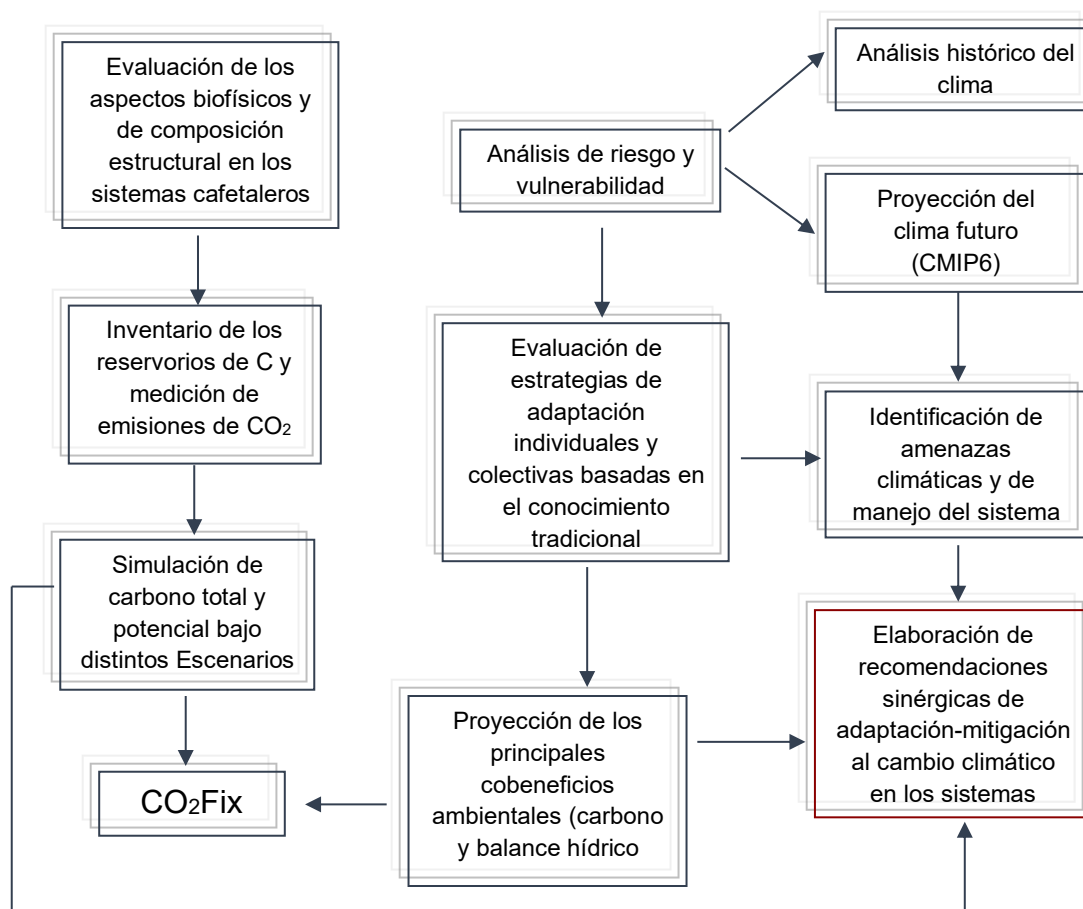
Duguma et al. (2014) proponen algunos puntos clave a considerar para la obtención de indicadores que permitan encontrar sinergias, en este caso, en las acciones de adaptación basadas en la naturaleza, que se generan en los sistemas agroforestales de café. Dichos puntos son los siguientes:

- Identificar prácticas de intervención: Se refiere a la detección de prácticas de adaptación con potencial de mitigación y viceversa que actualmente se están realizando en el sistema, o que podrían mejorarse o diseñarse.
- Comprender los procesos: En este rubro se propone identificar los múltiples cobeneficios que se generan con la implementación de las prácticas detectadas.
- Abordar las compensaciones: Se identifican las principales disyuntivas entre las acciones de adaptación-mitigación.
- Identificar políticas de apoyo: Se deben reconocer aquellas políticas, programas o estrategias nacionales, estatales y locales que promueven o mejoran los procesos de integración de las acciones de adaptación-mitigación para hacer frente al cambio climático.

A pesar de contar con esta información, todavía no hay estudios de caso que aborden esta temática en sistemas agroforestales de café en México. Por lo tanto, es indispensable generar mayor investigación sobre el tema, así como, adaptar y mejorar las metodologías existentes a las condiciones locales. Con esta información se tendrán herramientas que permitan a los sistemas cafetaleros contar con elementos para enfrentar los efectos del cambio climático de forma programada.

## 2.4. Esquema metodológico

En la figura 2.1 se muestra el esquema metodológico que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación.

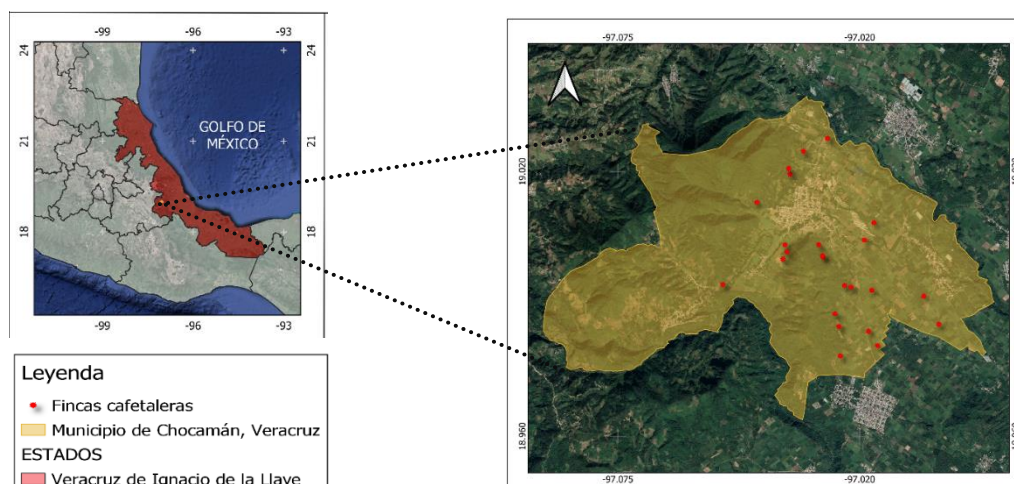


**Figura 2.1.** Esquema metodológico

## 2.5. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en 25 fincas de pequeños agricultores que producen café orgánico (*Coffea arabica* L.) bajo sistemas agroforestales en el municipio de Chocamán, Veracruz, México (Fig. 2.2). La superficie de las fincas varía entre 1 a 5 ha que en conjunto suman un total de 50 ha. La edad de los cafetales es de aproximadamente 30 años. El 80 % de la superficie de los sistemas cafetaleros evaluados se ubica en las laderas (15-60 % de pendiente),

mientras que el 20 % se ubica en el valle (0-5 % de pendiente) (Ruiz-García et al., 2020). El tipo de suelo dominante es Luvisol (INEGI, 2013). El clima representativo es semicálido del grupo de los templados con verano fresco largo y régimen de lluvias intermedio (A)Cb(fm)(i')gw" (García, 2004). La temperatura media anual es de 18.8 °C, con una mínima de 14.5 °C y una máxima de 22.8 °C; el rango anual de precipitación oscila entre 1800 y 2000 mm (Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional [CNA-SMN], 2020). Se han registrado alrededor de 51 especies arbóreas y arbustivas de usos múltiples implementadas como sombra del cafetal (Ruiz-García et al., 2020). Las especies con mayor valor de importancia son *Musa acuminata* Colla, *Inga vera* Willd, *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham, *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn e *Inga spuria* H & B. Ex Willd (Ruiz-García et al., 2020).



**Figura 2.2.** Localización de las parcelas cafetaleras pertenecientes a la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo, Chocamán, Veracruz.

## 2.6. Literatura citada

- Almazroui, M., Islam, M.N., & Saeed, F. (2021). Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>.
- Batibeniz, F.; Ashfaq, M.; Diffenbaugh, N.S. et al. (2020). Doubling of U.S. population exposure to climate extremes by 2050. *Earth's Future*, 8(4), <https://doi.org/10.1029/2019EF001421>.
- Brígido, J. G., Nikolskii I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101-116. [http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf\\_11](http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf_11)
- Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. (2020, 25 de junio). *Base de datos del CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Donatti, CI, Harvey, CA, Hole, D. et al. (2020). Indicators to measure the climate change adaptation outcomes of ecosystem-based adaptation. *Climatic Change*, 158, 413–433. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02565-9>.
- Dooley, K., Stabinski, D., Stone, K., Sharma, S., Anderson, T., Gurian-Serman, D., & Riggs, P. (2018). *Missing pathways to 1.5°C. The role of the land sector in ambitious climate action*. Climate Land Ambition and Rights Alliance (CLARA). <https://climatelandambitionrightsalliance.org/report>.
- Duguma, L., Minang, P., & Noordwijk, M. (2014). Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: from complementarity to synergy. *Environmental Management*, 54(3), 420-432.
- García, A.E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las condiciones de la República Mexicana* (5a ed., 98 p.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gomes, L.C., Bianchi, F.J.J.A., Cardoso, I.M., Fernandes, R.B.A., Filho, E.I.F., & Schulte, R.P.O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture Ecosystems Environment*, 294, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>.
- Granados-Ramírez, R., Medina-Barrios, M.D., la P., & Peña-Manjarrez, V. (2018). Variación y cambio climático en la vertiente del Golfo de México. Impactos en la cafecultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, 473–485. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i3.951>.
- Harvey, C.A., Martínez-Rodríguez, M.R., Cárdenas, J.M., Avelino, J., Rapidel, B., Vignola, R., Donatti, C.I., & Vélchez-Mendoza, S. (2017). The use of Ecosystem-based Adaptation practices by smallholder farmers in Central America. *Agriculture Ecosystems Environment*, 246, 279–290.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2013). *Continuo nacional de unidades edafológicas Serie II. Conjunto de datos de perfiles de suelos Escala 1, 250 000 Serie II*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (Eds.). *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://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Summary for policymakers. In *Climate change 2022. Impacts, adaptation and Vulnerability*. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf)
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Leiter, T., Olhoff, A., Al Azar, R., Barmby, V., Bours, D., Clement, V.W.C., Dale, T.W., Davies, C., & Jacobs, H. (2019). Adaptation metrics: current landscape and evolving practices. Rotterdam and Washington, DC. <https://www.at www.gca.org>.
- Libert, A.A., Ituarte-Lima, C., & Elmqvist, T. (2020). Learning from social-ecological crisis for legal resilience building: multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustainability Science*, 15, 485-501. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00703-x>.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J., Salcedo, P. E., Juárez, H. M., & Merino, G. A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66–93. <https://revistas.proeditio.com/REVISTAMAZONICA/article/view/195>.
- Milman, A., & Jagannathan, K. (2017). Conceptualization and implementation of ecosystem-based adaptation. *Climate Change*, 142, 113–127. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1933-0>.
- Nalau, J., Becken, S., & Mackey, B. (2018). Ecosystem-based adaptation: A review of the constraints. *Environmental Science and Policy*, 89, 357-364. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.014>.
- Naz, BS, Kao S-C, Ashfaq, M., Gao, H., Rastogi, D., & Gangrade S. (2018). Effects of climate change on streamflow extremes and implications for

- reservoir inflow in the United States. *Journal of Hydrology*, 556, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydr ol.2017.11.027>.
- Pagan, B.R., Ashfaq, M., Rastogi, D., Kendall, D.R., Kao, S-C., Naz, B. & Pal, J. (2016) Extreme hydrological events drive reduction in water supply in the southwestern United Sates. *Environmental Research Letters*. 11, 094026 (9), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/09402 6>.
- Parada-Molina, P. C., Cerdán, C. R., Ceballos, G. O., & Cervantes-Pérez, J. (2020). *Hemileia vastatrix* : una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), 1–9.
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Revista Ingeniería y Región*, 24, 61–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L., & Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>
- Rastogi, D., Touma, D., Evans, K., & Ashfaq, M. (2020). Shift towards intense and widespread precipitation events over the United States by mid 21st century. *Geophysical Research Letters*, 47(19), e2020GL089899 <https://doi.org/10.1029/2020G L0898 99>.
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A.I. (2021). Projections of local knowledge-based adaptation strategies of mexican coffee farmers. *Climate*, 9, 60. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>.
- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J.D., Valdés-Velarde, E., & Monterroso-Rivas, A.I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16(4), 137-158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>.
- Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of The Total Environment* 750, 141642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141642>.
- Solis, R., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Marín-Díaz, J., Ñique-Alvarez, M., Engedal, T., & Bruun, T. (2020). Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science*, 158(6), 450-460. <https://doi.10.1017/S002185962000074X>
- Thornton, T.F., & Comberti, C. (2017). Synergies and trade-offs between adaptation, mitigation and development. *Climatic Change*, 140, 5–18. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0884-3>.
- Tschora, H., & Cherubin, F. (2020). Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa.

*Global Ecology and Conservation*, 22, e00919.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>

- von Eye, A., Schuster, C., & Rogers, W.M. (1998). Modelling synergy using manifest categorical variables. *International Journal of Behavioral Development*, 22(3), 537–557.
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). State of the Global Climate 2020. Provisional Report. <https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>.
- Zaro, G. C., Caramori, P. H., Junior, Y. G. M., Sanquetta, C. R., Filho, A. A., Nunes, A. L. P., Prete, C. E. C., & Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil *Agroforestry Systems*, 94, 799–809. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>.
- Zhao, C., Yan, Y., Wang, C., Tang, M., Wu, G., Ding, D. & Song, Y. (2018) Adaptation and mitigation for combating climate change – from single to joint. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4(4), 85-94, <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1466632>.

### **3. SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ COMO ALTERNATIVA DE PRODUCCIÓN SUSTENTABLE PARA PEQUEÑOS PRODUCTORES DE MÉXICO<sup>3</sup>**

#### **3.1. Resumen**

Los sistemas agroforestales de café son considerados como un modo de producción estratégico enfocado en el desarrollo sustentable, debido a que es el modo de subsistencia de pequeños productores y de alrededor de 30 grupos indígenas del país. A pesar de ello, existen múltiples amenazas sociales, económicas y ambientales que ocasionan una reducción en la superficie dedicada a este modo de producción. Por lo tanto, es indispensable resaltar los beneficios ambientales, sociales y económicos que generan estos sistemas en comunidades marginadas para evitar que se reduzca aún más la superficie con dicho sistema. El objetivo del presente ensayo fue analizar el papel que juegan los sistemas agroforestales de café en el desarrollo sustentable de pequeños productores de México mediante la técnica de investigación documental para tener evidencia científica sobre los principales beneficios ambientales, sociales y económicos e identificar las principales amenazas con el objeto de ayudar a futuras investigaciones en el mejoramiento y conservación de los sistemas agroforestales de café. Se encontró que este sistema genera una gama de servicios ecosistémicos, entre los que resaltan el potencial de captura de CO<sub>2</sub> y la capacidad para la conservación de la biodiversidad nativa. El conocimiento tradicional de los campesinos influye en la conservación y mantenimiento de los sistemas agroforestales de café. A pesar de las múltiples amenazas sociales, los pequeños productores dedicados a este modo de producción se resisten a abandonar esta práctica porque es una vía para subsistir y mantener su sistema de reproducción social, sin importar los retos que se presenten. La migración, edad avanzada de los productores, mal manejo del sistema, enfermedades fitosanitarias y el cambio climático son las principales amenazas identificadas.

---

<sup>3</sup> Este Capítulo fue publicado como:

Ruiz-García, P.; Gómez-Díaz, J.D.; Valdés-Velarde, E.; Monterroso-Rivas, A.I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai*, 16 (4), 137-158. <https://doi.org/10.35197/rx.16.04.2020.07.pr>.

Existe una amplia evidencia científica sobre los beneficios ambientales que aportan los sistemas agroforestales de café en México; sin embargo, es necesario ampliar la información en el ámbito social y económico para obtener estrategias que ayuden a los productores de pequeña escala de comunidades marginadas a alcanzar el desarrollo sustentable que tome en cuenta el mejoramiento de su calidad de vida, la reducción de las principales amenazas que lo aquejan y la disminución de la vulnerabilidad ante el cambio climático actual y futuro.

**Palabras clave:** servicio ecosistémico, beneficio ambiental, beneficio económico, amenazas, cooperativas.

### **3.2. Abstract**

Coffee agroforestry systems are considered as a strategic mode of production focused on sustainable development, because it is the livelihood of small producers and about 30 indigenous groups in the country. Despite this, there are multiple social, economic and environmental threats that have generated a reduction in the area dedicated to this mode of production. Therefore, it is essential to highlight the environmental, social and economic benefits that these systems have generated in marginalized communities to avoid further reducing the surface with said sustainable production system. The objective of this essay is to analyze the role that coffee agroforestry systems have played in the sustainable development of small producers in Mexico through the documentary research technique to have scientific evidence on the main environmental, social and economic benefits and identify the main threats to guide future research in order to improve and conserve coffee agroforestry systems. It was found that this system has generated a range of ecosystem services, among which the potential for CO<sub>2</sub> capture and the capacity for the conservation of native biodiversity stand out. Despite the multiple social threats, small producers dedicated to this mode of production are reluctant to abandon this practice because it is a way to survive and maintain their social reproduction system, regardless of the challenges that arise. The small producers that have managed to generate a significant increase in their economy are those who have organized in cooperatives to produce specialized organic coffees of high quality with an export focus. Migration, advanced age of producers, poor management of the system, phytosanitary diseases and climate change are the main threats identified. There is ample scientific evidence on the environmental benefits of coffee agroforestry systems in Mexico; however, it is necessary to expand the information in the social and economic field to obtain strategies that help small producers from marginalized communities to achieve sustainable development, taking care of improving their quality of life, reducing the main threats that afflict them and the reduction of vulnerability to current and future climate change.

**Key words:** Ecosystem service, environmental benefit, economic benefit, threats, cooperatives.

### **3.3. Introducción**

El 90% de la superficie en México dedicada a la actividad cafetalera se centra en la utilización de árboles nativos e introducidos de interés económico para sombra del cafeto. Este modo de producción alternativo lo manejan principalmente productores de pequeña escala y alrededor de 30 grupos indígenas del país (Escamilla & Díaz, 2016).

Se estima que el 95.4% de todos los productores se incluyen en la categoría de campesinos con superficies de cultivo que no sobrepasan las 5 ha. Los estados de Chiapas, Veracruz y Oaxaca son los principales productores de café bajo sombra (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA, 2018]).

Así mismo, los sistemas agroforestales de café se consideran ejes del desarrollo comunitario y regional, ya que tienen la capacidad de mantener cadenas productivas, generar divisas, empleos, conservar la biodiversidad y proporcionar una serie de servicios ecosistémicos a la sociedad (Escamilla et al., 2005). Además de generar una gama de beneficios ambientales, sociales y económicos que merecen especial atención y mayor impulso (Ruelas-Monjardín et al., 2014). Sin embargo, a pesar de los múltiples servicios que proporciona, la cafecultura bajo sombra está perdiendo importancia, debido al aumento del cultivo a pleno sol, incremento de caña de azúcar y agricultura convencional (Machado & Ríos, 2016).

El presente ensayo tuvo como objetivo analizar el papel que juegan los sistemas agroforestales de café en el desarrollo sustentable de pequeños productores de México, mediante la técnica de investigación documental para tener evidencia científica sobre los principales beneficios ambientales, sociales y económicos, e identificar las principales amenazas con el objeto de ayudar a futuras investigaciones en el mejoramiento y conservación de los sistemas agroforestales de café.

### **3.4. Métodos y técnicas de investigación**

Se empleó la técnica de investigación documental (Posada-González, 2017) para analizar el papel que juegan los sistemas agroforestales de café como alternativa de producción en el desarrollo sustentable de productores de pequeña escala de México. Para ello, se sistematizó, organizó y analizó información de artículos originales e información oficial generados en México y reportados en la literatura científica en los últimos 15 años. En primera instancia, se decidió abordar el concepto y evolución del desarrollo sustentable para dar pauta al análisis de la importancia de los sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable en comunidades marginadas. Posteriormente, se discutió sobre los beneficios ambientales, sociales y económicos que tienen los sistemas agroforestales de café en dichas comunidades; así como las principales amenazas que afectan a los sistemas agroforestales de café y de qué manera pueden ser minimizadas.

### **3.5. Resultados y Discusión**

#### **3.5.1. Concepto y evolución del desarrollo sustentable**

El concepto de desarrollo sustentable que se documentó en el informe de Brundtland en 1987 a pesar de tener definiciones e interpretaciones que eran controvertidas e incluso difusas, ayudaron a establecer el hecho de que los sistemas de producción deben considerar aspectos sociales, económicos y naturales para un mejor funcionamiento del sistema (Saura & Hernández, 2008).

A pesar de ello, el término de sustentabilidad bajo este enfoque no fue operativo, principalmente por la dificultad que implicó entender los aspectos filosóficos e ideológicos de la sustentabilidad en la capacidad de tomar decisiones al respecto (Aragón et al., 2003).

Por tal motivo, Sarandón et al. (2006) generaron una definición de agricultura sustentable, el cual considera un enfoque multidisciplinario y deja de lado la visión reduccionista. Dicha definición establece que la agricultura sustentable “*permite mantener en el tiempo un flujo de bienes y servicios que satisfagan las*

*necesidades socioeconómicas y culturales de la población, dentro de los límites biofísicos que establece el correcto funcionamiento de los sistemas naturales (agroecosistemas) que lo soportan”.*

Esta definición, a pesar de ser más realista, olvidó el hecho de que existen elementos externos que afecta de alguna u otra manera al sistema natural que soporta al sistema. Por lo que, se generó una nueva corriente de pensamiento con una mirada holística, ética y sistémica, que analiza las relaciones que se dan entre el todo y las partes en la organización de un sistema y toma en cuenta las relaciones entre los ámbitos globales, locales y regionales (Urbaniec et al., 2017).

Es importante mencionar que esta nueva idea de desarrollo sustentable considera al cambio climático como un elemento externo, el cual, es una realidad que debe afrontarse desde el ámbito local, lo cual obliga a contemplar la sustentabilidad local y nacional en estrecha relación con las dinámicas de la globalización económica y con la problemática ecológica entendida en su escala macro (Murga-Menoyo & Novo, 2017).

Por esta razón, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sustentable, establece una visión transformadora hacia la sustentabilidad económica, social y ambiental mediante la implementación de 17 objetivos de desarrollo sustentable, siendo el objetivo 13 el que insta a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (Naciones Unidas [NU, 2016]).

De acuerdo con el Panel intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2012) el avance hacia un desarrollo sustentable y resistente en el contexto de los fenómenos climáticos extremos cambiantes, puede mejorarse con enfoques destinados a la gestión de riesgo de desastres, adaptación y mitigación para fomentar nuevos patrones de respuesta. Por lo que es importante que estos aspectos sean considerados en investigaciones que impliquen fomentar el desarrollo sustentable.

Recientemente surgió un nuevo concepto denominado desarrollo territorial que Murga-Menoyo & Novo (2017) lo definen como un amplio mosaico de relaciones,

nexos, vínculos económicos y sociales, que configuran una realidad compleja que está enfrentando problemas como el cambio climático.

El desarrollo territorial busca la transformación productiva e institucional desde el ámbito local para impulsar las políticas tecnológicas que fomentan las potencialidades de cada zona, y considera a los recursos ambientales como activos de desarrollo (Boisier, 2015). Sin embargo, la falta de una adecuada comprensión del territorio y sus implicaciones puede mermar la capacidad de incidencia de las políticas públicas en el presente, mientras que ignorar las consideraciones de sustentabilidad puede limitar los alcances de éstas en el futuro.

Tomando en consideración lo expuesto anteriormente, el actual gobierno de México, en la Gaceta Parlamentaria 2019-2024, estableció el eje transversal 3 denominado “Territorio y desarrollo sustentable”, que plantea que todas las acciones que se realicen en esta administración para apoyar a los sectores desprotegidos deberán ser sustentables económica, social y ambientalmente. De igual forma, menciona que toda política pública deberá contemplar, entre sus diferentes consideraciones, la vulnerabilidad ante el cambio climático, el fortalecimiento de la resiliencia y las capacidades de adaptación y mitigación, especialmente si impacta a las poblaciones o regiones más vulnerables (Plan Nacional de Desarrollo [PND, 2019]).

Una alternativa de producción que puede dar respuesta a las diversas políticas públicas y al concepto actual de desarrollo sustentable, son los sistemas agroforestales que pueden ayudar a las comunidades más vulnerables a tener herramientas para hacer frente a las diversas crisis tanto ambientales como económicas (Dendoncker et al., 2018). Debido a su capacidad para aumentar la contribución de la diversidad funcional y los servicios ecosistémicos a la producción (Duru, Therond & Fares, 2015).

Este es el caso de los sistemas agroforestales de café, los cuales, son considerados como ejes del desarrollo comunitario y regional, ya que tienen la capacidad de mantener cadenas productivas, generar divisas, empleos,

conservar la biodiversidad y proporcionar una serie de servicios ecosistémicos a la sociedad (Escamilla et al., 2005).

### **3.5.2. Sistemas agroforestales de café y el desarrollo sustentable**

Los sistemas agroforestales de café son un modo de producción estratégico que se enfoca en el desarrollo sustentable, debido a que es el modo de subsistencia de productores a pequeña escala y de alrededor de 30 grupos indígenas del país; se estima que el 95.4% de todos los productores se incluyen en la categoría de campesinos con superficies de cultivo que no sobrepasan las 5 ha; los estados de Chiapas, Veracruz y Oaxaca son los principales productores de café bajo sombra (CEDRSSA, 2018).

Se sabe que estos sistemas son capaces de mantener la biodiversidad de la zona, generar beneficios del ecosistema y bienestar humano (Vallejo-Ramos et al., 2016). El tipo de manejo que se realiza en la mayoría de las fincas cafetaleras bajo sistemas agroforestales es mediante técnicas tradicionales heredadas de generación en generación, con poca o nula tecnología agrícola, debido principalmente a la falta de recursos económicos y al marcado relieve que dificulta, en algunos casos, el acceso a las parcelas cafetaleras (Bautista et al., 2018).

De igual forma, existe una incorporación de elementos culturales y religiosos, así como una cosmovisión distinta sobre el manejo de su sistema, que permite que se genere de manera fortuita el desarrollo sustentable local que beneficia a las unidades familiares (Guevara et al., 2015).

De acuerdo con Moguel y Toledo (1999) existen cinco formas de manejo de las fincas cafetaleras en México clasificadas como sistema de montaña, sistema de policultivo tradicional, sistema comercial, sistema especializado y sistema intensivo a pleno sol. Los dos primeros consisten en el uso de especies nativas para sombra del café, la diferencia entre ellos es que el primero no tiene manejo, mientras que, en el segundo, el manejo es indispensable. En cuanto al sistema

comercial, este consiste en la utilización de especies nativas o introducidas con alto valor comercial que funcionan para sombra del café.

El uso del sistema especializado consiste en la eliminación total de la diversidad de especies de sombra y promueve la introducción de nuevas variedades altamente productivas, mientras que el cultivo a pleno sol elimina completamente el uso de árboles para sombra. Sin embargo, la economía de los productores que implementan estos sistemas es altamente dependiente del café y por tanto vulnerable a los altibajos en el precio de éste (Escamilla & Díaz, 2016).

Los productores que a través del tiempo se han sostenido económicamente e incluso desarrollarse, son los que han impulsado los policultivos comerciales y tradicionales, cuyos ingresos netos son positivos y generan ventajas adicionales por los aportes en alimentación, medicina, vivienda y otros (Escamilla & Díaz, 2016). Esto se debe a que los sistemas de policultivo tradicional y comercial al ser considerados como sistemas agroforestales, tienen un enfoque integrado para el uso sustentable de la tierra, debido a su producción y beneficios ambientales (Nair et al., 2009).

A pesar de todos los beneficios que aportan los sistemas agroforestales de café para alcanzar el desarrollo rural sustentable, la promoción de la agricultura intensiva pone en peligro su permanencia. De acuerdo con datos del SIAP, a nivel nacional, la superficie sembrada de café bajo sombra disminuyó drásticamente de 2010 a 2017 de 781,016 ha a 717,388 ha (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP, 2018]). Por lo tanto, es indispensable resaltar los beneficios ambientales, sociales y económicos que generan estos sistemas en comunidades marginadas para evitar que se reduzca aún más la superficie con dicho sistema de producción sustentable.

### **Beneficios ambientales**

En la mayoría de las regiones cafetaleras de México, el cultivo de café bajo sombra contribuye a la conservación de la biodiversidad de la vegetación nativa de la zona (Ruelas-Mojardín et al., 2014). Se considera que la riqueza de

especies nativas preservadas en los sistemas agroforestales de café está influenciada por la riqueza existente en los bosques asociados, pero el principal impulsor es el pequeño productor que ha tratado de preservar los beneficios de los componentes y funciones de los ecosistemas (Vallejo-Ramos et al., 2016).

De acuerdo con diversos investigadores (De Beenhouwer, et al., 2013; Machado y Ríos, 2016; Jha et al., 2014) los sistemas agroforestales de café proveen una gama de servicios ecosistémicos entre los que destacan la polinización, control de plagas, regulación climática, secuestro de carbono, almacenamiento de nutrientes y conservación de la biodiversidad de especies nativas (Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1.** Principales servicios ecosistémicos proporcionados por los sistemas agroforestales de café en México.

| Servicio ecosistémico                                      | Descripción                                                                                   | Fuente consultada                            |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Polinización</b>                                        | -Aumento en la riqueza de especies y abundancia de polinizadores.                             | Moreno-Calles et al. (2013)                  |
| <b>Control de plagas</b>                                   | -Mayor abundancia de individuos y especies de predadores<br>-Disminución de plagas.           | Hernández-Martínez y Velázquez-Premio (2016) |
| <b>Regulación climática</b>                                | -Reducción de la temperatura ambiente y del suelo.                                            | Lin (2007)                                   |
|                                                            | -Disminución de la radiación solar fotosintéticamente activa. -Velocidad del viento más baja. |                                              |
|                                                            | -Menores tasas de evaporación del suelo y evapotranspiración de la planta.                    |                                              |
|                                                            | -Regulación hídrica.                                                                          |                                              |
| <b>Secuestro de carbono y almacenamiento de nutrientes</b> | -Reducción de daños por heladas.                                                              | Ruelas-Monjardín et al. (2014)               |
|                                                            | -Disminución de fluctuaciones de temperatura y radiación solar.                               |                                              |
|                                                            | - Aumento en el almacenamiento de carbono sobre el suelo y carbono orgánico total.            |                                              |
|                                                            | -Incremento en la mineralización de nitrógeno.                                                |                                              |
|                                                            | -Disminución de contaminación de nutrientes.                                                  | Masuhara et al. (2015)                       |
|                                                            |                                                                                               |                                              |
|                                                            |                                                                                               | Soto-Pinto y Jiménez-Ferrer (2018)           |
|                                                            |                                                                                               | Espinoza-Domínguez et al. (2012)             |
|                                                            |                                                                                               | Pineda-López et al. (2016)                   |

| Servicio ecosistémico                            | Descripción                                                                          | Fuente consultada                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Conservación de biodiversidad de especies</b> | -Mayor actividad microbiana en el suelo.                                             |                                  |
|                                                  | -Aumento en el pH del suelo y capacidad de intercambio catiónico, calcio y magnesio. |                                  |
|                                                  | -Mayores concentraciones de nitrógeno en las hojas.                                  |                                  |
|                                                  | -Incremento en la disponibilidad de fósforo disponibles para cultivos agrícolas.     |                                  |
|                                                  |                                                                                      | Vallejo-Ramos et al. (2016)      |
|                                                  |                                                                                      | Leyequien y Toledo (2009)        |
|                                                  | -Incremento en la riqueza y abundancia de especies nativas de flora y fauna.         | García, Valdez et al. (2015)     |
|                                                  |                                                                                      | Macip-Ríos y Casas-Andreu (2008) |
|                                                  |                                                                                      | Escamilla-Prado et al. 2012)     |

Según Bacon et al. (2014) la producción de café bajo sombra también genera oportunidades de recreación, esparcimiento, cultura, mejoramiento de la sustentabilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas. Así mismo, son resistentes a los aumentos de temperatura esperados en el futuro cercano como resultado del cambio climático (Souza et al., 2012).

El potencial de captura de CO<sub>2</sub> que tienen los sistemas agroforestales de café para mitigar el cambio climático actual, genera que sea uno de los servicios ecosistémicos más estudiados en la literatura científica, gracias al contenido potencial de este elemento en las múltiples especies de árboles y arbustos que están íntimamente interrelacionados en el sistema (Masuhara et al. 2015). En algunos casos el carbono almacenado en la biomasa viva, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo sobrepasa los 100 MgC/ha (Soto-Pinto & Jiménez-Ferrer, 2018).

El manejo tradicional de los sistemas agroforestales de café, aunado con un manejo moderno de la producción agrícola, pueden coexistir de manera conjunta para mantener y mejorar el sistema tradicional, con el objeto de mantener y aumentar los servicios ecosistémicos y la integridad del ecosistema al tiempo que mejora la calidad de vida de los pequeños productores de café (Vallejo-Ramos et al., 2016).

Un ejemplo, es el manejo que realizan las comunidades indígenas de la región montañosa de la parte norte del estado de Chiapas, en donde utilizan para sombra del cafetal a más de la mitad de los árboles de especies nativas diversificadas y aprovechan la sucesión secundaria para sombra temporal, lo que genera conservación de la biodiversidad nativa y una serie de servicios ecosistémicos (Soto-Pinto et al., 2007).

### **Beneficios sociales**

La crisis económica del café a principios de los 90s provocada por la inestabilidad del precio internacional del producto en conjunto con la desaparición del Instituto Mexicano del Café (INMECAFE), indujeron a que las comunidades marginadas que se dedicaban a esta actividad experimentaran una fuerte migración, principalmente de los integrantes más jóvenes. Esto ocasionó que los pequeños productores que quedaban tuvieran que realizar ajustes en sus modos de producción local (Murguía et al., 2014).

Los productores que quedaron al frente de las fincas cafetaleras bajo sombra tienen una edad que sobrepasa los 45 años, con variaciones regionales de entre 43 y 54 años, lo cual muestra que su población está envejeciendo; tanto la migración como el envejecimiento poblacional constituyen un problema social que representa una amenaza para el sector (Escamilla et al., 2005).

Aunado a ello, el cultivo de café bajo sombra ya no es del interés de las nuevas generaciones, pues consideran que no es posible subsistir de dicho cultivo. Esta situación produce una desintegración social que pone en riesgo la conservación

de costumbres y tradiciones culturales que propicia de alguna u otra manera el desarrollo sustentable (Morales, 2013).

A pesar de esto, la mayoría de los productores a pequeña escala que, utilizan a los sistemas agroforestales para producir café, se resisten a abandonar esta práctica porque es una vía para subsistir y mantener su sistema de reproducción social, sin importar los retos que se presenten (Sánchez, 2015).

A su vez un gran número de productores está organizado en cooperativas que buscan incorporar nuevas tecnologías para incorporarse al mercado de café orgánico y comercio justo, lo cual es una ruta de desarrollo alternativo que genera una reducción en la vulnerabilidad de sus modos de vida, lo que ayuda a estabilizar sus vidas comunitarias y reforzar el desarrollo alternativo sustentable (Rodríguez, 2014).

Los estados de la república en donde se han generado un gran número de cooperativas son Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla. Entre las organizaciones más exitosas están UCIRI, ISMAM, CEPCO, Majomut, MICHIZA, La Selva, Federación Indígena Ecológica, Tiemelonla Nich K Lum, Tosepan Titataniske, Unión Regional de Huatusco y REDCAFES, por citar algunas (CEDRSSA, 2018).

### **Beneficios económicos**

Después de que desapareciera el INMECAFE la economía de los pequeños productores se vio severamente afectada, ya que, al no tener una fuente de financiamiento, y por sus escasos recursos económicos, no logran dar valor agregado a su café, debido a que, al venderlo en forma de cereza, y en el mejor de los casos en forma de pergamino, no pueden generar una mejora significativa en su economía (González-Romo et al., 2019). El problema se agudiza al no existir una organización entre los pequeños productores y al no haber una diferenciación del producto.

Los productores a pequeña escala que han logrado tener ganancias económicas significativas son aquellos que están organizados en cooperativas para generar

café especializados, principalmente orgánicos de la especie *Cofea arabica* L., ya que tiene calidad con potencial de exportación (Escamilla et al., 2005).

Los principales estados exportadores son Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla, que exportan directamente a mercados de especialidad de Estados Unidos, Alemania, Holanda, Suiza, Japón, Italia, Dinamarca, España, Francia, Australia, Inglaterra y Bélgica (CEDRSSA, 2018). Esto convierte a México en el principal proveedor mundial de café orgánico certificado, ya que envía más de 28 mil toneladas a países europeos; anualmente se produce un volumen de 350 mil sacos de 60 kilos, lo que lo coloca como el segundo productor mundial de café orgánico de alta calidad (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA, 2017]).

De acuerdo con Ferro-Soto & Mili (2013) los productores de pequeña escala organizados en cooperativas reducen costos y obtienen mayores beneficios como consecuencia directa de las sinergias generadas por el reagrupamiento. Estos productores tienen como rasgo común la inversión de la prima del comercio justo, por lo que los precios pagados son más altos en comparación con los canales convencionales. Por tal motivo, se incrementan los beneficios económicos y se integran elementos religiosos y modos culturales locales que refuerzan el desarrollo rural sustentable (Rodríguez, 2014).

De igual forma, al tener una diversidad de productos dentro del sistema, existe una mejor relación costo-beneficio frente a los sistemas convencionales y obtienen un ingreso mayor al 23% según datos obtenidos por Jezeer et al. (2017). Un ejemplo es que algunos productores del centro de Veracruz incorporan especies maderables como sombra del cafetal obteniendo ingresos adicionales, sin comprometer la calidad física del grano (Sánchez et al., 2018).

### **3.5.3. Principales amenazas que afectan a los sistemas agroforestales de café**

A pesar de que los sistemas agroforestales de café tienen múltiples beneficios que propician el desarrollo sustentable y reducen la vulnerabilidad de los

pequeños productores ante diversas amenazas, no significa que estén exentos de ellas.

La migración y la edad avanzada de los productores a pequeña escala dedicados a este sistema de producción alternativo, representa una amenaza social que limita la transmisión de conocimiento empírico, el cual es valioso para la producción, beneficiado y comercialización del café (Morales, 2013); así mismo, propicia al abandono de los cafetales y por consecuencia al cambio de uso del suelo que conlleva a la degradación del ecosistema (Guevara et al., 2015).

De acuerdo con Escamilla et al. (2005) las principales amenazas de manejo que provocan la baja productividad del sistema son la edad avanzada de las plantaciones, inadecuada poda de los cafetos, mala regulación de sombra, deficiente protección fitosanitaria y limitada aplicación de abonos.

La roya de la hoja del café (*Hemileia vastatrix*) es la principal amenaza fitosanitaria que genera una fuerte caída en la producción de grano, se sabe que afecta principalmente a plantaciones viejas, mal nutridas y que presentan otras afectaciones como nemátodos u otros hongos (Hernández-Martínez & Velázquez-Premio, 2016).

El daño ocasionado por este hongo es menor en los sistemas agroforestales de café con densidades entre 1500-2000 p/ha en comparación con cultivos a pleno sol, ya que el microclima y otros organismos que se encuentran en el sistema evitan que la plaga se desarrolle a tal grado de ocasionar daños severos; sin embargo, el cambio climático puede generar un ambiente propicio para el desarrollo descontrolado de este hongo (Libert et al., 2019).

Ante esta problemática, se crearon variedades mejoradas de café que son tolerantes a la roya, esto podría ser una solución a corto plazo, pero de acuerdo con Libert et al. (2019) estas variedades de café pueden traer nuevos problemas si no se considera la compatibilidad con los ecosistemas locales.

De acuerdo con diversas investigaciones, los sistemas cafetaleros de México son altamente vulnerables ante el cambio climático (Brígido et al., 2015; Monterroso et al., 2007; Gay et al., 2006), lo que se asume como la principal amenaza

climática que afecta a los sistemas agroforestales de café, a pesar de que el daño resulte menor en comparación con otros sistemas de producción. Ante ello, se hace indispensable implementar acciones de adaptación que disminuyan el impacto negativo del cambio climático actual y futuro (Lin, 2007).

La baja diversificación de productos dentro de las parcelas cafetaleras está directamente relacionada con la baja capacidad adaptativa de los pequeños productores. De acuerdo con lo anterior, se esperaría que al incrementar la diversidad de productos en los sistemas cafetaleros bajo sombra conllevaría a tener una alta capacidad adaptativa y una reducción en los efectos negativos del cambio en las variables del clima (Rahn et al., 2014).

Según De Sousa et al. (2019) las investigaciones actuales no consideran el impacto que tendrán los árboles utilizados para sombra del cafetal bajo las condiciones climáticas futuras, siendo altamente vulnerables ante dicho cambio, por lo que es urgente generar investigaciones con un enfoque planificador del uso de la tierra para evaluar nuevas combinaciones de especies agroforestales en las plantaciones de café, tomando en cuenta los efectos del cambio climático presente y futuro.

El uso adecuado de árboles para sombra del café, sobre todo de especies de lento crecimiento (Pérez et al., 2007) y el mejoramiento de actividades silvícolas y agronómicas, pueden ayudar a aumentar el potencial de mitigación en los cafetales y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la atmósfera (Rahn et al., 2014).

De acuerdo con Soto-Pinto & Jiménez-Ferrer (2018) los sistemas agroforestales de café manejados en pequeña escala son estratégicos, ya que tienen un alto potencial de mitigación al cambio climático, genera una gama de productos diversificados y promueve la conservación de especies y funciones ecosistémicas. Sin embargo, para estos autores, existen limitantes en los beneficios económicos y necesidades de organización para el mercado, por lo que se necesitan investigaciones en el diseño de sistemas agroforestales que consideren este rubro, sin descuidar la parte ambiental y social para tener éxito en los beneficios locales y globales.

### **3.6. Conclusiones**

Los sistemas agroforestales de café juegan un papel importante en el desarrollo sustentable de productores de pequeña escala de México, los cuales incorporan elementos culturales y religiosos dentro del manejo del sistema. Existe una gama de servicios ecosistémicos generados por el uso del cultivo de café bajo sombra, entre los que destacan la polinización, control de plagas y enfermedades, regulación climática, conservación de la biodiversidad, almacenamiento de carbono y nutrientes.

Las crisis económicas por el precio del café, la migración, plagas y enfermedades y la vulnerabilidad ante el cambio climático son amenazas que limitan la transmisión de conocimiento empírico y conllevan al abandono de los cafetales. Sin embargo, el uso de este modo de producción representa para el campesino una vía para subsistir y mantener su sistema de reproducción social.

La organización por medio de cooperativas es la clave para que los pequeños productores se mantengan y logren ganancias económicas significativas a través de la incursión de la producción orgánica y comercio justo para la venta de cafés especializados con calidad de exportación. La incorporación de especies de usos múltiples logra una diversidad de productos para obtener beneficios económicos extra y conlleva a tener una alta capacidad adaptativa ante los efectos negativos del cambio climático.

### **3.7. Recomendaciones**

Se tiene un mayor número de estudios enfocados a los servicios ecosistémicos que generan los sistemas agroforestales de café. Existen pocos trabajos que abordan el aspecto social y económico que generan dichos sistemas en México. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios a nivel local que exploren el impacto directo que tiene la migración y el abandono de los cafetales sobre el tejido social de las comunidades dedicadas a este modo de producción; así como la importancia de las organizaciones a nivel cooperativa como alternativa para incrementar los beneficios económicos que ayudan a los pequeños productores

de comunidades marginadas a alcanzar el desarrollo sustentable y mejorar su calidad de vida. De igual forma, se recomienda explorar con mayor detalle las principales amenazas climáticas y del manejo del sistema para generar estrategias a nivel local que permitan reducir las principales amenazas y disminuir la vulnerabilidad ante el cambio climático actual y futuro.

### **3.8. Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia y Suelos, así como al Programa de Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. A los revisores anónimos cuyos comentarios ayudaron a mejorar el manuscrito.

### 3.9. Literatura Citada

- Aragonés, J.I., Izurieta, C., & Raposo, G. (2003). Revisando el concepto de Desarrollo Sostenible en el discurso social. *Psicothema*, 15(2), 221–26.
- Bacon, C.M., Sundstrom, W.A., Flores, G.M.E., Méndez, V. E., Santos, R., Goldoftas, B., & Dougherty, I. (2014). Explaining the 'hungry farmer paradox': Smallholders and fair trade cooperatives navigate seasonality and change in Nicaragua's corn and coffee markets. *Global Environmental Change*, 25, 133–149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.005>.
- Bautista, C.E.A., Ordaz, C.V.M., Gutiérrez, C.M.C., Gutiérrez, C.E.V., & Cajuste, L. B. (2018). Sistemas Agroforestales de Café En Veracruz, México: Identificación y Cuantificación Espacial Usando SIG, Percepción Remota y Conocimiento Local. *Revista Terra Latinoamericana*, 36(3), 261–73. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>.
- Boisier, S. (2015). Bioregionalismo: Una Ventana Hacia El Desarrollo Territorial Endógeno y Sustentable. *Terra: Revista de Desarrollo Local*, 2015 (1), 42–66. <https://doi.org/10.7203/terra.1.4589>.
- Brígido, J.G., Nikolskii, I., Terrazas, L., & Herrera, S.S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101–116. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/articleCms/view/1182/1085>.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2018). *El café en México Diagnóstico y Perspectiva*. Editorial Palacio Legislativo de San Lázaro. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/10/31EI%20caf%C3%A9%20en%20M%C3%A9xico.pdf>.
- De Beenhouwer, M., Aerts, R., & Honnay, O. (2013). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 175, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.00>.
- De Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J.C. (2019). The future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamérica. *Scientific Reports*, 9, 8828. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>.
- Dendoncker, N., Boeraeve, F., Crouzat, E., Dufrêne, M., König, A., & Barnaud, C. (2018). How can integrated valuation of ecosystem services help understanding and steering agroecological transitions? *Ecology and Society*, 23(1), 12. <https://doi.org/10.5751/ES-09843-230112>.

- Duru, M., Therond, O., & Fares, M. (2015). Designing agroecological transitions: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1237-1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>.
- Escamilla, P.E.O., Ruiz, R.G., Díaz, P.C., Landeros, S.D.E, Platas, R. A., Zamarripa, C., & González, H.V.A. (2005). El Agroecosistema Café Orgánico en México. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 76, 5–16. <http://www.cafeybiodiversidad.mx/archivos/A1853e.pdf>.
- Escamilla, P.E., & Díaz, S.C. (2016). Sistemas de cultivo de café en México. Huatusco, Veracruz. Editorial CENACAFE. <http://www.cenacafe.org.mx>.
- Escamilla-Prado, E., Escamilla-Femat, S., Gómez-Utrilla, J.M., Tuxtla, A. M., Ramos-Elorduy, J., & Pino-Moreno, J. M. (2012). Uso Tradicional de Tres Especies de Insectos Comestibles En Agroecosistemas Cafetaleros Del Estado de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15 (SUPPL. 2), S101-S109. <http://www.revista.ccca.uady.mx/ojs/index.php/TSA/index>.
- Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A., & Torres- Rivera, A. (2012). Almacén De Carbono En Sistemas Agroforestales Con Café. *Revistas Chapingo Seria Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18 (1), 57–70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>.
- Ferro-Soto, C., & Samira, M. (2013). Desarrollo rural e internacionalización mediante redes de comercio justo del café. Un estudio del caso. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 10 (72), 267–89. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr10-72.drim>.
- García, M.L.E., Valdez, H.J.I, Luna, C. M., & López, M.R. (2015). Structure and Diversity of Arboreal Vegetation in Coffee Agroforestry Systems in Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y Bosques*, 21 (3), 69–82. <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v21n3/v21n3a5.pdf>.
- Gay, G. C., Estrada, F., Conde, C., & Eakin, H. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of Coffee production in Veracruz, México. *Climatic Change*, 79, 259-288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>.
- González-Romo, A., González-Gómez, D. X., & Sánchez-Torres, Y. (2019). Pobreza y adversidades en los cafetaleros de la Sierra Otomí-Tepehua en México. *Ra Ximhai*, 15(2), 61-78. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/71718>.
- Guevara, R.M.L, Téllez, M.M.B.R, & Flores, L.M.L. (2015). Aprovechamiento Sustentable de Los Recursos Naturales Desde La Visión de Las

- Comunidades Indígenas: Sierra Norte Del Estado de Puebla. *Nova Scientia*, 7 (14), 511. <https://doi.org/10.21640/ns.v7i14.94>.
- Hernández-Martínez, G., & Velázquez-Premio, T. (2016). Análisis integral sobre la roya del café y su control. *Revista Internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1(1), 92-99. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/9>.
- Jha, S., Bacon, C.M., Philpott, S.M., Méndez, V.E., Läderach, P., & Rice, R.A. (2014). Shade coffee: Update on a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*, 64 (5), 416-428. <http://dx.doi.org/10.1093/biosci/biu038>.
- Jezeer, R.E., Verweij, P.A., Santos, M.J., & Boot, R.G. A. (2017). Shaded Coffee and Cocoa – Double Dividend for Biodiversity and Small-scale Farmers. *Ecological Economics*, 140, 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.019>.
- Leyequien, E., & Toledo, V.M. (2009). Floras y aves de cafetales: Ensamblajes de biodiversidad en paisajes humanizados. CONABIO. *Biodiversitas*, 83,7-10. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000047189>.
- Libert, A. A., Ituarte-Lima, C., & Elmqvist, T. (2019). Learning from Social–Ecological Crisis for Legal Resilience Building: Multi-Scale Dynamics in the Coffee Rust Epidemic. *Sustainability Science* 15, 485-501. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00703-x>.
- Lin, B. B. (2007). Agroforestry Management as an Adaptive Strategy against Potential Microclimate Extremes in Coffee Agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144 (1–2), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>.
- Machado, V.M.M., & Ríos, O. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: Revisión sistemática. *IDESIA*, 32(2), 15-23. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000002>.
- Macip-Ríos, R., & Casas-Andreu, G. (2008). Los Cafetales En México y Su Importancia Para La Conservación de Los Anfibios y Reptiles. *Acta Zoológica Mexicana*, 24(2), 143–59. <https://doi.org/10.21829/azm.2008.242710>.
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez, J., Gutiérrez, D., Vázquez, J., Salcedo, P.E., Juárez, H. M., y Merino, G.A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4 (1), 66–93. <https://revistas.proeditio.com/REVISTAMAZONICA/article/view/195>.
- Moguel, P., & Toledo V.M. (1999). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13 (1), 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>.

- Monterroso, R. A., Conde, A. C., Gómez, D. J., & López, G. J. (2007). Vulnerabilidad y Riesgo en Agricultura por cambio climático en la Región Centro del Estado de Veracruz, México. *Zonas Áridas*, 11(1), 47-60. <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rza/article/view/203>.
- Morales, B. I. (2013). La vida en torno al café: marginación social de pequeños productores en San Pedro Cafetitlán, Oaxaca, México. *Diálogos Revista Electrónica*, 14 (1), 79–96. <https://doi.org/10.15517/dre.v14i1.8110>.
- 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. <http://www.monitoreoforestal.gob.mx/repositorioidigital/items/show/539>.
- Murga-Menoyo, A., & Novo, M. (2017). Sostenibilidad, desarrollo glocal y ciudadanía planetaria. Referentes de una pedagogía para el desarrollo sostenible. *Ediciones Universidad de Salamanca*, 29 (1), 55-78. <http://dx.doi.org/10.14201/teoredu20172915578>.
- Murguía, V. A., Durán, M. E., Rivera, R., & Barton, B. D. (2014). Cambios En La Cobertura Arbolada de Comunidades Indígenas Con y Sin Iniciativas de Conservación, En Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, 83 (83), 55–73. <https://doi.org/10.14350/ig.34975>.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.
- Naciones Unidas. (2016). *Objetivos de desarrollo sostenible*. [www.un.org/sustainabledevelopment/es](http://www.un.org/sustainabledevelopment/es).
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático. (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 [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Pérez, P. S., Jandl, R., & Rubio, S.A. (2007). Modelación del secuestro de carbono en sistemas forestales: efecto de la elección de especies. *Ecología*, 21, 341-352. <http://oa.upm.es/48573/>.
- Plan Nacional de Desarrollo. (2019). *Gaceta parlamentaria*. Año XXII. Número 5266-XVIII. México: Cámara de diputados.

<https://www.gob.mx/shcp/prensa/comunicado-no-021-plan-nacional-de-desarrollo-2019-2024>.

- Pineda-López, M. R., Ortiz-Ceballos, G., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Los Cafetales y Su Papel En La Captura de Carbono: Un Servicio Ambiental Aún No Valorado En Veracruz. *Madera y Bosques*, 11 (2), 3–14. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1121253>.
- Posada-González, N.L. (2017). Algunas Nociones y Aplicaciones de La Investigación Documental Denominada Estado Del Arte. *Investigación Bibliotecológica*, 31 (73), 237–63. <https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2017.73.57855>.
- Rahn, E., Laderach, P., Baca, M., Cressy, C., Schroth, G., Malin, D., Rikxoort, H., & Shriver, J. (2013). Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: where are the synergies? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 1119-1137. [https://www.researchgate.net/publication/257623275\\_Climate\\_change\\_adaptation\\_mitigation\\_and\\_livelihood\\_benefits\\_in\\_coffee\\_production\\_where\\_are\\_the\\_synergies](https://www.researchgate.net/publication/257623275_Climate_change_adaptation_mitigation_and_livelihood_benefits_in_coffee_production_where_are_the_synergies).
- Rodríguez, M.J.R. (2014). ¿Es posible desarrollarse en torno al café orgánico? Las perspectivas de un negocio local-global en comunidades Mayas. *Antipoda*, 19, 217–41. <https://doi.org/10.7440/antipoda19.2014.10>.
- Ruelas-Monjardín, L.C., Nava-Tablada, M.E., Cervantes, J., & Barradas, V.L. (2014). Importancia ambiental de los agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, 20 (3), 27–40. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.203149>.
- Sánchez, H., Escamilla, P.E., Mendoza, B.M., & Lezama M.N. (2018). Calidad del café (*coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*, 11, 80–86. <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/274>.
- Sánchez, J.G.K. (2015). Participación campesina en el mercado global de café. Cafeticultores organizados en Chiapas. Nóesis. *Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 24 (47–2), 1–19. <https://doi.org/10.20983/noesis.2015.13.1>.
- Sarandón, S.J., Marasas, M.E., Dipietro, F., Belaus, A., Muiño, W., & Oscares, E. (2006). Evaluación de la sustentabilidad del manejo de suelos en agroecosistemas de la provincia de La Pampa, Argentina, mediante el uso de indicadores. *Revista Brasileira de Agroecología*, 1(1), 497-500. <http://revistas.abaagroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/5931>.

- Saura, C.P., & Hernández, P.M. (2008). La Evolución Del Concepto de Sostenibilidad y Su Incidencia En La Educación Ambiental. *Teoría de la Educación*, 20, 179–204. <https://doi.org/10.14201/ted.989>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). *Avance de siembras y cosechas. Resumen por estado*. <https://www.gob.mx/siap/articulos/cafe-datos-preliminares-a-2017-indican-una-produccion-nacional-de-839-mil-toneladas>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Principales estados productores de café*. [http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC\\_00264\\_03.aspx](http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/distritofederal/boletines/Paginas/JAC_00264_03.aspx).
- Soto-Pinto, L., & Jiménez-Ferrer, G. (2018). Contradicciones socioambientales en los procesos de mitigación, asociados al ciclo del carbono en sistemas agroforestales. *Madera y Bosques*, 24, e2401887. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401887>.
- Soto-Pinto, L., Villalvazo-López, V., Jiménez-Ferrer, G., Ramírez-Marcial, N., Montoya, G., & Sinclair, F.L. (2007). The role of local knowledge in determining shade composition of multistrata coffee systems in Chiapas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 16 (2), 419–36. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-5436-3>.
- Souza, H. N., Ron G.M., Brussaard, G. L., Cardoso, I. M., Duarte, E. M.G., Fernandes, R. B. A., Gomes, L. C., & Pulleman, M. M. (2012). Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the atlantic rainforest biome. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146 (1), 179–96. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.007>.
- Urbaniec, K., Mikulcic, H., Rosen, M., & Duic, N. (2017). A holistic approach to sustainable development of energy, water and environment systems. *Journal of cleaner production*, 155(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.119>.
- Vallejo-Ramos, M., Moreno-Calles, A.I., & Casas, A. (2016). TEK and Biodiversity Management in Agroforestry Systems of Different Socio-Ecological Contexts of the Tehuacán Valley. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12 (1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13002-016-0102-2>.
- Velázquez-Premio, G., & Hernández-Martínez, T. (2016). Análisis integral sobre la roya del café y su control. *Revista internacional de Desarrollo Regional Sustentable*, 1 (351), 92–99. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/9>.

## 4. BIOPHYSICAL AND STRUCTURAL COMPOSITION CHARACTERIZATION IN AGROFORESTRY SYSTEMS OF ORGANIC COFFEE FROM VERACRUZ<sup>4</sup>

### 4.1. Summary

**Background.** The agroforestry systems of organic coffee from the community of Chocamán, Central Veracruz, Mexico, have been established for 29 years; they are small areas with complex terrain topography and scarce information on biophysical aspects, composition, and tree structure. **Objective.** To characterize these systems to have local information, useful for decision making. **Methodology.** The biophysical environment characterization, classification of coffee plantations and description of agroforestry systems composition and structure was performed. **Results.** Five terrain forms were defined as: slightly undulating valley, moderately sloping slope, sloping slope, moderately steep slope and steep slope. The main climate is semi-warm from the temperate group with long fresh summer. Coffee plots were classified as traditional and commercial polycultures. Two vertical strata (upper and lower) were distinguished, with a richness of 51 tree and shrub species. *Musa acuminata* Colla was the species with the highest “importance” value of the lower stratum in all the plots evaluated. In the upper stratum, stood out the species *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham., *Inga vera* Willd., *Inga spuria* H & B. Ex Willd., and *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn. **Implications.** This study contributes to decision-making by producers of the Catuaí Amarillo S.S.S. **Conclusion.** Variables obtained can facilitate the selection of species that respond to specific characteristics of the site and the needs of the producer.

**Key words:** biophysical environment, coffee farms, floristic composition, topoforms, tree structure.

---

<sup>4</sup> Este Capítulo fue publicado como:

Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J. D., Valdés-Velarde, E., Tinoco-Rueda, J. A., Flores-Ordoñez, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Biophysical and structural composition characterization in agroforestry systems of organic coffee from Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2), #37.  
<https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3102/1415>.

## 4.2. Resumen

**Antecedentes.** Los sistemas agroforestales de café orgánico en el Municipio de Chocamán, en el centro de Veracruz, se establecieron desde hace 29 años; son áreas pequeñas, con relieve complejo y escasa información sobre aspectos biofísicos, de composición y estructura arbórea. **Objetivo.** Evaluar aspectos biofísicos y de composición estructural de dichos sistemas para tener información local que sea de utilidad en la toma de decisiones. **Metodología.** Consistió en obtener variables del medio biofísico, clasificar las parcelas cafetaleras y determinar la composición y estructura de los sistemas agroforestales. **Resultados.** Se encontraron cinco topoformas definidas como: valle ligeramente ondulado, ladera moderadamente inclinada, ladera inclinada, ladera moderadamente escarpada y ladera escarpada. El tipo de clima predominante es semicálido del grupo de los templados con verano fresco largo. Las parcelas cafetaleras se clasificaron en policultivo tradicional y comercial. Se distinguieron dos estratos verticales (superior e inferior), la riqueza fue de 51 especies arbóreas y arbustivas. *Musa acuminata* Colla fue la especie con mayor valor de importancia del estrato inferior en todas las parcelas evaluadas. En el estrato superior sobresalieron *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham, *Inga vera* Willd, *Inga spuria* H & B. Ex Willd y *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn. **Implicaciones.** El presente estudio contribuye con la toma de decisiones por parte de los productores de la cooperativa Catuaí Amarillo S.S.S. **Conclusiones.** El detalle alcanzado en las variables ambientales estudiadas facilita la selección de especies que respondan tanto a las características del sitio, como a las necesidades del productor.

**Palabras clave:** composición florística, estructura arbórea, fincas cafetaleras, medio biofísico, topoformas.

### 4.3. Introducción

El cultivo de café orgánico es un modo de producción alternativo que contribuye a la conservación de la biodiversidad (Ruelas-Monjardín et al., 2014). Provee una gama de servicios ecosistémicos como captura de carbono, reciclaje de nutrientes, polinización, regulación climática, entre otros (De Beenhouwer et al., 2013; Jha et al., 2014; González y Serna, 2018). Además, tiene la capacidad de ser más resiliente ante el cambio climático (Gidey et al., 2019). De acuerdo con Escamilla y Díaz (2016) los pequeños productores que han podido tener ganancias económicas significativas son aquellos que se han organizado en cooperativas para generar cafés especializados, principalmente orgánicos de la especie *Coffea arabica* en sistemas agroforestales de café clasificados como policultivo tradicional y comercial (Moguel y Toledo, 1999).

A pesar de todos los beneficios que aportan los sistemas agroforestales de café, la promoción de la agricultura intensiva pone en peligro su permanencia (Machado y Ríos, 2016). Aunado a ello, diversas investigaciones han demostrado que los cultivos de café bajo sombra y a pleno sol sufrirán impactos negativos asociados al cambio climático (Läderach et al., 2017; Fain et al., 2018) lo que generará fuertes implicaciones ambientales y socioeconómicas, con afectaciones principalmente a los pequeños productores (Brígido et al., 2015).

Con base en lo expuesto, es indispensable incrementar el conocimiento a nivel local sobre las características agroforestales, que considere aspectos biofísicos, de composición y estructura en los cafetales del centro de Veracruz (García et al., 2016), ya que dicha información a escala local puede ayudar en la comprensión de la funcionalidad del sistema, para diseñar estrategias de conservación que sean más resilientes ante el cambio climático.

La mayoría de los cafetales en el centro de Veracruz utilizan sombra diversificada, con árboles nativos del bosque mesófilo de montaña y diversos frutales (Sánchez-Hernández et al., 2018). El municipio de Chocamán, Veracruz, es un ejemplo de lo anterior, en donde los pequeños productores se organizaron en una Sociedad de Solidaridad Social para producir café orgánico de alta calidad

desde 1990. Su producto está certificado por organismos especializados, tales como la Certificadora Mexicana de Productos y Procesos Ecológicos (CERTIMEX), los Lineamientos para la Operación Orgánica de las Actividades Agropecuarias (LOOAA) y Fairtrade-Comercio Justo. Una de las principales características de dicha organización es que han logrado obtener precios más altos que el promedio regional, ya que tiene un amplio mercado mundial y precios más altos en comparación con el café convencional (Rodríguez, 2014). Las fincas cafetaleras de esta organización son áreas pequeñas, con relieve complejo y escasa información sobre aspectos biofísicos, de composición y estructura arbórea. Esto impide saber en qué estado se encuentra el agroecosistema, lo que limita la toma de decisiones para su manejo, mejoramiento y conservación (Machado y Ríos, 2016); principalmente en la selección de especies utilizadas para sombra y en el mejoramiento y manejo de sus parcelas ante un clima cambiante. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar aspectos biofísicos y de composición estructural de dichos sistemas mediante sus características fisiográficas, climáticas, de composición y estructura arbórea y arbustiva, que permita a la comunidad tener información específica que sea de utilidad para la toma de decisiones en el manejo de sus sistemas agroforestales de producción de café orgánico.

#### **4.4. Materiales y Métodos**

El estudio se llevó a cabo en 25 parcelas de café orgánico. Los terrenos pertenecen a pequeños productores organizados en la cooperativa Catuaí Amarillo S.S.S., localizada en el municipio de Chocamán, Veracruz, sólo una finca cafetalera se encuentra ubicada en el municipio de Córdoba. La superficie de las fincas cafetaleras es variable, estando en un rango de 0.5 a 5 ha; en conjunto suman 50 ha de producción de café orgánico. Utilizan variedades de *Coffea arabica* L, como Tipica, Bourbón, Geisha, Costa Rica 95, Colombia, Caturra, Garnica, Oro azteca, Catuaí Amarillo y Rojo (Apéndice 4.1).

#### **4.4.1. Caracterización del medio biofísico**

**Fisiografía.** Se delimitaron topoformas de acuerdo con la metodología SOTER (Oldeman y van Engelen, 1993), que consiste en el análisis de la pendiente, la forma del terreno y la altitud, obtenidos del modelo digital de elevación a una resolución de 30 m del INEGI (2019). Para cada topoforma, se extrajo la información del tipo de suelo de la capa vectorial de Edafología Serie II, escala 1: 50 000 (INEGI, 2013) y del tipo de roca obtenida de la capa temática de Geología Serie I, escala 1:250 000 (INEGI, 2002).

**Clima.** Se crearon áreas de influencia climática (AIC) a través de la unión de la cartografía de temperatura y precipitación medias anuales generadas siguiendo la metodología de Gómez et al. (2008). Para estimar los valores de temperatura y precipitación se obtuvo información de 10 estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio con datos completos de por lo menos 20 años, tomados del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2019). Se estimó y asignó a cada AIC el tipo de clima dominante, con base en el sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (2004).

#### **4.4.2. Clasificación de las parcelas cafetaleras**

Las parcelas cafetaleras se clasificaron conforme a lo establecido por Moguel y Toledo (1999) que considera la riqueza de especies, el nivel de manejo y la composición y estructura del sistema (Cuadro 4.1). Se midió la riqueza de árboles y arbustos, la cual se define como el número de especies que se encuentran en el sistema por unidad de área (Gaston, 1996). Para ello, se realizó un inventario florístico en cada parcela cafetalera. Se muestrearon unidades de 1000 m<sup>2</sup> considerando únicamente las especies arbóreas y arbustivas utilizadas como sombra en los cafetales. Para todas las especies se midió la altura (m), el diámetro normal (1.3 m sobre el suelo) para el caso de los árboles y el diámetro a 15 cm sobre el suelo para los arbustos (CONAFOR, 2011).

Se efectuaron 25 entrevistas semiestructuradas que representan al 100% de los propietarios de las fincas cafetaleras para conocer el nivel de manejo que realizan

los productores en sus cafetales. Las preguntas se enfocaron principalmente a la realización de podas al cafeto y a los árboles de sombra, deshierbe manual o mecánico, número de fertilizaciones al año, control fitosanitario y renuevo del cafetal. La composición y estructura arbórea y arbustiva de las parcelas cafetaleras se obtuvo como se describe en el siguiente apartado. Posteriormente, las parcelas clasificadas se ubicaron de acuerdo con las topoformas definidas en la zona de estudio.

**Cuadro 4.1.** Clasificación de los diferentes sistemas cafetaleros en México.

| Clasificación           | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rusticano o de montaña  | Se mantiene la vegetación arbórea y arbustiva nativa, solo se sustituye el estrato inferior por plantas de café. Riqueza de especies leñosas mayor a 15, altura promedio del dosel superior a 30 m. Manejo mínimo del cafetal. Alta complejidad en la composición y estructura arbórea y arbustiva. |
| Policultivo tradicional | Árboles y arbustos de usos múltiples utilizados para sombra del café, pueden ser nativos o introducidos. Riqueza de especies leñosas mayor a 6, altura promedio del dosel superior a 15 m. Un mayor manejo en el sistema. Alta complejidad en la composición y estructura arbórea y arbustiva.      |
| Policultivo comercial   | Árboles y arbustos de usos múltiples utilizados para sombra del café, pueden ser nativos o introducidos. Riqueza de especies leñosas > 2 pero < 6, altura promedio del dosel menor a 15 m. Alto manejo en el sistema. Media complejidad en la composición y estructura arbórea y arbustiva          |
| Especializado           | Árboles de usos múltiples utilizados para sombra del café, generalmente son introducidos. Riqueza de especies leñosas entre 1 y 2, altura promedio del dosel de 2 a 4 m. Alto manejo en el sistema. Baja complejidad en la composición y estructura arbórea y arbustiva                             |
| A pleno sol             | No presenta árboles ni arbustos para sombra . Alto manejo en el sistema                                                                                                                                                                                                                             |

**Fuente:** Adaptado de Moguel y Toledo (1999).

#### 4.4.3. Composición y estructura de las parcelas cafetaleras

A partir del inventario, se obtuvo la abundancia por hectárea de cada especie; se estimaron los valores relativos de dominancia (DR), densidad (DER) y frecuencia (FR) de las especies (Mueller-Dumbois y Ellenberg, 1974). Se obtuvo el valor de importancia relativa (VIR) de cada especie con la siguiente fórmula:

$$VIR = (DR + DER + FR)/3 \quad (1)$$

Donde: *VIR* = Valor de importancia relativa de la especie *i*

*DR* = Dominancia Relativa =

*Área basal de la especie i* /  $\sum$  *Área basal de todas las especies*

*DER* = Densidad relativa =

*Número de individuos de la especie i* / *Número total de individuos de toda el área muestreada*

*FR* = Frecuencia relativa =

*Número de parcelas en las que la especie i está presente/Número total de parcelas*

Con los datos obtenidos del valor de importancia relativa de cada especie y observaciones en campo sobre la fisonomía de la vegetación, se procedió a la representación de la estructura vertical y horizontal de los sistemas cafetaleros por medio de diagramas de perfil semirrealista (Richards et al., 1996). Los cuales, se elaboraron para cada topoforma encontrada en la zona.

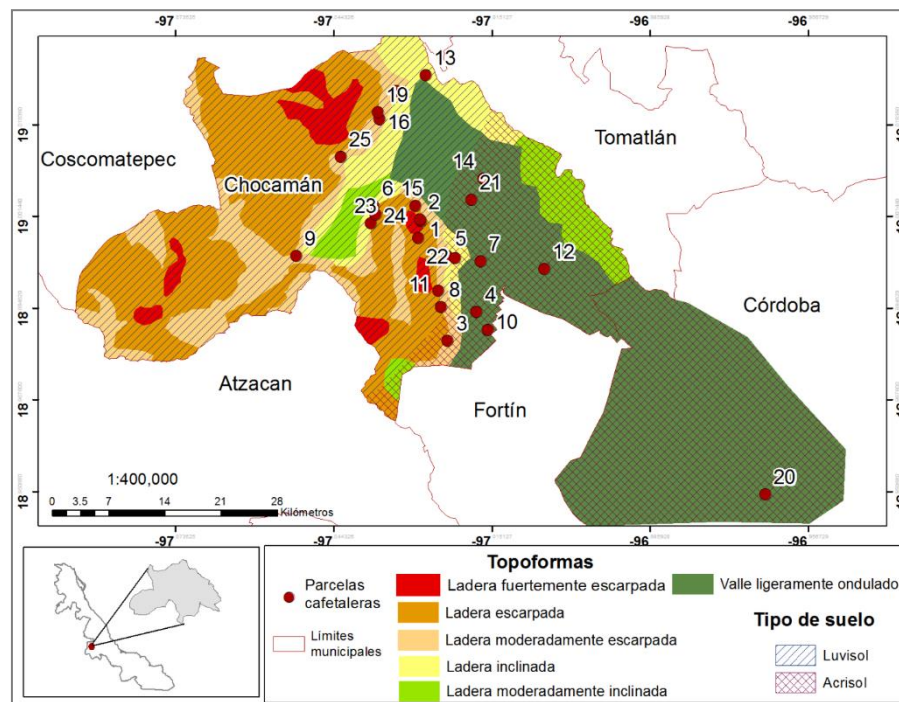
#### **4.5. Resultados y Discusión**

##### **4.5.1. Caracterización del medio biofísico**

**Fisiografía.** Se encontraron cinco topoformas diferentes en las parcelas cafetaleras (Cuadro 2). La primera de ellas se denominó como valle ligeramente ondulado con pendientes entre 0 y 5%, la cual representa el 19.82% del total de la superficie de los cafetales evaluados; así mismo, se encontraron laderas moderadamente inclinadas (5 a 8% de pendiente), inclinadas (8 a 15% de pendiente), moderadamente escarpadas (15 a 30% de pendiente) y escarpadas (30 a 60% de pendiente) con un porcentaje del total de la superficie de los cafetales de 2.94%, 11.14%, 28.94% y 37.16% respectivamente (Figura 4.1).

Con los datos que se mencionaron anteriormente se tiene que el 66.10% de la superficie de los cafetales se localiza en laderas moderadamente escarpadas y escarpadas, lo que genera que el acceso sea complicado. Esto se debe a que la zona de estudio se encuentra a la orilla de la cordillera de la Sierra Madre Oriental, con un relieve complejo en laderas moderadamente escarpadas y escarpadas. Debido a que la pendiente tiene correlación positiva con la erosión del suelo, es recomendable mantener el suelo cubierto con los sistemas agroforestales de café para evitar procesos degradativos que pueden generar pérdida en la productividad del sistema (Durán et al., 2014; Miura et al., 2015).

El tipo de roca y suelo encontrados en cuatro de las cinco topoformas se clasifican de acuerdo con INEGI como Calizas y Luvisoles respectivamente (INEGI, 2002; INEGI, 2013). En el valle ligeramente ondulado la roca predominante es ígnea extrusiva básica con un tipo de suelo Acrisol (Cuadro 4.2 y Figura 4.1). El tipo de suelo encontrado en las parcelas cafetaleras se consideran como aptos a muy aptos para la producción de café bajo sombra, ya que la capa negra del suelo superficial es muy gruesa y fértil, tienen capacidad alta de retención de humedad, son muy productivos y requieren poco fertilizante (Licona-Vargas et al., 2006).



**Figura 4.1.** Distribución geográfica de las diferentes topoformas obtenidas mediante la metodología SOTER (Oldeman y van Engelen, 1993) y tipo de suelo de acuerdo con INEGI (2013) en las parcelas cafetaleras de Chocamán, Veracruz.

**Clima.** Se determinaron 14 áreas de influencia climática y se identificaron tres climas diferentes en las parcelas cafetaleras evaluadas (Figura 4.2). La temperatura media anual en toda la zona fue de 18.8 °C, con temperaturas mínimas de 14.5 °C en el mes de enero y máximas de 22.8 °C en el mes de

mayo. Cabe mencionar que, de acuerdo con el Atlas de riesgo del municipio, las temperaturas mínimas pueden disminuir ocasionando un riesgo por heladas clasificado como moderado a muy ligero (SEDESOL, 2011). El rango anual de la precipitación oscila entre 1800 y 2000 mm. Los meses con menor precipitación van de diciembre a marzo, mientras que la mayor precipitación se presenta en verano, en los meses de junio a septiembre (Cuadro 4.3). Estos resultados son similares a los determinados por Bautista et al. (2018) en sistemas cafetaleros de la zona montañosa del municipio de Huatusco, Veracruz.

**Cuadro 4.2.** Variables del medio biofísico y topoformas encontradas en las parcelas de café orgánico bajo sombra en el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Pendiente %*                   | Altitud *(msnm ) | Roca**                 | Suelo*<br>* | Temperatura media anual (C°)*** | Precipitación media anual (mm)*** | Tipo de clima**** |
|--------------------------------|------------------|------------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Ladera escarpada               |                  |                        |             |                                 |                                   |                   |
| 30-60                          | 1400-1467        | Caliza                 | Luvisol     | 18.5                            | 1800-2000                         | (A)Cb(fm)(i')gw"  |
|                                |                  |                        | Acrisol     | 19.3                            |                                   | (A)Ca(fm)(i')gw"  |
| Ladera moderadamente escarpada |                  |                        |             |                                 |                                   |                   |
| 15-30                          | 1330-1450        | Caliza                 | Luvisol     | 18.5                            | 1800-2000                         | (A)Cb(fm)(i')gw"  |
|                                |                  |                        |             | 20.1                            |                                   | (A)Ca(fm)(i')gw"  |
| Ladera inclinada               |                  |                        |             |                                 |                                   |                   |
| 8-15                           | 1325-1345        | Caliza                 | Luvisol     | 18.5                            | 1800-2000                         | (A)Cb(fm)(i')gw"  |
| Ladera moderadamente inclinada |                  |                        |             |                                 |                                   |                   |
| 5-8                            | 1310-1325        | Caliza                 | Luvisol     | 18.5                            | 1800-2000                         | (A)Cb(fm)(i')gw"  |
| Valle ligeramente ondulado     |                  |                        |             |                                 |                                   |                   |
| 0-5                            | 1200-1266        | Ígnea extrusiva básica |             | 18.5                            | 1800-2000                         | (A)Cb(fm)(i')gw"  |
|                                |                  |                        |             | 19.3                            |                                   | (A)Ca(fm)(i')gw"  |
|                                |                  |                        | Acrisol     | 20.1                            |                                   | (A)Ca(fm)(i')gw"  |
|                                |                  |                        |             | 21.5                            |                                   | A@f(m)(i')gw"     |

\*Obtenido del modelo digital de elevación (INEGI, 2019); \*\*Obtenido de la capa temática de Geología Serie I, escala 1:250 000 (INEGI, 2002) y de la capa vectorial de Edafología Serie II, escala 1: 50 000 (INEGI, 2013); \*\*\*Elaboración propia con base en la metodología de Gómez et al. (2008); \*\*\*\* Clasificación de Köppen, modificado por García (2004).

**Cuadro 4.3.** Distribución mensual de la precipitación (mm) en las parcelas cafetaleras del municipio de Chocamán, Veracruz.

| Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May   | Jun   | Jul   | Ags   | Sep | Oct   | Nov | Dic | Rango de precipitación (mm) |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|-----------------------------|
| 53.4 | 53.4 | 53.4 | 93.4 | 133.4 | 333.4 | 316.7 | 266.7 | 325 | 166.7 | 75  | 56  | 1800-2000                   |

Los sistemas cafetaleros localizados en el valle ligeramente ondulado se caracterizan por tener los siguientes climas: semicálidos del grupo de los templados con verano fresco largo y régimen de lluvias intermedio (A)Cb(fm)(i')gw", semicálido del grupo de los templados con verano cálido y régimen de lluvias intermedio (A)Ca(fm)(i')gw", y semicálido húmedo del grupo de los cálidos con régimen de lluvias intermedio A(C)f(m)(i')gw". Los sistemas de producción localizados en laderas moderadamente inclinadas, inclinadas moderadamente escarpadas y escarpada presentan clima predominante (A)Cb(fm)(i')gw" (Cuadro 4.2). La descripción detallada de los tipos climáticos se muestra en el Apéndice 4.2.

#### **4.5.2. Clasificación de las parcelas cafetaleras**

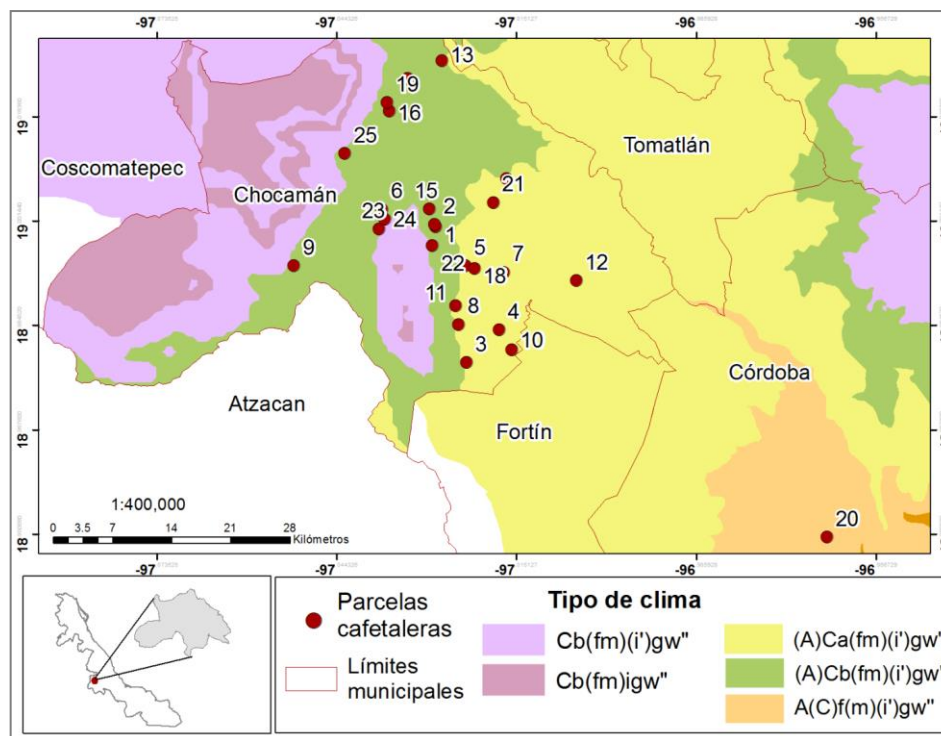
En la zona de estudio sólo se encontraron los sistemas clasificados como policultivo tradicional y policultivo comercial; el 86% de la superficie estudiada corresponde al policultivo tradicional, mientras que el 14% corresponde al policultivo comercial. Se definió policultivo tradicional en cinco parcelas ubicadas en la ladera escarpada (13.24% del total de la superficie); nueve en la ladera moderadamente escarpada (28.5% del total de la superficie); una en la ladera inclinada (1.82 % del total de la superficie) y cinco en el valle ligeramente ondulado (23.68% del total de la superficie). No se registró este tipo de sistema en la ladera moderadamente inclinada. El policultivo tradicional se caracteriza por presentar una altura promedio del dosel superior a 20 metros; se pudieron distinguir dos estratos verticales (superior e inferior) y de siete a tres niveles en la copa de los árboles (Figura 4.3).

Las plantaciones de policultivo comercial se encontraron en tres parcelas cafetaleras del valle ligeramente ondulado (9.44 % del total de la superficie) y tres parcelas de la ladera moderadamente escarpada (23.32% del total de la superficie). Presenta una altura promedio del dosel inferior a los 20 metros; también se distinguieron dos estratos verticales (superior e inferior) y se observaron tres niveles en la copa de los árboles (Figura 4.4). El uso del policultivo tradicional y comercial en el centro de Veracruz prevalece entre los

pequeños productores ya que, al tener una diversidad de productos, se generan mayores ingresos económicos (Sánchez-Hernández et al., 2018).

#### **4.5.3. Composición y estructura de las parcelas cafetaleras**

Los dos sistemas agroforestales de café (policultivo tradicional y comercial) acumularon de manera conjunta una riqueza de 51 especies arbóreas y arbustivas. Las especies pertenecen a 24 familias y 43 géneros (Apéndice 4.3). La familia con mayor número de especies fue Fabaceae con una representatividad de 20 % del total. Estos resultados son similares a los registrados por García et al. (2016), quien encontró un total de 50 especies en policultivos tradicionales y comerciales de Atoyac, Veracruz. De igual forma, la familia Fabaceae fue la más representativa en la zona. Sánchez et al. (2017) encontraron un total de 38 especies con potencial maderable, tanto en el policultivo tradicional como en el comercial. Mientras que Zapata (2019) registró un total de 43 especies arbóreas y arbustivas asociadas al café, siendo la familia Fabaceae la más abundante. La presencia de taxones de la familia Fabaceae dentro de las parcelas de café orgánico bajo sombra genera beneficios al sistema, ya que, al presentar una alta tasa de evapotranspiración, crecimiento rápido y un mejor estado nutricional en comparación con especies de otras familias, se crea retroalimentación positiva del suelo a la planta (Nunes et al., 2019). Por lo que es de suma importancia mantener y considerar el uso de especies de esta familia como sombra para el café.



**Figura 4.2.** Tipo de clima de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificado por García (2004) en las parcelas cafetaleras de Chocamán, Veracruz.

En el policultivo tradicional se encontraron 49 especies arbóreas y arbustivas correspondientes a 41 géneros y 24 familias. *Musa acuminata* Colla (plátano morado) fue la especie con mayor valor de importancia en las cuatro topoformas que presentaron este sistema (Cuadro 4.4).

La especie *Musa acuminata* Colla forma parte del estrato inferior en el policultivo tradicional, con una altura promedio de 1 a 5 m. En el estrato superior, correspondiente a la ladera escarpada y ladera moderadamente escarpada, sobresale la presencia de *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham, *Inga vera* Willd y *Trema micrantha* (L.) Blume. En la ladera inclinada, *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn es la especie arbórea con mayor importancia, seguida de *Inga spuria* H & B. Ex Willd. Mientras que, en el valle ligeramente ondulado, *Inga vera* Willd y *Persea* spp. fueron las especies arbóreas más sobresalientes en este rubro (Figura 4.3).

**Cuadro 4.4.** Valores estructurales de la vegetación arbórea y arbustiva del policultivo tradicional en las diferentes topoformas del municipio de Chocamán, Veracruz.

| Nombre común                          | Especie                                          | Abundancia ha <sup>-1</sup> | Altura (m) | DR*   | FR**  | DER*** | VIR**** |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------|------------|-------|-------|--------|---------|
| <b>Ladera escarpada</b>               |                                                  |                             |            |       |       |        |         |
| Plátano                               | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 2240                        | 1 ± 5      | 24.55 | 6.09  | 63.37  | 31.34   |
| Gusanillo                             | <i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham       | 304                         | 6 ± 15     | 9.18  | 8.53  | 4.36   | 7.36    |
| Vainillo                              | <i>Inga vera</i> Willd                           | 304                         | 6 ± 11     | 4.01  | 12.19 | 5.52   | 7.24    |
| Ixpepe                                | <i>Trema micrantha</i> (L.) Blume                | 112                         | 8 ± 20     | 10.49 | 6.09  | 2.32   | 6.30    |
| Cedro rosado                          | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight et Arn     | 160                         | 13 ± 22    | 11.71 | 4.87  | 2.03   | 6.20    |
| Frijolillo                            | <i>Cojoba arborea</i> (L.) Britton & Rose.       | 96                          | 18 ± 21    | 12.31 | 3.65  | 0.87   | 5.80    |
| Iquimite                              | <i>Erythrina americana</i> Mill                  | 64                          | 15 ± 25    | 3.37  | 2.43  | 1.16   | 2.32    |
| <b>Ladera moderadamente escarpada</b> |                                                  |                             |            |       |       |        |         |
| Plátano                               | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 6480                        | 1 ± 5      | 62.81 | 12.50 | 83.16  | 52.82   |
| Vainillo                              | <i>Inga vera</i> Willd                           | 224                         | 4 ± 15     | 3.52  | 17.86 | 2.87   | 8.08    |
| Gusanillo                             | <i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham       | 96                          | 15 ± 30    | 8.52  | 8.93  | 1.03   | 6.16    |
| Ixpepe                                | <i>Trema micrantha</i> (L.) Blume                | 208                         | 10 ± 16    | 5.96  | 8.93  | 2.67   | 5.85    |
| Chinene                               | <i>Persea schiedeana</i> Nees                    | 80                          | 6 ± 15     | 4.36  | 5.36  | 1.03   | 3.58    |
| Nogal                                 | <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams | 32                          | 20 ± 35    | 3.58  | 3.57  | 0.41   | 2.52    |
| <b>Ladera inclinada</b>               |                                                  |                             |            |       |       |        |         |
| Plátano                               | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 928                         | 1.5 ± 4.5  | 43.59 | 5.88  | 74.68  | 41.38   |
| Cedro rosado                          | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight et Arn     | 48                          | 24 ± 27    | 30.60 | 17.65 | 3.80   | 17.35   |
| Chalahuite                            | <i>Inga spuria</i> H & B. Ex Willd               | 80                          | 4.5 ± 7    | 2.48  | 11.76 | 6.33   | 6.86    |
| Gusanillo                             | <i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham       | 16                          | 15         | 3.25  | 5.88  | 1.27   | 3.47    |
| <b>Valle ligeramente ondulado</b>     |                                                  |                             |            |       |       |        |         |
| Plátano                               | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 5472                        | 1 ± 4      | 55.13 | 8.47  | 78.08  | 47.23   |
| Vainillo                              | <i>Inga vera</i> Willd                           | 192                         | 6 ± 13     | 6.46  | 10.17 | 3.20   | 6.61    |
| Aguacatillo                           | <i>Persea</i> spp.                               | 64                          | 12 ± 15    | 8.16  | 3.39  | 1.14   | 4.23    |
| Cedro rosado                          | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight et Arn     | 48                          | 15 ± 25    | 5.46  | 5.08  | 0.68   | 3.74    |
| Guarumbo                              | <i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.              | 16                          | 16         | 0.77  | 1.69  | 0.23   | 0.90    |

\*Dominancia Relativa; \*\* Frecuencia Relativa; \*\*\*Densidad Relativa; \*\*\*\*Valor de Importancia Relativa

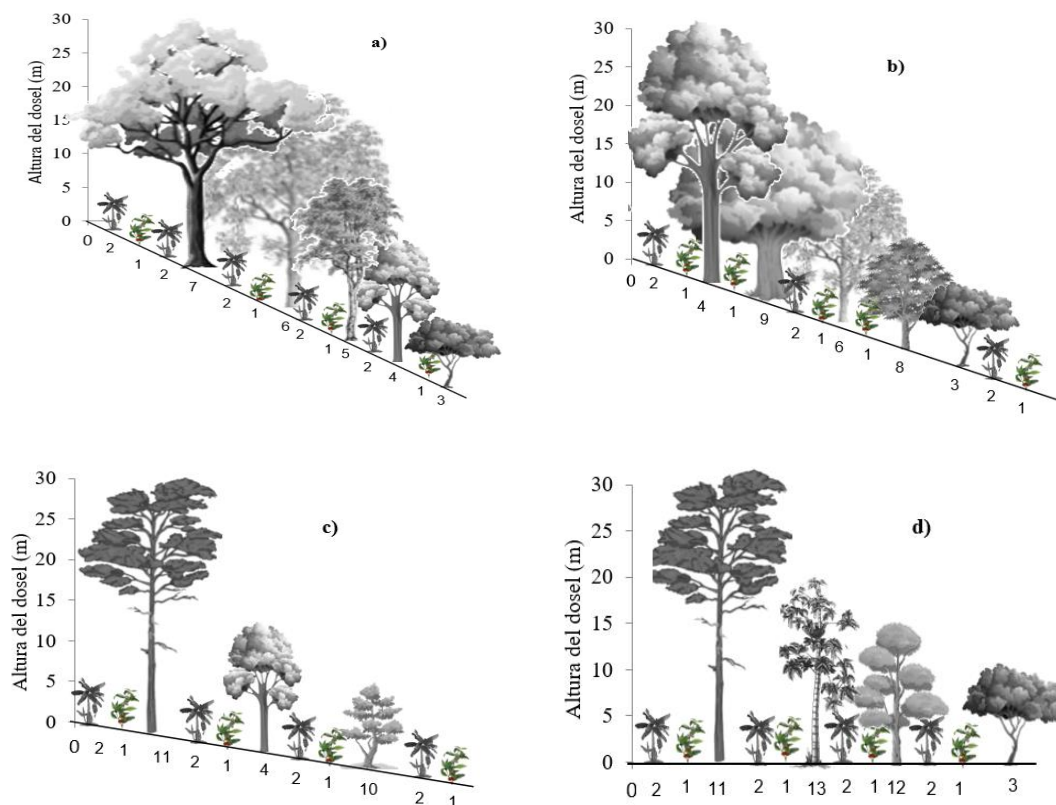
El policultivo comercial solo está presente en la ladera moderadamente inclinada y en el valle ligeramente ondulado. Se registraron 22 especies arbóreas y arbustivas correspondientes a 22 géneros y 14 familias. *M. acuminata*, nuevamente fue la especie con mayor representatividad en el estrato inferior, tanto en el valle ligeramente ondulado, como en la ladera moderadamente escarpada (Cuadro 4.5).

El estrato superior en el policultivo comercial presentó una altura promedio del dosel de 15 m. En la ladera moderadamente escarpada, *I. vera*, *Juglans*

*olanchana* Standl & L. O. Williams y *Platanus mexicana* Moric fueron las especies con mayor Valor de Importancia Relativa (VIR) (Cuadro 5). En el valle ligeramente ondulado, *I. spuria*, *A. fraxinifolius* y *Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken fueron las especies con mayor representatividad en el estrato superior (Figura 4.4).

La estructura vertical encontrada en las diferentes topoformas del terreno, tanto en el policultivo tradicional como en el comercial, presentó alturas y edades distintas, lo que explica la presencia de varios estratos y mayor complejidad en el sistema (Ordóñez et al., 2019). Se detectó la presencia de frutales en el estrato medio; sin embargo, no tuvieron representatividad en los sistemas cafetaleros evaluados, debido a la baja abundancia de individuos por hectárea. La presencia de especies exóticas, definidas por el Convenio sobre la Diversidad Biológica como aquellas especies introducidas fuera de su distribución natural (CDB,2002), localizadas en las parcelas con policultivo tradicional y comercial, tales como *M. acuminata*, *I. vera*, *I. spuria*, *L. myriocephala*, *A. fraxinifolius* y *T. micrantha*, coincide con lo registrado por Bautista et al. (2018) en sistemas agroforestales de café de la región montañosa de Huatusco, Veracruz.

La existencia de *M. acuminata* en el estrato inferior en todos los cafetales evaluados, indica su plasticidad, expresada en la capacidad para adaptarse en cualquier tipo de forma del terreno, clima y suelo. Así mismo, representa una alternativa de producción que amortigua los problemas de los precios del café, ya que la hoja tierna de plátano llamada velillo tiene un mercado nacional e internacional, que se ha convertido en una de las actividades agrícolas permanentes más importantes de algunas comunidades cafetaleras del estado de Veracruz (Susan et al., 2017). Sin embargo, se recomienda que se cultive en bajas densidades (400 pl ha<sup>-1</sup>) para evitar una extracción excesiva de nutrientes del suelo y el remplazo de los árboles de sombra dentro de los cafetales evaluados.



**Figura 4.3.** Perfil semi-realista del policultivo tradicional de café en el municipio de Chocamán, Veracruz: a) ladera escarpada, b) ladera moderadamente escarpada, c) ladera inclinada, y d) valle ligeramente ondulado. Especies con mayor valor de importancia: Estrato inferior: 1. café (*Coffea arabica* L), 2. plátano velillo (*Musa acuminata* Colla). Estrato superior: 3. Vainillo (*Inga vera* Willd) 4. Gusanillo (*Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham), 5. Frijolillo (*Cojoba arborea* (L.) Britton & Rose), 6. Ixpepe (*Trema micrantha* (L.) Blume), 7. Iquimite (*Erythrina americana* Mill), 8. Chinene (*Persea schiedeana* Nees), 9. Nogal (*Juglans olanchana* Standl & L. O. Williams), 10. Chalahuite (*Inga spuria* H & B. Ex Willd) 11. Cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn). 12. Aguacatillo (*Persea* spp.). 13. Guarumbo (*Cecropia obtusifolia* Bertol.).

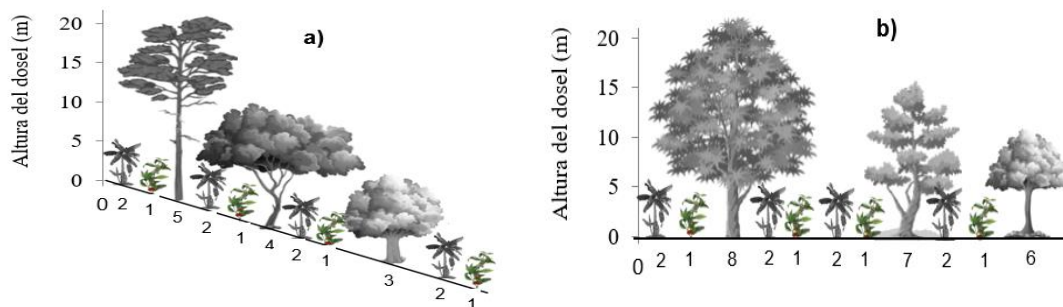
**Cuadro 4.5.** Valores estructurales de la vegetación arbórea y arbustiva del policultivo comercial en el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Nombre común                          | Especie                                          | Abundancia<br>ha <sup>-1</sup> | Altura (m) | DR*  | FR** | DER*** | VIR**** |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|------------|------|------|--------|---------|
| <b>Ladera moderadamente escarpada</b> |                                                  |                                |            |      |      |        |         |
| Vainillo                              | <i>Inga vera</i> Willd                           | 96                             | 10 ± 12    | 25.3 | 10.0 | 10.34  | 15.23   |
| Nogal                                 | <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams | 192                            | 8 ± 10     | 9.92 | 5.00 | 20.68  | 11.87   |
| Álamo                                 | <i>Platanus mexicana</i> Moric.                  | 48                             | 10 ± 15    | 6.91 | 15.0 | 5.17   | 9.02    |
| Plátano                               | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 112                            | 1 ± 5      | 9.11 | 5.00 | 12.06  | 8.72    |
| <b>Valle ligeramente ondulado</b>     |                                                  |                                |            |      |      |        |         |

| Nombre común  | Especie                                      | Abundancia<br>ha <sup>-1</sup> | Altura (m) | DR*   | FR** | DER*** | VIR**** |
|---------------|----------------------------------------------|--------------------------------|------------|-------|------|--------|---------|
| Plátano       | <i>Musa acuminata</i> Colla                  | 6352                           | 1 ± 5      | 72.58 | 13.0 | 89.77  | 58.46   |
| Chalahuite    | <i>Inga spuria</i> H & B. Ex Willd           | 256                            | 7 ± 15     | 6.74  | 13.0 | 2.77   | 7.521   |
| Cedro rosado  | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight et Arn | 16                             | 11 ± 15    | 4.85  | 8.69 | 0.69   | 4.74    |
| Xochicuahuatl | <i>Cordia alliodora</i> (Ruíz & Pav.) Oken   | 256                            | 4 ± 10     | 2.41  | 8.69 | 2.77   | 4.62    |

\*Dominancia Relativa; \*\* Frecuencia relativa; \*\*\*Densidad Relativa; \*\*\*\*Valor de Importancia Relativa.

El establecimiento de especies del género *Inga* sp. (*I. vera* e *I. spuria*) en el estrato superior de las cuatro topoformas con policultivo tradicional y en las dos topoformas que tuvieron policultivo comercial, se debe a que fueron promovidas por el extinto Instituto Mexicano del Café (INMECAFE) (Sánchez et al., 2017). Estas especies, al pertenecer a la familia Fabaceae, tienen la cualidad de suministrar al suelo cantidades de materia orgánica altas en nitrógeno, con lo que se mejoran sus características físicas, químicas y biológicas (Nunes et al., 2019). Al igual que el plátano velillo, estas especies tienen la capacidad de desarrollarse adecuadamente en los diferentes climas, suelos y formas del terreno encontrados en esta investigación.



**Figura 4.4.** Perfil semirealista del policultivo comercial de café en el municipio de Chocamán, Veracruz: a) ladera moderadamente escarpada, y b) valle ligeramente ondulado. Estrato inferior: 1. Café (*Coffea arabica* L). 2. Plátano velillo (*Musa acuminata* Colla). Estrato superior: 3. Nogal (*Juglans olanchana* Standl & L. O. Williams). 4. Vainillo (*Inga vera* Willd). 5. Cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn) 6. Xochicuahuatl (*Cordia alliodora* (Ruíz & Pav.) Oken) 7. Chalahuite (*Inga spuria* H & B. Ex Willd). 8. Álamo (*Platanus mexicana* Moric).

La presencia de *L. myriocephala* en las parcelas con el tipo de manejo de policultivo tradicional que se ubican en la ladera escarpada, moderadamente escarpada e inclinada, se debe principalmente a que esta especie es hospedera de las larvas de la especie de mariposa *Phasus triangularis* H.E., la cual es muy

apreciada por los pobladores de la zona como alimento para auto consumo, debido al alto valor nutrimental (Escamilla-Prado et al., 2012). Así mismo, puede desarrollarse adecuadamente bajo las condiciones biofísicas encontradas en la zona de estudio.

El taxón *A. fraxinifolius* es una especie preferida por los productores como sombra del café, tanto en el policultivo comercial como en el tradicional, debido a que es apreciada por su madera y no demerita la calidad física y sensorial del grano del café (Sánchez-Hernández et al., 2018). A pesar de que esta especie se encuentra en la mayoría de las parcelas con policultivo tradicional y comercial, tuvo un alto VIR (17.35%) en los terrenos parcelas con policultivo tradicional ubicadas en la ladera inclinada; esto se puede deber a que las características biofísicas en esta topografía favorecen a un mejor desarrollo de la especie.

*T. micrantha* sólo se registró en el policultivo tradicional de la ladera escarpada y ladera moderadamente escarpada, con un VIR de 6.3 y 5.8 respectivamente, a pesar de que tiene la capacidad de desarrollarse adecuadamente en cualquiera de las condiciones biofísicas encontradas en la zona de estudio. Esto se puede relacionar con que la especie no es muy apreciada por los productores, debido a que consideran que compite con el café por la humedad del suelo (Escamilla-Prado et al., 2012). Sin embargo, se tiene conocimiento de que esta especie produce una gran cantidad de materia orgánica que genera un aumento en el contenido de carbono orgánico en el suelo, y por ende una mejor calidad de éste; además tiene buena calidad de madera (Quintanar-Isaías et al., 2012). Por lo que el establecimiento de esta especie puede beneficiar a largo plazo los sistemas cafetaleros del área de estudio, tanto en el aspecto ambiental como en el económico, de ahí la importancia de reconsiderar su uso en las parcelas cafetaleras estudiadas.

Las especies nativas del estrato superior, tales como *J. olanchana*, *P. mexicana* y *P. schiedeana* tuvieron un alto VIR, tanto en policultivo tradicional como en comercial, ubicados en ladera moderadamente escarpada (Cuadro 4.4 y 4.5). Las dos primeras especies son apreciadas por la sombra que proporcionan al cafetal

y por la calidad de la madera. Mientras que *P. schiedeana* se aprovecha para sombra, sin embargo, la principal cualidad de esta especie es la calidad del fruto, con características organolépticas adecuadas para su comercialización en mercados de mayor exigencia, debido a que es muy similar al aguacate Hass (Cruz-Castillo et al., 2007), lo que genera ingresos económicos adicionales a los pequeños productores de café del área de estudio.

El alto VIR obtenido por las especies mencionadas anteriormente tanto en el policultivo tradicional como en el comercial, ubicadas en las distintas topoformas de la zona de estudio, se debe fundamentalmente que proporcionan los productores beneficio económico extra y porque tienen la capacidad de desarrollarse adecuadamente en las condiciones biofísicas particulares del área estudiada. Existen especies establecidas por los productores por algún interés económico, las cuales no pudieron desarrollarse adecuadamente porque las condiciones biofísicas no fueron favorables. Este es el caso de *C. alliodora*, que se estableció en gran parte de las parcelas cafetaleras evaluadas; sin embargo, solo pudo sobresalir en el policultivo comercial del valle ligeramente ondulado (Cuadro 4.5). Tanto en el policultivo tradicional como comercial, localizados en las cinco topoformas del área de estudio, se observó poco desarrollo de *C. alliodora*, la cual también sufre afectaciones por muérdago (*Phoradendrum* sp.). Esto se puede deber a que *C. alliodora* no se encuentra en condiciones de óptimo desarrollo. El crecimiento de *C. alliodora* se da en altitudes de 0 a 1000 msnm, mientras que el rango altitudinal de la zona de estudio es de 1150 a 1500 msnm; así mismo, requiere temperaturas mínimas de 18 °C y máximas de 32 °C, con precipitaciones de 2000 a 4000 mm anuales (Vázquez-Yanes et al., 1999), mientras que en el área de estudio las temperaturas mínimas son de 14.5 °C y las máximas de 22.8 °C, y el rango de precipitación es de 1800 a 2000 mm anuales. Este es un ejemplo de que el conocimiento de las variables biofísicas en áreas con escasa información, como es el caso de Chocamán, Veracruz, son fundamentales para evitar introducir especies que no podrán desarrollarse bajo las condiciones biofísicas existentes.

#### **4.6. Conclusiones**

El detalle alcanzado en las variables biofísicas, de estructura y composición en las parcelas evaluadas facilita la selección de especies que respondan tanto a las características del sitio, como a las necesidades del productor en la comunidad de Chocamán, Veracruz. El relieve es la variante que más retos implica en el manejo de los sistemas de producción, debido a su alta variabilidad en el área de estudio. Los sistemas de manejo policultivo tradicional y comercial observan alta variabilidad en la composición y estructura arbórea y arbustiva. La complejidad en el terreno, y al hecho de que algunas fincas cafetaleras sean de difícil acceso, explica la permanencia de vegetación nativa de especies leñosas del bosque mesófilo de montaña. El uso diversificado de especies de usos múltiples responde a la necesidad de obtener algún beneficio por parte del productor. El policultivo tradicional puede generar mayores beneficios ambientales, mientras que el policultivo comercial puede aumentar los beneficios económicos del pequeño productor. Por lo que es necesario generar estudios que indaguen con mayor profundidad sobre los beneficios tanto ambientales como sociales y económicos que generan ambos sistemas, así como la preferencia de los productores sobre la selección de especies de usos múltiples que deban incluirse como sombra en los cafetales. El presente estudio contribuye con la toma de decisiones por parte de los productores de la cooperativa Catuái Amarillo S.S.S., al considerar la variabilidad climática y aspectos biofísicos, de composición y estructura arbórea y arbustiva en la zona.

#### 4.7. Referencias

- Bautista, C.E.A., Ordaz, C.V.M., Gutiérrez, C.M.C., Gutiérrez, C.E.V. y Cajuste, B.L. 2018. Sistemas agroforestales de café en Veracruz, México: identificación y cuantificación espacial usando SIG, percepción remota y conocimiento local. *Revista Terra Latinoamérica*, [e-journal] 36(3), pp. 261-273. <http://dx.doi.org/10.28940/terra.v36i3.350>.
- Brígido, J.G., Nikolskii I., Terrazas, L. y Herrera, S.S. 2015. Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, [online] 6(4), pp. 101-116. Disponible en: <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/articleCms/view/1182/1085> [Accesado 20 mayo 2019].
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo Remuestreo 2011*. [pdf] Zapopan, Jalisco: CONAFOR. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx> [Accesado 5 marzo 2019].
- CDB (Convenio sobre la Diversidad Biológica). 2002. Sexta Conferencia de las Partes, La Haya, Países Bajos, 7 al 19 de abril de 2002: Decisión VI/23: Especies exóticas que amenazan a los ecosistemas, los hábitats o las especies, a la que se incorporan como anexo los Principios de orientación para la prevención, introducción y mitigación de impactos de especies exóticas que amenazan los ecosistemas, los hábitats o las especies. [online] Disponible en: <http://www.cbd.int/decision/cop/default.shtml?id=7197>.
- Cruz-Castillo, J.G., Del Ángel-Coronel, O.A., Cruz-Medina, J. y Joaquín-Martínez, M.C. 2007. Características morfológicas y bioquímicas de frutos de chinene (*Persea schiedeana* Nees.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, [e-journal] 13(2), pp. 141-147. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2006.12.052>.
- De Beenhouwer, M., Aertsb, R., and Honnay, O. 2013. A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, [e-journal] 175 (1), pp. 1-7. <https://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>.
- Durán, V.H., Rodríguez, C.R., Cuadros, S. y Francia, J.R. 2014. Impacto de la erosión y escorrentía en laderas de agroecosistemas de montaña mediterránea. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, [e-journal] 23(1), pp. 66-72. <http://dx.doi.org/10.7818/ECOS.2014.23-1.12>.

- Escamilla, P.E. y Díaz, S.C. 2016. *Sistemas de cultivo de café en México. Huatusco, Veracruz*. [pdf] CENACAFE. Disponible en: <http://www.cenacafe.org.mx>. [Accesado 17 julio 2019].
- Escamilla-Prado, E., Escamilla-Femat, S., Gómez-Utrilla, J.M., Andrade, M.T., Ramos-Elorduy, J. y Pino-Moreno, J.M. 2012. Uso tradicional de tres especies de insectos comestibles en agroecosistemas cafetaleros del estado de Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, [online] 15(2), pp. S101-S109. Disponible en: <http://www.revista.ccca.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1784/783> [Accesado 15 abril 2019].
- Fain, S.J., Quiñones, M., Álvarez-Berrios, N.L., Parés-Ramos, I.K. and Gould, W.A. 2018. Climate change and coffee: assessing vulnerability by deling future climate suitability in the caribbean island of Puerto Rico. *Climatic Change*, [e-journal] 146(1), pp. 175-186. <https://dx.doi.org/10.1007/s10584-017-1949-5>.
- García, A.E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las condiciones de la República Mexicana. 5ª ed. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. 98 p.
- García, M.L.E., Valdez, H.J.I., Luna, C.M. y López, M.R. 2016. Estructura y diversidad arbórea en sistemas agroforestales de café en la Sierra de Atoyac, Veracruz. *Madera y Bosques*, [e-journal] 21(3), pp. 69-82. <https://dx.doi.org/10.21829/myb.2015.213457>.
- Gaston, K.J. 1996. Biodiversity-congruence. *Progress in Physical Geography*, [e-journal] 20(1), pp. 105-112. <https://dx.doi.org/10.1177/030913339602000108>.
- Gidey, T., Oliveira, T.S., Crous-Duran, J. and Palma, J.H.N. 2019. Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems. *Agroforestry Systems*, [e-journal] 71(3), pp. 1-14. <https://dx.doi.org/10.1007/s10457-019-00369-5>.
- Gómez, J.D., Etchevers, J.D., Monterroso, A.I., Gay, C., Campo, J. and Martínez, M. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmósfera*, [online] 21(1), pp. 35-56. Disponible en: <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8596/8066> [Accesado 25 marzo 2019].

- González, G.M. y Serna, G.C.A. 2018. Servicios ecosistémicos potenciales en el sector cafetalero colombiano. *Cenicafé*, [online] 69(2), pp. 35-46. Disponible en: [https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras\\_publicaciones/cenicafes\\_journal](https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/cenicafes_journal) [Accesado 17 abril 2019].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2013. *Continuo nacional de unidades edafológicas Serie II. Conjunto de datos de perfiles de suelos Escala 1: 250 000 Serie II*. [online]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>. [Accesado 22 abril 2019].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2019. *Continuo de elevación mexicano*. [online] Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>. [Accesado 17 abril 2019].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2002. *Conjunto de datos Geológicos vectoriales. Escala 1:250 000. Serie I*. [online]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/> [Accesado 30 abril 2019].
- Jha, S., Bacon, C.M., Philpott, S.M., Méndez, V. E., Läderach, P. and Rice, R.A. 2014. Shade coffee: Update on a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*, [e-journal] 64(5), pp. 416-428. <http://dx.doi.org/10.1093/biosci/biu038>.
- Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martinez-Valle, A. and Jarvis A. 2017. Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Climatic Change*, [e-journal] 141(1), pp.47-62. <https://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>.
- Licona-Vargas, A.L., Ortiz-Solorio, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C. y Manzano-Ramos, F. 2006. Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café-plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. *Terra Latinoamericana*, [online] 24(1), pp. 1-7. Disponible en: <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>. [Accesado 15 junio 2019].
- Machado, V.M.M. y Ríos, O. 2016. Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores: Revisión sistemática. *IDESIA*, [e-journal] 32(2), pp. 15-23. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016005000002>.
- Miura, S., Ugawa, S., Yoshinaga, S., Yamada, T. and Hirai, K. 2015. Floor cover percentage determines splash erosion in *Chamaecyparis obtusa* forests. *Soil Science Society of America Journal*, [e-journal] 79(6), pp. 1782-1791. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2015.05.0171>.

- Moguel, P. and Toledo, V.M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of México. *Conservation Biology*, [e-journal] 13(1), pp. 11-21. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>.
- Mueller-Dumbois, D. and Ellenberg, H. 1974. The countplot method and plotless sampling techniques. In: Mueller-Dumbois, D. and Ellenberg, H. (eds.), *Aims and methods of vegetation ecology*. Nueva York: John Wiley & Sons. pp. 93-135.
- Nunes, M.L., Feitosa, S.T.A. and Santos, D. 2019. Transpiratory rate, biomass production and leaf macronutrient content of different plant species cultivated on a regosol in the brazilian semiarid. *Russian Agricultural Sciences*, [e-journal] 45(1), pp. 147-153. <https://dx.doi.org/10.3103/S1068367419020150>.
- Oldeman, L.R. and van Engelen, V.W.P. 1993. A world soils and terrain digital database (SOTER). An improved assessment of land resources. *Geoderma*, [e-journal] 60(1), pp. 309-325. [https://dx.doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90033-H](https://dx.doi.org/10.1016/0016-7061(93)90033-H).
- Ordóñez, J.H.R., Navia, E.J.F. y Ballesteros, P.W. 2019. Tipificación de sistemas de producción de café en La Unión Nariño, Colombia. *Temas Agrarios*, [e-journal] 24(1), pp. 52-65. <https://dx.doi.org/10.21897/rta.v24i1.1779>.
- Quintanar-Isaías, A., Jacobo-Villa, M.A., López-Binnqüist, C., Flores-Hernández, N., Jaramillo-Pérez, A.T., y De la Paz Pérez-Olvera, C. 2012. La madera de *Trema micrantha* (L.) Blume de Veracruz. *Madera y Bosques*, [e-journal] 18(2), pp. 73-91. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2012.182353>.
- Richards, P.W., Walsh, R.P.D., Baillie, I.C. and Greig-Smith, P. 1996. *The tropical rain forest: An ecological study*. 2a ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 575 p.
- Rodríguez, M.J.R. 2014. ¿Es posible desarrollarse en torno al café orgánico? Las perspectivas de un negocio local-global en comunidades mayas. *Antipoda, Revista de Antropología y Arqueología*, [e-journal] 19, pp. 217-241. <http://dx.doi.org/10.7440/antipoda19.2014.10>.
- Ruelas-Monjardín, L.C., Nava-Tablada, M.E., Cervantes, J., Barradas, V.L. 2014. Importancia ambiental de los Agroecosistemas cafetaleros bajo sombra en la zona central montañosa del estado de Veracruz, México. *Madera y Bosques*, [e-journal] 20(3), pp. 27-40. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2014.20314>.

- Sánchez, H.S., Mendoza, B.M.A. y García, H.R.V. 2017. Diversificación de la sombra tradicional de cafetales en Veracruz mediante especies maderables. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, [e-journal] 8(40), pp. 7-17. <https://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v8i40.32>.
- Sánchez-Hernández, S., Escamilla-Prado, E., Mendoza-Briseño, M.A. y Nazario-Lezama, N. 2018. Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*, [online] 11(4), pp. 80-86. Disponible en: <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/issue/view/66>. [Accesado 23 junio 2019].
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2019. Normales climatológicas por estado. [online]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>. [Acceso 15 marzo 2019].
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2011. Atlas de Riesgo del municipio de Chocamán 2011. [online]. Disponible en [http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr\\_30062\\_AR\\_CHOCAMÁN.pdf](http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_30062_AR_CHOCAMÁN.pdf). [Accesado 10 marzo 2020]
- Susan, T.P.V., Noa, C.J.C. y Flores, E.N. 2017. Estado del cultivo de plátano (*Musa* sp.) en el municipio de Tlapacoyan, Veracruz. *UVserva*, [e-journal] 4(1), pp. 81-83. <https://dx.doi.org/10.25009/uvserva.v0i4.2550>.
- Vázquez-Yanes, C.A., Batis, M.A.I., Alcocer, S.M.I., Gual, D.M. y Sánchez, D.C. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. [pdf] Ciudad de México: CONABIO, Instituto de Ecología, UNAM. Disponible en: [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/indice\\_especies.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/indice_especies.html). [Accesado 20 octubre 2019].
- Zapata, A.P.C. 2019. Composición y estructura del dosel de sombra en sistemas agroforestales con café de tres municipios de Cundinamarca, Colombia. *Ciencias Forestales*, [e-journal] 29(2), pp. 685-697. <https://dx.doi.org/10.5902/1980509827037>.

## 5. RESERVAS DE CARBONO EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ (*C. arabica* L.) ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO: CASO MÉXICO<sup>5</sup>

### 5.1. Resumen

**Introducción.** El cambio climático puede alterar las reservas de carbono (C) almacenado en los sistemas agroforestales con café. **Objetivo.** Simular las reservas de C en la biomasa aérea (CBA) y suelo (COS) a una proyección de cincuenta años bajo la línea base y con Escenarios de cambio climático en sistemas agroforestales con café ubicados en el centro de Veracruz, México mediante el modelo CO2Fix. **Materiales y métodos.** En el año 2020, se estableció la línea base de C total (CBA + COS) en 25 parcelas de café orgánico que pertenecen a la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S. Las parcelas se clasificaron en tres diseños agroforestales: D1 (árboles de sombra-café en laderas), D2 (árboles de sombra-café-plátano en laderas) y D3 (árboles de sombra-café-plátano en el valle). Se utilizó el modelo CO2Fix para simular las reservas de C total a una proyección de 50 años bajo la línea base y con Escenarios de cambio climático en los tres diseños agroforestales con café. **Resultados.** El C total en la línea base fue de 124,59 t C ha<sup>-1</sup>, 107,43 t C ha<sup>-1</sup> y 102,320 t C ha<sup>-1</sup> para D1, D2 y D3 respectivamente. Se presentaron disminuciones entre 0,77 y 8,75 t C ha<sup>-1</sup> en las reservas de C total bajo Escenarios de cambio climático en los tres diseños agroforestales evaluados. No hubo diferencias estadísticamente significativas ( $P>0,05$ ) entre los diseños agroforestales en la línea base y bajo Escenarios de cambio climático. Aunque se constataron variaciones, las reservas de C total se mantuvieron a lo largo del tiempo. La cohorte de árboles fue la principal fuente de almacenaje del C total. **Conclusión.** Se deben mantener los árboles de usos múltiples a través del tiempo dentro de los diseños agroforestales con café evaluados, para evitar pérdidas en el futuro de las reservas de C total.

**Palabras clave:** simulación de carbono, biomasa aérea, carbono orgánico del suelo, árboles de sombra, Escenarios de cambio climático

---

<sup>5</sup> Este Capítulo fue aceptado para su publicación como:

Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A.I. Valdés-Velarde, E., Escamilla-Prado, E., Gómez-Díaz, J.D. (2022). Reservas de carbono en sistemas agroforestales con café (*C. arabica* L.) ante el cambio climático: caso México. *Agronomía Mesoamericana*.

## 5.2. Abstract

**Introduction.** Climate change can alter carbon stocks (C) stored in coffee agroforestry systems. **Objective.** To simulate the reserves of C in the aboveground biomass (CBA) and soil (COS) to a projection of 50 years under the baseline and with climate change scenarios in agroforestry systems with coffee located in the center of Veracruz, Mexico through the CO2Fix model. **Materials and methods.** In 2020, the baseline of total C (CBA + COS) was established in 25 organic coffee plots belonging to the Catuaí Amarillo S. de SS Society. The plots were classified into three agroforestry designs: D1 (shade trees- coffee on slopes), D2 (shade trees -coffee-banana on slopes) and D3 (shade trees -coffee-banana in the valley). The CO2Fix model was acquired to simulate the total C reserves at a projection of 50 years under the baseline and with climate change scenarios in the three agroforestry designs with coffee. **Results.** Total C at baseline was 124,59 t C ha<sup>-1</sup>, 107,43 t C ha<sup>-1</sup>, and 102,320 t C ha<sup>-1</sup> for D1, D2, and D3, respectively. There were decreases between 0,77 and 8,75 t C ha<sup>-1</sup> in the low total C reserves of climate change in the three agroforestry designs evaluated. There were no statistically significant differences ( $P>0,05$ ) between the agroforestry designs in the baseline and under climate change scenarios. Although variations were found, total C reserves are maintained over time. The tree cohort is the main storage source of total C. **Conclusion.** Multiple-use trees should be maintained over time within the evaluated coffee agroforestry designs to avoid future loss of total C stocks.

**Keywords:** carbon simulation, aboveground biomass, soil organic carbon, shade trees, climate change scenarios.

### 5.3. Introducción

El aumento de la temperatura y la variación en el régimen de lluvias que deriva en un cambio en el clima global (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021) representa una amenaza para la actividad cafetalera (Rahn et al., 2018). El cambio en las variables del clima puede perjudicar la fenología de *Coffea arabica* L. al alterar la floración, afectar el crecimiento y maduración del fruto, y causar anormalidades y aborto de hojas, flores y frutos (Parada-Molina et al., 2020; Ruiz-García et al., 2021). Además, se espera un incremento en la incidencia y severidad de la roya del café (*Hemileia vastatrix*), así como otras enfermedades fúngicas para el 2050 (Parada-Molina et al., 2020).

El cambio climático también puede disminuir las reservas de carbono en los diferentes sistemas cafetaleros, pues se ha detectado que el aumento de la temperatura altera el comportamiento de los microorganismos que ocasiona pérdidas en las reservas de carbono en el suelo (COS) (Lozano-García et al., 2017). En contraste, la disminución de la precipitación puede generar una menor actividad microbiana y descomposición de COS (Jansson & Hofmocke, 2020).

Los sistemas cafetaleros de Veracruz, que es el segundo estado con mayor producción de café en México (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA], 2019) no están exentos de los impactos del cambio climático, ya que se estima que la producción de café puede disminuir hasta 34% para finales del siglo XXI (Brígido et al., 2015). El 90 % de la superficie sembrada con café en Veracruz utiliza árboles nativos e introducidos de usos múltiples para sombra, en su mayoría, en áreas menores a 5 ha (United States Department of Agriculture [USDA], 2019). El cultivo de cafetales bajo sombra puede mitigar los efectos del cambio climático, ya que tienen el potencial de incrementar las reservas de C durante periodos más largos de tiempo (Zaro et al., 2020). Se estima que los sistemas agroforestales con café en zonas tropicales pueden almacenar hasta 195,60 t C ha<sup>-1</sup> en la biomasa aérea y suelo (Betemariyan et al., 2020; Zaro et al., 2020).

Los sistemas agroforestales con café en el sur de México pueden almacenar entre 150 t C ha<sup>-1</sup> y 195 t C ha<sup>-1</sup> (Álvarez et al., 2012; Soto-Pinto & Aguirre-Dávila, 2015), mientras que en el estado de Veracruz pueden almacenar hasta 188 t C ha<sup>-1</sup> (Masuhara et al., 2015). Por lo tanto, los sistemas agroforestales con café juegan un papel importante en el almacenamiento de C, al tiempo que promueve la conservación de árboles útiles en el paisaje agrícola (Solis et al., 2020).

La cantidad de C almacenada en los suelos de los sistemas agroforestales depende de sus características, las entradas y salidas de carbono orgánico de origen vegetal y animal, el manejo del sistema, la estructura, diversidad y densidad de árboles, la edad de estos, su diámetro y altura en cada estrato, que están determinados por factores sociales, económicos y condiciones climáticas (Nadège et al., 2019; Salgado-Mora et al., 2018). Las condiciones climáticas pueden alterar las reservas de C a largo plazo (Jansson & Hofmocke, 2020). En un estudio del mediterráneo se detectó que bajo escenarios de cambio climático las reservas de COS disminuirán en la capa superior del suelo (Lozano-García et al., 2017). Se necesitan conocer los efectos del cambio climático en las reservas de C de sistemas agroforestales con café para dar posibles soluciones que ayuden a mantener la viabilidad del sistema en el futuro (Ruiz-García et al., 2021).

En México se ha generado información sobre proyecciones de las reservas de C en reforestaciones de bosques templados del norte del país (Návar-Cháidez et al., 2016), así como en plantaciones forestales del estado de Oaxaca (Álvarez & Rubio, 2016). Sin embargo, existe escasa información sobre proyecciones de las reservas de C y su comportamiento bajo escenarios de cambio climático en sistemas cafetaleros de México (Ruiz-García et al., 2020).

Se han utilizado diversos modelos para simular las reservas de C en diferentes sistemas y agroecosistemas, tales como CBM-CFS3, CASMOFOR, EFISCEN, CENTURY, CO2FIX, por mencionar algunos (Kim et al., 2015). El modelo CBM-CFS3 analiza la dinámica de C con perturbaciones y cambios en el uso de la tierra, CASMAFOR se enfoca a plantaciones forestales, al igual que EFISCEN y CENTURY que también incluyen diversos escenarios a nivel de paisaje (Kim et

al., 2015). Mientras que el modelo CO2Fix tiene la capacidad de simular las reservas y flujos de C en la biomasa aérea y materia orgánica del suelo en plantaciones forestales y agroforestales con diversidad de especies en múltiples cohortes (Schelhass et al., 2004).

El modelo calcula el balance de C con un intervalo de tiempo de un año. El insumo básico es el crecimiento del volumen del tallo y el patrón de asignación a los otros compartimentos del árbol (follaje, ramas y raíces), así como parámetros generales tales como: número de podas anuales, la edad del arbolado, la rotación de los cultivos, la densidad arbórea y arbustiva, la temperatura y precipitación anual y mensual, y la Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) del periodo de crecimiento (Masera et al., 2003).

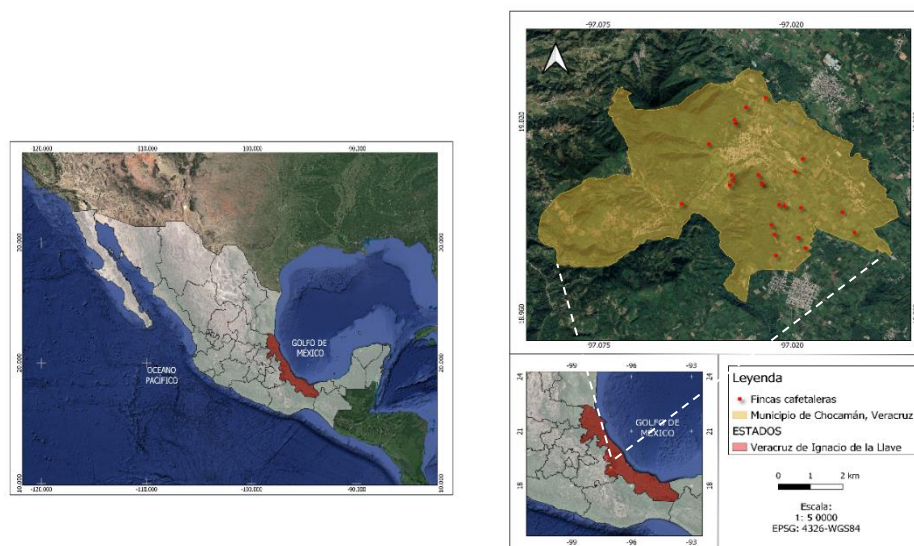
El modelo CO2Fix puede contribuir a obtener información sobre la proyección de las reservas de C tanto en el escenario base como en escenarios de cambio climático en los sistemas agroforestales del estado de Veracruz. El conocimiento sobre las existencias de C bajo Escenarios de cambio climático puede ayudar a mejorar las estrategias de mitigación que se generan en estos sistemas mediante la utilización de especies arbóreas y arbustivas que tengan mayor potencial de fijación de C, así como en el mejoramiento de prácticas agrícolas (incorporación de materia orgánica al suelo, manejo integrado de nutrientes, aplicación de lombricompostas y estiércoles enriquecidos) (Negash & Kanninen, 2015). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue simular las reservas de C en la biomasa aérea (CBA) y suelo (COS) a una proyección de 50 años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático en sistemas agroforestales con café ubicados en el centro de Veracruz, México mediante el uso del modelo CO2Fix.

## **5.4. Materiales y métodos**

### **5.4.1. Área de estudio**

La investigación se llevó a cabo en el periodo comprendido del 5 de marzo del 2020 al 30 de mayo del 2021 en la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo

S. de S.S que pertenece a productores de pequeña escala de café orgánico (*C. arabica* L.) bajo sistemas agroforestales. Se evaluaron todas las fincas cafetaleras de la Sociedad (25 fincas), las cuales se localizan en el municipio de Chocamán, Veracruz, México que se ubica entre los paralelos 18° 58' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 97° 00' y 97° 06' de longitud oeste; tiene una altitud entre 1100 y 2200 msnm (Figura 5.1). Cada finca tiene un área entre 1 a 5 ha, que en conjunto suman un total de 50 ha. La edad promedio de los sistemas agroforestales con café es de 30 años. El 80 % de la superficie de los sistemas cafetaleros evaluados se ubica en las laderas (entre 15 y 60 % de pendiente), mientras que el 20 % se ubica en el valle (con pendiente de 0 a 5 %) (Ruiz-García et al., 2020).



**Figura 5.1.** Ubicación de las fincas cafetaleras (*C. arabica* L.) evaluadas en la Sociedad de Solidaridad Social Catuai Amarillo S. de SS. Localizadas en el municipio de Chocamán, Veracruz, México entre los paralelos 18° 58' y 19° 02' de latitud norte y los meridianos 97° 00' y 97° 06' de longitud oeste. 2020.

El tipo de suelo dominante en las fincas evaluadas es Luvisol (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI], 2013). Los Luvisols se caracterizan por tener un menor contenido de arcillas en la capa superior y un mayor contenido en el suelo subsuperficial (horizonte árgico) donde existe mayor actividad de arcillas y alta saturación de bases (World Reference Base for Soil

Resources [WRB], 2015). El clima representativo donde se ubican las fincas cafetaleras evaluadas es semicálido húmedo del grupo de los templados con verano fresco largo y lluvias todo el año (A)Cb(fm)(i')gw" (García, 2004). La temperatura media anual es de 18,8 °C, con una mínima de 14,5 °C y una máxima de 22,8°C; el rango anual de precipitación oscila entre 1800 y 2000 mm (Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional [CNA-SMN], 2020).

En un estudio previo que se llevó a cabo en las fincas cafetaleras evaluadas se registraron alrededor de 51 especies arbóreas y arbustivas de usos múltiples implementadas como sombra de los cafetales (Ruiz-García et al., 2020). Las especies con mayor valor de importancia ambiental (VI) que reporta el estudio son *Acrocarpus fraxinifolius* Wight et Arn, *Inga vera* Willd, *Inga spuria* H & B. Ex Willd, *Lippia myriocephala* Schltdl. & Cham y *Musa acuminata* Colla (Ruiz-García et al., 2020).

Dadas las características de composición estructural arbórea y arbustiva que determinaron Ruiz-García et al. (2020) las fincas cafetaleras se clasificaron en tres diseños agroforestales, a partir de esta clasificación es como se reportaron los resultados de esta investigación (Cuadro 1). El primer diseño (D1) se caracterizó por presentar las cohortes de árboles de sombra y café; se localizó en las laderas (entre 15 y 60 % de pendiente) del área de estudio. El segundo diseño (D2), además de tener las dos cohortes anteriores, presentó la cohorte de plátano a una densidad de 1260 plantas ha<sup>-1</sup>. Este diseño también se localizó en las laderas de la zona evaluada. El tercer diseño (D3), al igual que D2, estuvo constituido por las cohortes de árboles de sombra-café-plátano. En este caso, el diseño se ubicó en el valle (pendiente de 0 a 5 %) de la zona (Cuadro 5.1). Las cohortes se definen como un grupo de individuos o especies dentro del sistema, que tienen un crecimiento similar (Alder & Silva, 2000). La renovación de la cohorte de café se hace cada 20 años, mientras que la de plátano cada 10 años.

**Cuadro 5.1.** Característica de los diseños agroforestales y las principales cohortes en las fincas cafetaleras (*C. arabica* L.) de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

| Diseño agroforestal | Descripción                                | Pendiente* (%) | Cohortes                                                                              |                   |                     |                                      |      |         |
|---------------------|--------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------|------|---------|
|                     |                                            |                | Especie con mayor valor de importancia ambiental (VI)*                                |                   |                     | Densidad (plantas ha <sup>-1</sup> ) |      |         |
|                     |                                            |                | Árboles de sombra                                                                     | Café              | Plátano             | Árboles de sombra                    | Café | Plátano |
| D1                  | Árboles de sombra-Café en laderas          | 15-60          | <i>I. vera</i> , <i>I. spuria</i> y <i>L. myriocephala</i>                            |                   | -----               | 374                                  | 2600 | -----   |
| D2                  | Árboles de sombra-café-plátano en laderas  |                | <i>L. myriocephala</i><br><i>Trema micrantha</i> (L.) Blume y <i>A. fraxinifolius</i> | <i>C. arabica</i> | <i>M. acuminata</i> | 200                                  | 2800 | 1260    |
| D3                  | Árboles de sombra-café-plátano en el valle | 0-5            | <i>I. vera</i> y <i>A. fraxinifolius</i>                                              |                   |                     | 274                                  | 3100 | 1670    |

\*Obtenido de Ruiz et al. (2020).

La determinación de la línea base de C en la biomasa aérea y del suelo se describe en el siguiente apartado.

#### 5.4.2. Determinación de la línea base de carbono en la biomasa aérea y del suelo

##### Biomasa aérea

El C inicial de la biomasa aérea se determinó mediante un inventario de los reservorios de C en todas las fincas cafetaleras de la Sociedad Catuaí Amarillo S de S.S (25 fincas). En cada finca se estableció una parcela de muestreo circular de 1 000 m<sup>2</sup>, donde se registró el nombre común y la especie de cada individuo que conformó el estrato arbóreo y arbustivo. Para cada individuo del estrato arbóreo se midió el diámetro normal a la altura de 1,30 m, mediante el uso de una cinta diamétrica, y la altura total con un hipsómetro Haga. En el caso de los individuos del estrato arbustivo, se midió el diámetro a 15 cm al ras del suelo con un vernier manual y la altura con una vara graduada.

Se estimó la biomasa máxima total ( $t\ ha^{-1}$ ), así como el contenido de C orgánico de follaje, raíces, ramas y tallos ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) mediante ecuaciones alométricas registradas en literatura (Cuadro 5.2 y 5.3).

**Cuadro 5.2.** Ecuaciones alométricas usadas para determinar el contenido de C orgánico total ( $t\ C\ ha^{-1}$ ) en la línea base de la biomasa aérea en sistemas agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

| Especie                                          | Ecuación alométrica                        | R <sup>2</sup> | Fuente                |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|-----------------------|
| <i>Musa acuminata</i> Colla                      | $Y=0,356*(EXP(0,036*Gbase))$               | 0,83           | (Nyombi et al., 2009) |
| <i>Coffea arabica</i> L                          | $Y=0,147*(d^2)$                            | 0,80           | (Negash et al., 2013) |
| <i>Inga vera</i> Willd                           | $Log10Y = -0,889+2,317 * Log10dbh$<br>(cm) | 0,96           | (Segura et al., 2006) |
| <i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken       | $Log10Y = -0,755+2,072 * Log10dbh$<br>(cm) | 0,95           | (Segura et al., 2006) |
| <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams | $Log10Y = -1,417+2,755 * Log10dbh$<br>(cm) | 0,97           | (Segura et al., 2006) |
| Especies arbóreas con crecimiento similar        | $Log10Y = -0,834+2,223 * Log10dbh$<br>(cm) | 0,93           | (Segura et al., 2006) |

**Cuadro 5.3.** Principales parámetros de entrada para modelar la biomasa aérea con CO2Fix en las cohortes de los diseños agroforestales de la Sociedad Catuái Amarillo S de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2020.

| Parámetro                                  | Árboles de sombra                                               | Cohorte<br>Café                       | Plátano                                                   |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Contenido de C (%)                         | 0,48 (Kuyah et al. 2012)                                        | 0,49 (Negash et al., 2013)            | 0,47 (Negash et al., 2013)                                |
| Densidad madera (MgDM/m <sup>3</sup> )     | 0,60 (Ordoñez et al., 2015)                                     | 0,62 (Negash & Kanninen, 2015)        | 0,20 (Negash & Kanninen, 2015)                            |
| Crecimiento relativo del follaje           | $Log10Y = -1,464 + 2,003 * Log10dbh$ (cm) (Segura et al., 2006) | $Y=0,007*(d^2)$ (Negash et al., 2013) | $Y=7,71*(10^{(-5)})*(Gbase)^{2,28}$ (Nyombi et al., 2009) |
| Crecimiento relativo de ramas              | $Log10Y = -1,287 + 2,275 * Log10dbh$ (cm) (Segura et al., 2006) | $Y=0,058*(d^2)$ (Negash et al., 2013) | -----                                                     |
| Crecimiento relativo de raíces             | Basado en el 17 % de la biomasa total (Negash & Kanninen, 2015) |                                       | $Y=4,44*(10^{(-5)})*(Gbase)^{2,08}$ (Nyombi et al., 2009) |
| Mortalidad (%)<br>(Observaciones en campo) | 20                                                              | 10                                    | 10                                                        |
| Raleo<br>(Observaciones en campo)          | 30% de raleo de ramas cada 15 años                              | Cosecha de todo el rodal cada 20 años | Cosecha de todo el rodal cada 10 años                     |

Para todas las cohortes. **Tasa de rotación del follaje:** tallo y follaje, 0,5; ramas, 0,05 y raíces, 0,05 (Negash & Kanninen, 2015). **C inicial ( $t\ ha^{-1}$ ) y Biomasa aérea máxima ( $t\ ha^{-1}$ ):** inventario de biomasa aérea de C. **Crecimiento del tallo (ICA  $m^3\ ha^{-1}$ ):** en función de la biomasa aérea máxima ( $t\ ha^{-1}$ ). / For all cohorts. **Foliage turnover rate:** stem and foliage, 0,5; branches, 0,05 and roots, 0,05 (Negash & Kanninen, 2015). **Initial C ( $t\ ha^{-1}$ ) and maximum aboveground biomass ( $t\ ha^{-1}$ ):** inventory aboveground biomass of C. **Stem growth (ICA  $m^3\ ha^{-1}$ ):** as a function of maximum aboveground biomass ( $t\ ha^{-1}$ ).

## Suelo

Dentro de la parcela de muestreo de 1000 m<sup>2</sup> se obtuvieron muestras de suelo con una barrena de muestras inalteradas a una profundidad de 0-30 cm. Se obtuvo el porcentaje de C orgánico mediante combustión seca con un analizador de C total (TOC-Shimadzu). El COS en t C ha<sup>-1</sup> se determinó con el cálculo de la densidad aparente del suelo según la ecuación (1) y el porcentaje de C orgánico.

$$DAP = \frac{Pss}{VTs} \dots\dots\dots (1)$$

Donde DAP= Densidad aparente del suelo (g<sup>-1</sup> cm<sup>3</sup>), Pss = Peso del suelo seco (g) y VTs = Volumen total del suelo.

La simulación de las existencias de C en la biomasa y suelo bajo el escenario base se describe a continuación.

### 5.4.3. Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el Escenario base

#### Biomasa aérea

La proyección de las reservas de C a 50 años bajo el escenario base se realizó con el modelo CO2Fix v3.1, (Maser et al., 2003; Schelhaas et al., 2004) que tiene como base el uso de cohortes que se manejan como entidades individuales dentro del modelo (Maser et al., 2003). Los parámetros de entrada se obtuvieron del inventario de los reservorios de CBA y de revisión de literatura (Cuadro 3) para correr el modelo en las cohortes de los diseños agroforestales que se clasificaron a partir de las características de composición estructural arbórea y arbustiva que reportaron Ruiz-García et al. (2020) en la Sociedad Catuaí Amarillo.

Las reservas de C en la biomasa aérea de todo el sistema (Cbt) se puede expresar como la suma de la biomasa de cada cohorte de acuerdo con la ecuación (2) (Maser et al., 2003; Schelhaas et al., 2004)

$$Cb_t = \sum Cb_{it} \dots\dots\dots (2)$$

Donde  $C_{bit}$  es el C almacenado en la biomasa viva de la cohorte “i” en el momento “t” ( $t \text{ C ha}^{-1}$ ). Las existencias de  $C_{bit}$  a lo largo del tiempo se determina mediante la Ecuación 3 (Schelhaas et al., 2004):

$$C_{bit+1} = \sum C_{bit} + Kc [Gb_{it} - Ms_{it} - T_{it} - H_{it}] \quad (Mg \text{ C ha}^{-1}) \dots\dots\dots(3)$$

Donde  $Kc$  = constante para convertir biomasa en contenido de C ( $t \text{ C por t de peso seco de biomasa}$ ),  $G_{bit}$  = crecimiento de biomasa,  $T_{it}$  = rotación de ramas, follaje y raíces,  $M_{sit}$  = mortalidad de los árboles por senescencia,  $H_{it}$  = cosecha.

## Suelo

Las reservas de COS en el escenario base se proyectaron a 50 años con CO2Fix que maneja el modelo dinámico de carbono del suelo YASSO (Schelhaas et al., 2004). El modelo describe la descomposición y la dinámica de C en suelos bien drenados (Schelhaas et al., 2004). Consta de tres compartimentos que describen la descomposición física de la materia orgánica (tallo, ramas + raíces gruesas y follaje + hojarasca) y cinco compartimentos que describen la descomposición microbiana y procesos de humificación en el suelo (compuestos solubles, holocelulosas, lignina y dos tipos diferentes de humus) (Masera et al., 2003). Para aplicar el modelo se determinaron las reservas de C ( $t \text{ C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) del follaje, raíces, ramas y tallos en las cohortes de cada diseño agroforestal, bajo el supuesto de que contribuyen al año con el 5 % de sus reservas de C al suelo (Negash & Kanninen, 2015). Se tomó el valor por defecto que arrojó el modelo sobre la descomposición microbiana y humificación del suelo.

Los parámetros generales que se utilizaron fueron la suma de las temperaturas medias mensuales por encima de  $0^\circ\text{C}$ , precipitación (mm) y evapotranspiración de referencia ( $ET_0 \text{ mm}$ ) del periodo de crecimiento (Schelhaas et al., 2004). Los datos de temperatura y precipitación se obtuvieron de observaciones diarias durante un periodo de 30 años (periodo comprendido entre los años 1978-2008) determinadas en la estación meteorológica Coscomatepec por la Comisión Nacional del Agua-Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA-SMN, 2020). La

evapotranspiración de referencia del periodo de crecimiento se calculó con la Ecuación (4) de FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \dots\dots\dots(4)$$

Donde  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo del calor en el suelo,  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire,  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante,  $c_p$  es el calor específico del aire,  $\Delta$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación,  $\gamma$  es la constante psicrométrica, y  $r_s$  y  $r_a$  son la resistencia superficial (total) y aerodinámica.

En el siguiente apartado se describe como se obtuvo la simulación de CBA y COS bajo escenarios de cambio climático.

#### 5.4.4. Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático

Los parámetros generales que se cambiaron dentro del modelo CO2Fix para hacer la simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático fueron: Temperatura (°C), precipitación (mm) y  $ET_0$  (mm) del periodo de crecimiento. Se utilizaron los datos de temperatura media mensual (°C) y precipitación (mm) de cuatro modelos generales de circulación atmosférica que fueron generados por el Coupled Model Intercomparison Project Phase propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, disponible en la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, 2020).

Los modelos que se utilizaron en cada escenario fueron: **Escenario 1.** MPI\_ESM-LR (Max-Planck-Institut für Meteorologie); **Escenario 2.** HADGEM2-ES (Hadley Centre Global Environment Model); **Escenario 3.** GFDL\_CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory); y **Escenario 4.** CNRM\_CM5 (Centre National de Recherches Météorologiques). Cada modelo tuvo una resolución 30" x 30", y Forzamiento radiativo (RCP) de 8,5 W m<sup>-2</sup> (emisiones altas), en horizontes de

tiempo de futuro cercano (2015-2039), futuro medio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099).

La  $ET_0$  bajo escenarios de cambio climático se calculó con la sustitución de los datos de temperatura media mensual ( $^{\circ}C$ ) y precipitación (mm), que se obtuvieron de los modelos generales de circulación atmosférica. No se realizaron cambios en los parámetros de entrada para modelar la biomasa aérea ni en las reservas de carbono en el suelo ( $t\ C\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ ) de follaje, raíces, ramas y tallos en las cohortes de cada diseño agroforestal.

Después de obtener los parámetros de precipitación, temperatura y  $ET_0$  del periodo de crecimiento bajo escenarios de cambio climático para cada horizonte de tiempo, se determinó el incremento o disminución de estos parámetros con respecto al escenario base.

#### **5.4.5. Análisis de datos**

La variación de las reservas de C se determinó mediante el cálculo de la desviación media estándar, tanto en la línea base, como en la simulación en un periodo de 50 años en cada diseño agroforestal. Para probar las diferencias entre las existencias de carbono en los diferentes diseños agroforestales y escenarios bajo la condición actual y con cambio climático, se realizó un ANOVA no paramétrico de dos vías (prueba de Kruskal-Wallis) (Negash & Kanninen, 2015). Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software InfoStat/L v.2020.

#### **5.5. Resultados**

Todos los resultados obtenidos en esta investigación, tanto en la línea base como en los diferentes escenarios de cambio climático se obtuvieron en función de la composición y selección de las especies, la densidad, la edad de rotación y la intensidad del manejo en cada diseño agroforestal evaluado, que fueron parámetros de entrada para correr el modelo CO2Fix, y que se describe en el apartado de materiales y métodos.

### 5.5.1. Línea base de C en la biomasa aérea y del suelo

A continuación, se describen los resultados del contenido de CBA y SOC en la línea base.

#### Biomasa aérea

La cohorte de árboles de sombra fijó el 85 % de la biomasa aérea (CBA) total en D1 (densidad= 374 pl ha<sup>-1</sup>), 79 % en D2 (densidad= 200 pl ha<sup>-1</sup>) y 68 % en D3 (densidad= 274 pl ha<sup>-1</sup>). La cohorte de café proporcionó el 15 % (densidad= 2600 pl ha<sup>-1</sup>), 17 % (densidad= 2800 pl ha<sup>-1</sup>) y 28 % (densidad= 3100 pl ha<sup>-1</sup>) del CBA total en D1, D2 y D3 respectivamente. La cohorte de plátano tan sólo fijó el 3,9 % en D2 (densidad= 1260 pl ha<sup>-1</sup>) y 3,7 % en D3 (densidad= 1670 pl ha<sup>-1</sup>). El primer diseño agroforestal (D1) presentó el mayor contenido de C orgánico total inicial en la biomasa aérea (32,38 t C ha<sup>-1</sup>). Mientras que D2 obtuvo el menor contenido (25,21 t ha<sup>-1</sup>) (Cuadro 5.4,  $P<0,05$ ).

**Cuadro 5.4.** Medias de la Biomasa máxima + SD (t ha<sup>-1</sup>) y C orgánico total en la biomasa aérea + SD (t C ha<sup>-1</sup>), así como de follaje, raíces, ramas y tallos en las principales cohortes identificadas en los diseños agroforestales de café (*C. arabica* L.) de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S., Chocamán, Veracruz, México. 2021.

| Diseño Agroforestal | Cohorte           | Biomasa máxima Total (t ha <sup>-1</sup> ) | t C ha <sup>-1</sup> |             |             |             |                                  |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|
|                     |                   |                                            | Tallo                | Follaje     | Ramas       | Raíz        | Total                            |
| D1*                 |                   | <b>67,27 ± 38,03<sup>a</sup></b>           |                      |             |             |             | <b>32,38 ± 18,22<sup>a</sup></b> |
|                     | Árboles de sombra | 57,15 ± 41,07                              | 14,13 ± 10,11        | 2,37 ± 1,92 | 8,07 ± 5,72 | 4,23 ± 3,11 | 27,43 ± 19,71                    |
|                     | Café              | 10,11 ± 6,10                               | 2,59 ± 1,56          | 0,22 ± 0,13 | 1,82 ± 1,09 | 0,78 ± 0,47 | 4,95 ± 2,98                      |
|                     |                   | <b>52,38 ± 23,73<sup>a</sup></b>           |                      |             |             |             | <b>25,21 ± 11,46<sup>a</sup></b> |
| D2**                | Árboles de sombra | 41,33 ± 22,45                              | 11,70 ± 7,99         | 1,84 ± 1,04 | 6,50 ± 3,50 | 3,15 ± 1,74 | 19,83 ± 10,77                    |
|                     | Café              | 8,95 ± 15,38                               | 2,29 ± 3,95          | 0,19 ± 0,34 | 1,61 ± 2,76 | 0,69 ± 1,18 | 4,38 ± 7,54                      |
|                     | Plátano           | 2,10 ± 1,95                                | 0,51 ± 0,47          | 0,21 ± 0,21 | ----        | 0,05 ± 0,05 | 0,99 ± 0,91                      |
|                     |                   |                                            |                      |             |             |             |                                  |

|       |                   | <b>54,26 ±<br/>18,62<sup>a</sup></b> |              |             |             |             | <b>26,17 ±<br/>8,99<sup>a</sup></b> |
|-------|-------------------|--------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|
| D3*** | Árboles de sombra | 37,14 ± 11,92                        | 10,30 ± 3,79 | 1,58 ± 0,70 | 5,77 ± 2,58 | 2,77 ± 0,88 | 17,82 ± 5,72                        |
|       | Café              | 15,02 ± 8,51                         | 3,85 ± 2,18  | 0,33 ± 0,18 | 2,70 ± 1,53 | 1,16 ± 0,65 | 7,36 ± 4,17                         |
|       | Plátano           | 2,09 ± 1,68                          | 0,49 ± 0,39  | 0,19 ± 0,15 | ----        | 0,05 ± 0,04 | 0,98 ± 0,79                         |

\*Árboles de sombra-café en laderas; \*\* Árboles de sombra-café-plátano en laderas; \*\*\*Árboles de sombra-café-plátano en el valle. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales ( $P < 0,05$ ). SD= Desviación Estándar.

## Suelo

La media del contenido inicial de COS en la línea base en D1 fue de 80,21 t C ha<sup>-1</sup> con una DAP de 0,94 g<sup>-1</sup> cm<sup>3</sup>. En D2 el C fue de 65,22 t C ha<sup>-1</sup> y en D3 fue de 71,13 t C ha<sup>-1</sup> con una DAP de 0,99 y 1,00 g<sup>-1</sup> cm<sup>3</sup> respectivamente.

El C orgánico total, que considera tanto al CBA como al COS fue de 124,59 t C ha<sup>-1</sup>, 107,43 t C ha<sup>-1</sup> y 102,32 t C ha<sup>-1</sup> para D1, D2 y D3 respectivamente. El COS aportó entre el 74 % y 76 % del C total de los diseños evaluados. Por lo que representa el mayor reservorio de C en los diseños agroforestales de café evaluados. No existieron diferencias significativas en el COS y C total entre los tres diseños agroforestales evaluados ( $P > 0,05$ ).

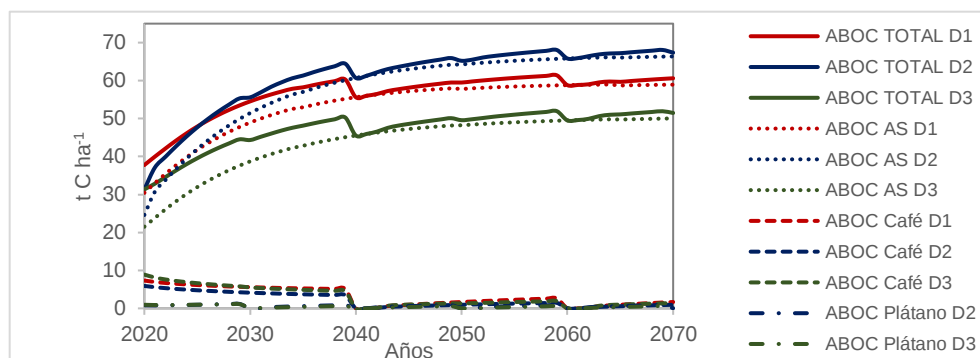
### 5.5.2. Simulación de las existencias de C en la biomasa aérea y suelo bajo el escenario base

A continuación, se describen los resultados que se obtuvieron de la simulación de C mediante el uso del modelo CO2Fix en la CBA y SOC bajo el escenario base.

#### Biomasa aérea

Los resultados que arrojó el modelo CO2Fix sobre la biomasa aérea (CBA) total bajo el escenario base a una proyección de 50 años mostraron que D2 tendrá un mayor contenido de C (67,35 t ha<sup>-1</sup>) en comparación con D1 (60,61 t C ha<sup>-1</sup>) y D3 (51,47 t C ha<sup>-1</sup>) (Figura 5.2). El secuestro neto de C fue similar en D1 y D3 (0,62 y 0,61 t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, respectivamente) y fue moderadamente más alto en D2 (0,89

t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>). De acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis existen diferencias no significativas en la CBA entre los tres diseños agroforestales evaluados ( $P>0,05$ ).

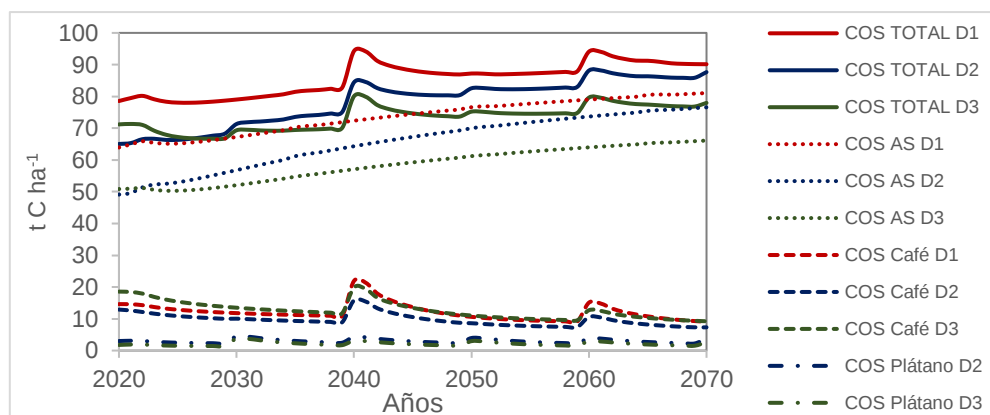


**Figura 5.2.** Evolución en un periodo de cincuenta años de las existencias de C en la biomasa aérea (CBA) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base de los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuai Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. D1= árboles de sombra-café (*C. arabica* L.) en laderas; D2 = árboles de sombra-café-plátano en laderas; D3 = árboles de sombra-café-plátano en el valle; AS= Árboles de sombra. 2021.

La cohorte de árboles usados para sombra aportó el 97,22 % del total de CBA en D1, 98,53 % en D2 y 97,19 % en D3. La cohorte de café contribuyó con el 2,70 % en D1 y D3 y 1,40 % en D2. La cohorte de plátano en este caso sólo ingresó el 0,05 % del total de CBA en D2 y D3. La disminución del carbono total en la biomasa aérea en D1 cada veinte años, se debe a que la cohorte de café se renueva en ese periodo de tiempo. Lo mismo sucede en D2 y D3, en donde también se suma la renovación de la cohorte de plátano cada diez años.

## Suelo

Las existencias medias de COS simuladas con el modelo CO2Fix a los 50 años fueron mayores en D1 (90,14 t C ha<sup>-1</sup>) con respecto a D2 y D3 (87,66 y 77,97 t C ha<sup>-1</sup> respectivamente) (Figura 5.3). El secuestro neto de COS fue de 0,64, 0,61 y 0,53 t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> en D1, D2 y D3, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas de COS entre los tres diseños agroforestales evaluados ( $P=0,05$ ).



**Figura 5.3.** Evolución en un periodo de 50 años de las existencias de carbono orgánico del suelo (COS) simuladas con el modelo CO2Fix en el escenario base en los tres diseños agroforestales de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. D1= árboles de sombra-café (*C. arabica* L.) en laderas; D2 = árboles de sombra-café-plátano en laderas; D3 = árboles de sombra-café-plátano en el valle; AS= Árboles de sombra. 2021.

La cohorte de árboles de sombra fue quien contribuyó con el mayor contenido de carbono en el suelo en los tres diseños evaluados (89,92%, 87,35% y 84,78% t C ha<sup>-1</sup> en D1, D2 y D3, respectivamente).

Las existencias de C total simuladas en el periodo de 50 años mediante el modelo CO2Fix fueron de 150,75 t C ha<sup>-1</sup> en D1, 155,01 t C ha<sup>-1</sup> para D2 y 129,44 t C ha<sup>-1</sup> en D3. No se encontraron diferencias significativas de C total entre los tres diseños agroforestales evaluados ( $P > 0,05$ ). La biomasa aérea total contribuyó con el 40,20 % en D1, 43,45 % en D2 y 39,46 % en D3. El COS almacenó 49,79, 56,54 y 60,23 % en D1, D2 y D3, respectivamente.

### 5.5.3. Simulación del C en la biomasa aérea y suelo bajo escenarios de cambio climático

Los cambios que se realizaron en los parámetros generales para simular las existencias de C bajo escenarios de cambio climático en cada horizonte de tiempo se muestran en el Cuadro 5.5. En todos los escenarios y horizontes de tiempo se observó un aumento de la temperatura media con un incremento de hasta 5,5 °C en el Escenario 2 (modelo HADGEM 2-ES) bajo el horizonte lejano (2075-2099 años). Se estima que la precipitación tendrá una disminución en todos los escenarios y horizontes de tiempo de hasta 387 mm en el Escenario 3

(modelo GFDL\_CM3) en el horizonte lejano. La  $ET_0$  incrementará en todos los escenarios y horizontes de tiempo, con un aumento de hasta 164,20 mm en los meses del periodo de crecimiento en el horizonte lejano del Escenario 2 (Cuadro 5.5).

**Cuadro 5.5.** Cambios realizados en los parámetros generales de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitación (mm) y  $ET_0$  del periodo de crecimiento del escenario base para simular las existencias de C bajo escenarios de cambio climático en cada horizonte de tiempo de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México. 2021.

| Horizontes de tiempo | Parámetros generales           | Escenarios |          |          |          |          |
|----------------------|--------------------------------|------------|----------|----------|----------|----------|
|                      |                                | BASE       | 1*       | 2**      | 3***     | 4****    |
|                      | T media ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 18,35      |          |          |          |          |
| Cercano*             |                                |            | ▲ 1,38   | ▲ 1,55   | ▲ 1,82   | ▲ 0,96   |
| Mediano**            |                                |            | ▲ 2,89   | ▲ 3,22   | ▲ 3,55   | ▲ 2,22   |
| Lejano***            |                                |            | ▲ 4,84   | ▲ 5,50   | ▲ 5,31   | ▲ 3,67   |
|                      | Precipitación (mm)             | 2 140      |          |          |          |          |
| Cercano              |                                |            | ▼ 150    | ▼ 123    | ▼ 162    | ▼ 94     |
| Mediano              |                                |            | ▼ 181    | ▼ 155    | ▼ 214    | ▼ 211    |
| Lejano               |                                |            | ▼ 195    | ▼ 189    | ▼ 387    | ▼ 238    |
|                      | $ET_0$ (mm)                    | 1 189      |          |          |          |          |
| Cercano              |                                |            | ▲ 28,53  | ▲ 34,50  | ▲ 44,00  | ▲ 14,51  |
| Mediano              |                                |            | ▲ 73,87  | ▲ 86,22  | ▲ 103,62 | ▲ 56,70  |
| Lejano               |                                |            | ▲ 142,73 | ▲ 164,20 | ▲ 161,19 | ▲ 104,64 |

▲ Incremento en el parámetro base; ▼ Disminución en el parámetro base. \* Futuro cercano, rango de años 2015-2039; \*\* futuro medio, rango de años 2045-2069; futuro lejano, rango de años 2075-2099. \*Modelo **MPI\_ESM-LR**; \*\* modelo **HADGEM 2-ES**; \*\*\* modelo **GFDL\_CM3**; \*\*\*\* modelo **CNRM\_CM5**.

No hubo diferencias significativas ( $P>0,05$ ) en el contenido total de C en la línea base con respecto a los diferentes Escenarios de cambio climático evaluados. A pesar de ello, se observaron variaciones en las reservas de C en los tres diseños bajo escenarios de cambio climático. Las existencias de carbono en D1 presentaron de manera general una disminución en la biomasa aérea, suelo y C total simuladas mediante el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años bajo los diferentes escenarios y en los tres horizontes de tiempo (Cuadro 5.6,  $P<0,05$ ). En el horizonte cercano la disminución del C total con respecto al escenario base fue de  $8,75 \text{ t C ha}^{-1}$  en el Escenario 4 (modelo CNRM); en los demás escenarios, el C total fue similar al escenario base. En el horizonte medio el C total decreció  $1,30$ ,  $1,26$  y  $7,93 \text{ t C ha}^{-1}$  en el Escenario 1 (modelo MPI), Escenario 2 y Escenario

4, respectivamente, mientras que en el horizonte lejano la disminución en los mismos escenarios fue de 1,75, a 2,28 t C ha<sup>-1</sup>, respectivamente, pero incrementó 1,61 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 3 (Cuadro 5.6).

**Cuadro 5.6.** Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha<sup>-1</sup>) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D1= árboles de sombra-café (*C. arabica* L.) en el valle evaluado en la Sociedad Catuái Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

| Horizontes de tiempo                    | Reservorio    | Base                        | Carbono Total (t C ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             |                             |
|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                         |               |                             | Escenarios                            |                             |                             |                             |
|                                         |               |                             | 1*                                    | 2**                         | 3***                        | 4****                       |
| D1 (árboles de sombra-café en el valle) |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Cercano<br>(2015-2039)                  | Biomasa aérea | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10                         | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10               | 56,76 ± 32,62               |
|                                         | Suelo         | 90,14 ± 34,72               | 89,74 ± 34,62                         | 89,62 ± 34,59               | 90,00 ± 34,69               | 85,25 ± 35,51               |
|                                         | Total         | 150,75 ± 66,04 <sup>a</sup> | 150,35 ± 65,95 <sup>a</sup>           | 150,23 ± 65,92 <sup>a</sup> | 150,61 ± 66,90 <sup>a</sup> | 142,01 ± 67,29 <sup>a</sup> |
|                                         |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Mediano<br>(2045-2069)                  | Biomasa aérea | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10                         | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10               | 56,76 ± 32,62               |
|                                         | Suelo         | 90,14 ± 34,72               | 88,85 ± 34,39                         | 89,59 ± 34,58               | 88,88 ± 34,37               | 86,05 ± 35,72               |
|                                         | Total         | 150,75 ± 66,04 <sup>a</sup> | 149,46 ± 64,59 <sup>a</sup>           | 150,20 ± 65,92 <sup>a</sup> | 149,49 ± 65,71 <sup>a</sup> | 142,82 ± 67,49 <sup>a</sup> |
|                                         |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Lejano<br>(2075-2099)                   | Biomasa aérea | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10                         | 60,61 ± 32,10               | 60,61 ± 32,10               | 54,97 ± 33,11               |
|                                         | Suelo         | 90,14 ± 34,72               | 87,98 ± 34,07                         | 91,72 ± 35,12               | 88,43 ± 34,28               | 93,49 ± 40,67               |
|                                         | Total         | 150,75 ± 66,04 <sup>a</sup> | 148,59 ± 65,43 <sup>a</sup>           | 152,36 ± 66,42 <sup>a</sup> | 149,0 ± 65,6 <sup>a</sup>   | 148,47 ± 68,79 <sup>a</sup> |
|                                         |               |                             |                                       |                             |                             |                             |

\*Modelo **MPI\_ESM-LR**; \*\*modelo **HADGEM 2-ES**; \*\*\*modelo **GFDL\_CM3**; \*\*\*\*modelo **CNRM\_CM5**. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre Escenarios de cambio climático ( $P < 0,05$ ). SD= Desviación Estándar.

En el caso de D2 se observó un incremento del C total en el horizonte cercano de 7,06, 1,11 y 8,44 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 1, 2 y 4, pero disminuyó 6,20 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 3. En el horizonte medio el C total decreció 0,95 y 4,61 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 2 y 3. Sin embargo, aumentó 8,17 y 4,14 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 2 y 4. En cuanto al horizonte lejano, se observó una reducción de 1,82 y 1,34 t C ha<sup>-1</sup> en los Escenarios 1 y 2, pero aumentó 2,71 y 9,98 t C ha<sup>-1</sup> en los Escenarios 3 y 4 (Cuadro 5.7).

**Cuadro 5.7.** Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha<sup>-1</sup>) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D2= árboles de sombra-café (*C. arabica* L.) plátano en laderas evaluado en la Sociedad Catuá Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes Escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

| Horizontes de tiempo                                  | Reservorio    | Base                        | Carbono Total (t C ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             |                             |
|-------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                       |               |                             | Escenarios                            |                             |                             |                             |
|                                                       |               |                             | 1*                                    | 2**                         | 3***                        | 4****                       |
| <b>D2 (árboles de sombra-café-plátano en laderas)</b> |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Cercano<br>(2015-2039)                                | Biomasa aérea | 67,35 ± 27,05               | 68,35 ± 30,01                         | 62,21 ± 22,94               | 67,35 ± 27,05               | 72,53 ± 22,84               |
|                                                       | Suelo         | 87,66 ± 23,64               | 93,71 ± 48,27                         | 86,59 ± 24,86               | 88,76 ± 24,22               | 90,92 ± 22,81               |
|                                                       | Total         | 155,01 ± 45,62 <sup>a</sup> | 162,07 ± 73,35 <sup>a</sup>           | 148,81 ± 44,31 <sup>a</sup> | 156,12 ± 63,74 <sup>a</sup> | 163,45 ± 40,96 <sup>a</sup> |
|                                                       |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Mediano<br>(2045-2069)                                | Biomasa aérea | 67,35 ± 27,05               | 68,35 ± 30,01                         | 62,04 ± 27,08               | 72,46 ± 22,91               | 67,39 ± 22,84               |
|                                                       | Suelo         | 87,66 ± 23,64               | 85,71 ± 26,47                         | 88,36 ± 24,13               | 90,72 ± 22,70               | 91,76 ± 23,01               |
|                                                       | Total         | 155,01 ± 45,62 <sup>a</sup> | 154,06 ± 53,27 <sup>a</sup>           | 150,40 ± 47,19 <sup>a</sup> | 163,18 ± 41,04 <sup>a</sup> | 159,15 ± 41,11 <sup>a</sup> |
|                                                       |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Lejano<br>(2075-2099)                                 | Biomasa aérea | 67,35 ± 27,05               | 68,35 ± 30,01                         | 69,01 ± 28,14               | 68,35 ± 30,01               | 75,03 ± 23,05               |
|                                                       | Suelo         | 87,66 ± 23,64               | 84,84 ± 26,25                         | 88,71 ± 25,45               | 85,32 ± 26,37               | 89,96 ± 24,06               |
|                                                       | Total         | 155,01 ± 45,62 <sup>a</sup> | 153,19 ± 53,07 <sup>a</sup>           | 157,72 ± 50,51 <sup>a</sup> | 153,67 ± 53,18 <sup>a</sup> | 164,99 ± 43,76 <sup>a</sup> |
|                                                       |               |                             |                                       |                             |                             |                             |

\*Modelo MPI\_ESM-LR; \*\*modelo HADGEM 2-ES; \*\*\*modelo GFDL\_CM3; \*\*\*\*modelo CNRM\_CM5. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre Escenarios de cambio climático ( $P < 0,05$ ). SD= Desviación Estándar.

Para D3 las existencias totales en el horizonte cercano disminuyeron 3,11 y 1,23 t C ha<sup>-1</sup> en el Escenario 2 y 4 y se mantuvieron similares al Escenario base en 1 y 3. En el horizonte medio la disminución se presentó en 1 y 2 (1,19 y 2,87 t C ha<sup>-1</sup>) pero se mantuvo constante en el Escenario 4 y 3. En el horizonte lejano se observó una reducción del C total de 2,03, 1,57 y 0,77 t C ha<sup>-1</sup> en 1, 2 y 4, respectivamente, mientras que en 4 se presentó un incremento de 1,48 t C ha<sup>-1</sup> (Cuadro 5.8).

**Cuadro 5.8.** Medias de las existencias de carbono en la biomasa aérea, suelo y C total + SD (t C ha<sup>-1</sup>) simuladas con el modelo CO2Fix en un periodo de 50 años en D3= árboles de sombra-café (*C. arabica* L.) plátano en el valle evaluado en la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S, Chocamán, Veracruz, México, bajo los diferentes escenarios en los tres horizontes de tiempo (futuro cercano, medio y lejano). 2021.

| Horizontes de tiempo                                   | Reservorio    | Base                        | Carbono Total (t C ha <sup>-1</sup> ) |                             |                             |                             |
|--------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                                                        |               |                             | Escenarios                            |                             |                             |                             |
|                                                        |               |                             | 1*                                    | 2**                         | 3***                        | 4****                       |
| <b>D3 (árboles de sombra-café-plátano en el valle)</b> |               |                             |                                       |                             |                             |                             |
| Cercano<br>(2015-2039)                                 | Biomasa aérea | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64                         | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64               |
|                                                        | Suelo         | 77,97 ± 29,55               | 77,60 ± 29,45                         | 77,49 ± 29,41               | 74,86 ± 32,24               | 76,74 ± 29,20               |
|                                                        | Total         | 129,44 ± 49,21 <sup>a</sup> | 129,07 ± 49,10 <sup>a</sup>           | 128,96 ± 49,07 <sup>a</sup> | 126,33 ± 52,44 <sup>a</sup> | 128,21 ± 48,87 <sup>a</sup> |
| Mediano<br>(2045-2069)                                 | Biomasa aérea | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64                         | 51,47 ± 20,64               | 51,41 ± 22,61               | 51,47 ± 20,64               |
|                                                        | Suelo         | 77,97 ± 29,55               | 76,78 ± 29,21                         | 77,46 ± 29,40               | 75,17 ± 31,66               | 77,50 ± 29,42               |
|                                                        | Total         | 129,44 ± 49,21 <sup>a</sup> | 128,25 ± 48,87 <sup>a</sup>           | 128,93 ± 49,06 <sup>a</sup> | 126,57 ± 53,32 <sup>a</sup> | 128,97 ± 49,08 <sup>a</sup> |
| Lejano<br>(2075-2099)                                  | Biomasa aérea | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64                         | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64               | 51,47 ± 20,64               |
|                                                        | Suelo         | 77,97 ± 29,55               | 75,94 ± 28,97                         | 79,45 ± 29,97               | 76,40 ± 29,10               | 77,20 ± 29,33               |
|                                                        | Total         | 129,44 ± 49,21 <sup>a</sup> | 127,41 ± 48,64 <sup>a</sup>           | 130,92 ± 49,61 <sup>a</sup> | 127,87 ± 48,77 <sup>a</sup> | 128,67 ± 48,99 <sup>a</sup> |

\*Modelo MPI\_ESM-LR; \*\*modelo HADGEM 2-ES; \*\*\*modelo GFDL\_CM3; \*\*\*\*modelo CNRM\_CM5. Medias seguidas de letras iguales indican diferencias no significativas entre diseños agroforestales y entre Escenarios de cambio climático ( $P < 0,05$ ). SD= Desviación Estándar.

## 5.6. Discusión

Las existencias de C total se mantuvieron a lo largo del tiempo en los tres diseños agroforestales evaluados bajo las condiciones climáticas que se proyectaron en los diferentes escenarios, gracias a la permanencia de la cohorte de árboles dentro de los diseños agroforestales con café. Esta observación fue similar a lo que encontraron Ajit et al. (2017) en sistemas agroforestales de la India. El contenido de CBA y COS en cada diseño agroforestal evaluado estuvo en función del manejo específico de los diseños agroforestales y de la selección de las especies arbóreas y arbustivas que se usaron como sombra (Rahn et al., 2018). En la línea base se encontró que el mayor contenido de CBA se presentó en D1, esto se pudo deber a la mayor densidad de árboles (374 pl ha<sup>-1</sup>) donde

predominaron las especies del género *Inga* sp. (Cuadro 5.2). A pesar de que los árboles del género *Inga* sp. tuvieron baja capacidad para almacenar C (Ortiz-Ceballos et al., 2020), la alta densidad de siembra y rápido crecimiento, así como el aporte permanente de hojarasca, dieron como resultado un incremento significativo de CBA en los cafetales (Nunes et al., 2019). Los resultados de CBA en los diseños agroforestales donde predominaron las especies del género *Inga* sp. (D1 y D2) fueron inferiores a los datos reportados por Ortiz-Ceballos et al. (2020) quienes registraron 55,12 t C ha<sup>-1</sup> en sistemas agroforestales con café en la región Xalapa-Coatepec, Veracruz, México. Esto se pudo deber a la densidad de árboles e intensidad de manejo que se les dio a los diseños agroforestales evaluados (Salgado-Mora et al., 2018).

Los resultados de COS en la línea base fueron superiores a los que obtuvieron Tumwebaze & Byakagaba (2016) en sistemas agroforestales de café (54,01 t C ha<sup>-1</sup>) en un clima semicálido húmedo de Uganda. Pero fueron inferiores con los datos que reportaron Zaro et al. (2020) quienes encontraron que los suelos de algunos sistemas cafetaleros de Brasil almacenaron alrededor de 195,60 t C ha<sup>-1</sup>. También fueron inferiores a los resultados generados por Chatterjee et al. (2020) en sistemas cafetaleros bajo sombra de Costa Rica que almacenaron hasta 146,6 t C ha<sup>-1</sup>. El COS que se encontró en este estudio difirió con los resultados obtenidos por Chatterjee et al. (2020), Tumwebaze & Byakagaba (2016), y Zaro et al. (2020) debido a que las tipologías de los suelos fueron diferentes en cada región, además de que la influencia del clima y el manejo agronómico del sistema fueron determinantes en las reservas de COS (Jansson & Hofmocke, 2020).

Los resultados de la simulación de las reservas de CBA en el escenario base a una proyección de 50 años que se generó con el modelo CO2Fix fueron similares a los resultados obtenidos por Ajit et al. (2017), quienes reportaron 58,96 t C ha<sup>-1</sup> en sistemas agroforestales de café en la India. El secuestro neto de C que se determinó en este estudio (0,89-0,62 t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>) fue inferior a los que reportaron Negash & Kanninen (2015) (1,64 y 1,03 t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>), en una simulación a 50 años realizada en sistemas agroforestales con café en Etiopía.

El COS simulado en los tres diseños agroforestales fue similar al que reportó Ehrenbergerová et al. (2016) ( $77,55 \text{ t C ha}^{-1}$ ) en sistemas agroforestales con café de la Amazonía Peruana. El incremento del COS en los tres diseños agroforestales a los 20 años se debió a la rotación del cultivo de café, y a la rotación de la cohorte de plátano a los 10 años en D2 y D3. El suelo, tanto en la línea base como en la simulación a 50 años, representó el mayor reservorio de C en los diseños agroforestales de café evaluados, tal como se registró en diversas investigaciones (Chatterjee et al., 2020; Ehrenbergerová et al., 2016; Solis et al., 2020).

Los resultados del C orgánico total en la línea base que se determinó en esta investigación fueron inferiores a los que reportaron Betemariyan et al. (2020) ( $194,96 \text{ t C ha}^{-1}$ ) en sistemas agroforestales con café en Etiopía. Pero fueron superiores a los que obtuvieron Tschora & Cherubini (2020) ( $93,70 \text{ t C ha}^{-1}$ ) en sistemas agroforestales con café de África. Las diferencias entre los resultados encontrados en esta investigación en comparación con los que reportaron estos estudios se pudieron deber a que los niveles de C orgánico total que almacenó cada diseño agroforestal estuvieron en función de la acción conjunta de las especies arbóreas y arbustivas, así como de los factores fisiográficos, edáficos, climáticos y de manejo (Nadège et al., 2019).

Los resultados del C total simulados con el modelo CO2Fix en el periodo de 50 años fueron superiores a los que simularon Hailu et al. (2021) ( $121,10 \text{ t C ha}^{-1}$ ) en un periodo de 63 años en sistemas agroforestales con café en Etiopía. Pero fueron inferiores a los que simularon Negash & Kanninen (2015) ( $209\text{-}301 \text{ t C ha}^{-1}$ ) en un periodo de tiempo de 50 años en sistemas agroforestales con café de Etiopía. Las variaciones entre el C total proyectado a 50 años en este estudio comparado con los resultados obtenidos por Hailu et al., (2021) y Negash & Kanninen (2015) se pudo deber a que la cantidad de C total almacenado a través del tiempo dependió de la densidad de árboles  $\text{ha}^{-1}$ , la composición y selección de las especies, la edad de rotación, así como de un suministro continuo de materia orgánica al suelo y la condición fisiográfica del sitio (Salgado-Mora et al., 2018). Por lo tanto, el diseño y manejo de los sistemas agroforestales con café

fueron fundamentales en las reservas de C que el sistema almacenaría en el futuro (Chatterjee et al., 2020).

La variación de las reservas de C total que se determinó en esta investigación bajo escenarios de cambio climático se pudo deber al incremento de la temperatura media anual (°C) y de  $ET_0$  (mm) en los meses del periodo de crecimiento, así como a la disminución en la precipitación anual (mm) (Cuadro 5.5). De acuerdo con Chen et al. (2020) el aumento de las temperaturas es responsable de estimular la pérdida neta de C principalmente del suelo debido a que se incrementa la actividad microbiana. Se ha reportado que la disminución de la precipitación prolongada en climas cálidos da como resultado pérdidas de C del ecosistema, debido a una menor producción de productividad primaria neta y actividad microbiana, lo que sugiere la posibilidad de pérdidas netas de C en el suelo (Jansson & Hofmocke, 2020). Esto podría explicar porque en D1 y D3 se observó de manera general una disminución en el contenido de C en todos los escenarios (Cuadro 5.6 y 5.8). La disminución de las reservas de C bajo escenarios de cambio climático en D1 y D3 coincidió con lo que determinaron Lozano-García et al. (2017), quienes reportaron pérdidas en las reservas de COS bajo escenarios de cambio climático y uso de la tierra en un encinar mediterráneo de España.

La tendencia al alza en las existencias de C total que se observaron en D2 en algunos escenarios (Cuadro 5.7), podría deberse a que el aumento de la temperatura ocasionó un mayor incremento de biomasa, debido a que se hace más eficiente la fotosíntesis de las plantas (Cox et al., 2013). Las variaciones en el tipo de especies arbóreas que se usaron para sombra del cafeto, así como su productividad, las cuales estuvieron vinculadas al cambio climático, fueron las que regularon las tasas a las que el C se fijó de la atmósfera a través de la fotosíntesis y se almacenó en el suelo a largo plazo (Jansson & Hofmocke, 2020).

Aunque esta investigación demostró la relevancia del uso de árboles de sombra dentro de los diseños agroforestales con café para mantener las reservas de C bajo distintos escenarios, es importante señalar que no se consideraron cambios

en la variable de manejo del sistema, además de que se tomaron los valores por default sobre la descomposición microbiana y humificación del suelo a la hora de correr el modelo CO2Fix para simular las reservas de C a una proyección de 50 años bajo la línea base y con escenarios de cambio climático. Esto podría generar incertidumbre en los resultados obtenidos. Por lo que, se necesitan nuevos trabajos de investigación que simulen los cambios en las existencias de C, mediante la manipulación de la variable de manejo del sistema agroforestal y se considere medir en campo la tasa de descomposición microbiana y humificación del suelo.

## **5.7. Conclusiones**

Fue posible simular a una proyección de cincuenta años, las reservas de carbono en la biomasa aérea y suelo en la línea base y bajo los diferentes escenarios de cambio climático mediante el uso del modelo CO2Fix, en sistemas agroforestales con café que pertenecen a la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S., ubicados en la comunidad de Chocamán, Veracruz, México.

Las reservas de C se mantuvieron a través del tiempo a causa de la permanencia de la cohorte de árboles, que fue la principal fuente de almacenaje del carbono en la biomasa aérea y suelo, tanto en la línea base como en los distintos escenarios evaluados. Sin embargo, se observaron variaciones en las reservas de C total en los tres diseños agroforestales estudiados en la línea base y bajo los diferentes escenarios, debido fundamentalmente a la densidad de árboles en cada diseño agroforestal, así como por el incremento de la temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) y de  $\text{ET}_0$  (mm) en los meses del periodo de crecimiento, y a la disminución en la precipitación anual (mm). Es fundamental mantener los árboles de usos múltiples dentro de los diseños agroforestales con café a través del tiempo, para evitar pérdidas en las reservas de C total en el futuro.

Se necesitan estudios que tengan un enfoque integrado que implementen las mejores prácticas de manejo en los sistemas agroforestales con café, además de que permitan mejorar los almacenes de C bajo escenarios de cambio climático y aumenten su resiliencia ante un clima cambiante.

## 5.8. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). A la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia y Suelos, así como al Programa de Doctorado en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sustentable. A los productores de la Sociedad Catuaí Amarillo S. de S.S. por su apoyo a lo largo de esta investigación.

## 5.9. Referencias

- Ajit, K., Dhyani, S. K., Handa, A., Newaj, R., Chavan, S. B., Alam, B., Prasad, R., Ram, A., Rizvi, R. H., Jain, A. K., Uma, R., Tripathi, D., Shakhela, R. R., Patel, A. G., Dalvi, V. V., Saxena, A. K., Parihar, A. K. S., Backiyavathy, M. R., Sudhagar, R. J., ... Gunasekaran, S. (2017). Estimating carbon sequestration potential of existing agroforestry systems in India. *Agroforestry Systems*, 91, 1101–1118. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9986-z>
- Alder, D., & Silva, J. N. M. (2000). An empirical cohort model form management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 130(1-3), 141-157. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00196-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00196-6)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. (Estudio FAO Riego y Drenaje No. 56). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Álvarez, A. G., Ibáñez, H. A., García, C. N. E., & Almendros, M. G. (2012). Carbon Storage and Stability of Soil Organic Matter in a Coffee Agroecosystem in Sierra Sur de Oaxaca, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15, 611-620. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/1561/804>
- Álvarez, S., & Rubio, A. (2016). Wood Use and Forest Management for Carbon Sequestration in Community Forestry in Sierra Juárez, Mexico. *Small-scale For*, 15, 357–374. <https://doi.org/10.1007/s11842-016-9325-2>
- Betemariyan, M., Negash, M., & Worku, A. (2020). Comparative analysis of carbon stocks in home garden and adjacent coffee based agroforestry systems in Ethiopia. *Small-Scale Forestry*, 19, 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11842-020-09439-4>
- Brígido, J. G., Nikolskii I., Terrazas, L., & Herrera, S. S. (2015). Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 101-116. [http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf\\_11](http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/issue/view/373/pdf_11)

- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2019). *Investigación interna. Comercio internacional del café, el caso de México*. Editorial Palacio Legislativo de San Lázaro. <https://bit.ly/3tTv4p6>
- Chatterjee, N., Nair, P. K. R., Nair, V. D., Bhattacharjee, A., Filho, E. M. V., Muschler, R. G., & Noponen, M. R. A. (2020). Do coffee agroforestry systems always improve soil carbon stocks deeper in the soil?—A case study from Turrialba, Costa Rica. *Forests*, 11, 49. <https://doi.org/10.3390/f11010049>
- Chen, J., Elsgaard, L., Groenigen, K.J., Olesen, J.E., Liang, Z., Jiang, Y., Laerke, P.E., Zhang, Y., Luo, Y., Hungate, B.A., Sinsabaugh, R.L., & Jorgensen, U. (2020). Soil carbon loss with warming: New evidence from carbon-degrading enzymes. *Global Change Biology*, 26, 1944-1952. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14986>
- Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. (2020, 25 de junio). *Base de datos del CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Cox, P. M., Pearson, D., Booth, B. B., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jones, C. D., & Luke, C.M. (2013). Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 494, 341–344. <https://doi.org/10.1038/nature11882>
- Ehrenbergerová, L., Cienciala, E., Kucěra, A., Guy, L., & Habrová, H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*, 90, 433-445. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-015-9865-z>
- García, A. E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptación a las condiciones de la República Mexicana (5ª Ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hailu, A. F., Soremessa T., & Dullo, B. W. (2021) Carbon sequestration and storage value of coffee forest in Southwestern Ethiopia. *Carbon Management*, 12(5), 531-548. <https://doi.org/10.1080/17583004.2021.1976>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2013). *Continuo nacional de unidades edafológicas Serie II. Conjunto de datos de perfiles de suelos Escala 1, 250 000 Serie II*. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 10-14). Cambridge University Press.
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18, 35–46. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>

- Kim, H., Kim, Y. H., Kim, R., & Park, H. (2015). Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN. *Forest Science and Technology*, 11, 212–222. <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.987325>
- Kuyah, S., Dietz J., Muthuri, C., Jamnadass, R., Mwangi, P., Coe, R., & Neufeldt, H. (2012). Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. aboveground biomass. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158, 216–24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.011>
- Lozano-García, B., Muñoz-Rojas, M., & Parras-Alcántara, L. (2017). Climate and land use changes effects on soil organic carbon stocks in a Mediterranean semi-natural area. *Science of the Total Environment*, 1(579), 1249–1259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.111>
- Masera, O. R., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., Pussinen, A., De Jong, B. H. J., & Mohren, G. M. J. (2003). Modeling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164 (2–3), 177–99. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00419-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00419-2)
- Masuhara, A., Valdés, E., Pérez J., Gutiérrez, D., Vázquez, J., Salcedo, P. E., Juárez, H. M., & Merino, G. A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66–93. <https://www.uea.edu.ec/revistas/index.php/revistaamazonica/article/view/148/201>
- Nadège, M. T., Louis, Z., Cédric, C. D., Louis-Paul K. B., Funwi, F. P., Ingrid, T. T., Clotex, T. V., Flore, N. Y. A., Bruno, T. M. R., & Mancho, N. J. (2019). Carbon storage potential of cacao agroforestry systems of different age and management intensity. *Climate and Development*, 11, 543–554. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1456895>
- Návar-Cháidez, J. J., González, N., & Graciano, J. (2016). Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques*, 11, 15–34. <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1121254>
- Negash, M., & Kanninen, M. (2015). Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203, 147–155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.004>
- Negash, M., Starr, M., & Kanninen M. (2013). Allometric Equations for Biomass Estimation of Enset (*Ensete Ventricosum*) Grown in Indigenous Agroforestry Systems in the Rift Valley Escarpment of Southern-Eastern Ethiopia. *Agroforestry Systems*, 87(3), 571–81. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9577-6>
- Nunes, M. L., Feitosa, S. T. A., & Santos, D., (2019). Transpiratory rate, biomass production and leaf macronutrient content of different plant species cultivated

- on a regosol in the brazilian semiarid. *Russian Agricultural Sciences*, 45(1), 147-153. <https://dx.doi.org/10.3103/S1068367419020150>.
- Nyombi, K., Van Asten, P. J. A., Leffelaar, P.A., Corbeels, M., Kaizzi, C. K., & Giller, K. E. (2009). Allometric growth relationships of East Africa highland bananas (Musa AAA-EAHB) Cv. Kisansa and Mbwazirume. *Annals of Applied Biology*, 155(3), 403–18. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00353.x>
- Ordóñez, D. J. A. B., Galicia, N. A., Venegas, M. N. J., Hernández, T. T., Ordóñez, D. M. J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21, 77–126. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210428>
- Ortiz-Ceballos, G. C., Vargas-Mendoza, M., Ortiz-Ceballos, A. I., Briseño, M. M., & Ortiz-Hernández, G. (2020). Aboveground carbon storage in coffee agroecosystems: The case of the central region of the state of Veracruz in Mexico. *Agronomy*, 10, 3-14. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030382>
- Parada-Molina, P. C., Cerdán, C. R., Ceballos, G. O., & Cervantes-Pérez, J. (2020). *Hemileia vastatrix*: una prospección ante el cambio climático. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(3), 1–9.
- Parada-Molina, P. C., Cervantes-Pérez, J., Ruiz-Molina, V. E., & Cerdán-Cabrera, C. R. (2020). Efectos de la variabilidad de la precipitación en la fenología del café: caso zona cafetalera Xalapa-Coatepec, Veracruz, Mex. *Revista Ingeniería y Región*, 24, 61–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.2752>
- Rahn, E., Vaast, P., Läderach, P., van Asten, P., Jassogne, L., & Ghazoul, J. (2018). Exploring adaptation strategies of coffee production to climate change using a process-based model. *Ecological Modelling*, 371, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.009>
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Projections of local knowledge-based adaptation strategies of mexican coffee farmers. *Climate*, 9(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>
- Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J. D., Valdés-Velarde, E., Tinoco-Rueda, J. A., Flores-Ordoñez, M., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Biophysical and structural composition characterization in agroforestry systems of organic coffee from Veracruz. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(37). <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3102/1415>
- Salgado-Mora, M., Ruiz-Bello, C., Moreno-Martínez, J. L., Irena-Martínez, B., & Aguirre-Medina, J. F. (2018). Captura de carbono en biomasa aérea de árboles de sombra asociados a *Coffea arabica* L. en el Soconusco Chiapas, México. *Agro Productividad*, 11(2), 120-126. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/136>
- Schelhaas, M. J., Esch, P. W., Groen, T. A., Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Maser, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T., Pedroni, L.,

- Vallejo, A., & Vilén, T. (2004). *CO2FIX V 3.1 - a modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems* (No. 1068). Wageningen University.  
<https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/43524>
- Segura, M., Kanninen, M., & Suárez D. (2006). Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry Systems*, 68(2), 143–50. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>
- Solis, R., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L., Marín-Díaz, J., Ñique-Álvarez, M., Engedal, T., & Bruun, T. (2020). Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. *The Journal of Agricultural Science*, 158(6), 450-460.  
<https://doi.org/10.1017/S002185962000074X>
- Soto-Pinto, L., & Aguirre-Dávila, C. M. (2015). Carbon stocks in organic coffee systems in Chiapas, México. *Journal of Agricultural Science*, 7(1), 117-128.  
<https://doi.org/10.5539/jas.v7n1p117>
- Tschora, H., & Cherubin, F. (2020). Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. *Global Ecology and Conservation*, 22, Article e00919.  
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919>
- Tumwebaze, S. B., & Byakagaba, P. (2016). Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216, 188-193.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.037>
- Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. (2020). *Actualización de los Escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*.  
<http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>
- United States Department of Agriculture (2019). *Mexican Coffee Production Continues to Rebound from Coffee Rust Disease*. Report annual Mexico, Editorial GAIN,  
[https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Coffee%20Annual\\_Mexico%20City\\_Mexico\\_5-31-2019.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/report/downloadreportbyfilename?filename=Coffee%20Annual_Mexico%20City_Mexico_5-31-2019.pdf)
- World Reference Base for Soil Resources. (2015). *Sistema internacional de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos*. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106, Editorial FAO,  
<https://www.fao.org/publications/card/es/c/I3794ES/>.
- Zaro, G. C., Caramori, P. H., Junior, Y. G. M., Sanquetta, C. R., Filho, A. A., Nunes, A. L. P., Prete, C. E. C., & Voroney, P. (2020). Carbon sequestration in an agroforestry system of coffee with rubber trees compared to open-grown coffee in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, 94, 799–809.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-019-00450-z>

## 6. PROJECTIONS OF LOCAL KNOWLEDGE-BASED ADAPTATION STRATEGIES OF MEXICAN COFFEE FARMERS<sup>6</sup>

### 6.1. Abstract

Local knowledge can be a strategy for coping with extreme events and adapting to climate change. In Mexico, extreme events and climate change projections suggest the urgency of promoting local adaptation policies and strategies. This paper provides an assessment of adaptation actions based on the local knowledge of coffee farmers in southern Mexico. The strategies include collective and individual adaptation actions that farmers have established. To determine their viability and impacts, carbon stocks and fluxes in the system's aboveground biomass were projected, along with water balance variables. Stored carbon contents are projected to increase by more than 90%, while maintaining agroforestry systems will also help serve to protect against extreme hydrological events. Finally, the integration of local knowledge into national climate change adaptation plans is discussed and suggested with a local focus. We conclude that local knowledge can be successful in conserving agroecological coffee production systems.

**Keywords:** agroforestry; peasant; stakeholders; adaptation viability

---

<sup>6</sup> Este Capítulo fue publicado como:

Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez Díaz, J., Monterroso-Rivas, A.I. (2021). Projections of local knowledge-based adaptation strategies of mexican coffee farmers. *Climate*. 9(4), 60. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>.

## 6.2. Introduction

The adaptive capacity of individuals and communities is being increasingly exercised around the world. It is common to hear about policies, laws, and strategies that encourage adaptation in almost all economic sectors. For example, the Paris Agreement [1] recognizes that adaptation is a “global goal” as important as mitigation in addressing climate change. In fact, of 119 nationally determined contributions (NDCs) received in 2015, 100 included an adaptation component [2]. Some measures have more technical and financial support than others, but there are still significant gaps and neglect in agriculture. For many countries the agricultural sector is as important as the water sector [3], and governments have failed to fully cover agricultural activity by improving resilience and capacity to adapt to climate change. Resilience focuses on the capacity of systems to prepare for and withstand shocks and stress associated with natural hazards, and in particular with the inherent uncertainties associated with the magnitude, severity, and timing of hazard impacts or climate change [4–6]. Therefore, the adaptive capacity, which is a basic component required to collectively manage the resilience of a system, has not been completely improved [7].

Mexico has made significant advances in terms of studies [8], laws [9], and regulations [10] to address climate change (also see <https://cambioclimatico.gob.mx/> accessed 10 June 2020). The country even integrates adaptation commitments into its NDCs [11]. However, these efforts are not enough to reach the poor and marginalized corners of the country. For 2018 [12], Mexico reported 82.1 million poor people (65.6%) and 7.1 million (13.3%) people working in the primary sector, which includes agriculture, livestock farming, forestry, hunting, and fishing [13]. In just under 16% of the national area, irrigated or rain-fed agriculture is carried out [14]. In this environment, the diversity of forms of production is a challenge that has not been met by agricultural policies to address climate change. This is the case for the coffee sector in Mexico, which is already awaiting the impacts of climate change, namely temperature increases and changes in the quantity and distribution of precipitation, both of which will

cause decreases in coffee yield and quality [15,16]. It is estimated that the coffee yield may decrease up to 34% [17] due to changes in coffee growth, flowering, and fruiting [18,19]. In addition, increases in the incidence rates of pests and diseases such as rust (*Hemileia vastatrix*) and coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) are expected [20–22]. The result will be a reduction in family income and an increase in the costs related to farming, harvesting, and processing coffee due to the risk of droughts, fires, and storms [23].

The effects of extreme weather events are also being increasingly suffered within the country. Official reports indicate that tropical cyclones and floods are the most frequent events [24,25], with the central and southern areas of the country experiencing the most damages and losses. In recent years, the country has suffered severe economic losses brought about by tropical cyclones, namely hurricanes Odile (2014); Ingrid and Manuel (2013), Alex, Karl, and Matthew (2010); Dean (2007); and Wilma and Stan (2005). Specifically, 86.8% of damages and losses between 2000 and 2018 were of hydrometeorological origin [24]. The country's farmers skillfully deal with these extreme events and climate change impacts with little or no assistance [26]. Historically, extreme events have been present in the area, but coffee plantations have been able to recover [27]. However, future climate change may mean that the coffee plants can no longer recover from the impacts [28].

Nature-based adaptation and traditional knowledge strategies are based on the use of biodiversity and ecosystem services to increase the resilience of natural and modified systems to face climate change [29]. Nature solutions are considered appropriate adaptation options for small producers [30]. Traditional knowledge has been used (unplanned in some cases) in strategies to cope with extreme events and promote adaptation and risk reduction. Local knowledge is rarely taken into account in the design of modern adaptation strategies [31], but its potential is high. There are different criteria in Mexico to identify indigenous peoples or communities in population censuses [32], including definitions based on indigenous language speakers (by self-recognition), indigenous heads of households, indigenous language-speaking parents or grandparents, and others.

Several studies also report that some people deny belonging to an indigenous group for personal reasons or interests of various kinds. Thus, in this paper we will focus on local knowledge, recognizing that in the communities of small producers in Mexico, there are both communities of native peoples and communities that have included their indigenous roots in their culture, particularly in their worldview and agricultural practices. Local knowledge has been shown to be a driver of successful adaptation actions, particularly among governments and informal local institutions [33]. For example, the diversification of production systems or the efficient management and use of water are traditional strategies that increase productivity, sustainability, and resilience for small farmers under different climate change scenarios [34]. Such is the case with coffee growing in Mexico, where it is estimated that 90% of the country's area dedicated to this activity uses native and introduced trees of economic interest to offer shade to coffee trees. This alternative mode of production is managed mainly by small producers and about 30 indigenous groups in the country [35]. The type of management that is carried out in most coffee farms under agroforestry systems is through traditional techniques passed down from generation to generation, with little or no agricultural technology, with the incorporation of cultural and religious elements and a different worldview on the management of their system [36]. The perception of coffee producers can lead to a better understanding of the adaptation process that is underway and its weaknesses [37]. However, there is little information on how producers are perceiving and experiencing climate change in Mexico. In addition, information is lacking on the adaptive potential of nature-based actions, such as the use of shade trees, live fences, and live barriers [38]. Knowing about this potential could help farmers improve the sustainability and resilience of farms to climate change. However, in some regions there is a risk of losing traditional knowledge due to the migration of young people, which reduces the potential to improve the resilience of communities.

Thus, there is a challenge in incorporating local knowledge into adaptation planning. Studies are needed to rescue local knowledge in order to incorporate it into adaptation planning according to the needs of each rural community [39].

Therefore, the goal of the manuscript is to project over time adaptation strategies already implemented by farmers to evaluate their future viability in terms of carbon sequestration and water availability. We choose coffee production as it is an important crop for the country and is particularly sensitive to climate change. In Mexico, the indigenous origin of nearly 25 million people transcends and intertwines local knowledge in the communities where they live, opening up potential possibilities to exploit the diversity of adaptation strategies.

### **6.3. Materials and Methods**

#### **6.3.1. Organizations and Regions**

The historical climate and climate change analyses were first carried out to understand the main risks facing the region. Interviews were then conducted with producers from two regions in south-central Mexico to learn about their adaptation strategies and actions. Finally, adaptations were projected to determine their future viability and to assess local knowledge. The study was conducted with two regional coffee-producing associations in the state of Veracruz: (1) the Regional Coffee Council of Coatepec A.C. (Consejo Regional de Café de Coatepec A.C.) and (2) the “Catuaí Amarillo” Social Solidarity Society (Sociedad de Solidaridad Social “Catuaí Amarillo”). The former is an organization of just over 3000 small farmers in the municipality of Coatepec and the latter is a small organization with less than 50 producers in Chocamán (Figure 6.1), both in the Mexican state of Veracruz. Each of the stages is described below.



**Figure 6.1.** Regional coffee-producing associations studied in the state of Veracruz.

### 6.3.2. Historical Analysis, Observed and Projected Changes

Two weather stations representing the climate of each of the regions studied were selected. One station was considered sufficient for each case due to its proximity to the studied area (less than 3 km), which meant little climatic variation. The Coscomatepec station (number 30,032) is located at 1530 masl, while the Teocelo station (number 30,179) is located at 1188 masl. Both stations are operated by CONAGUA-SMN [in Spanish Comisión Nacional del Agua and Servicio Meteorológico Nacional (National Water Commission – National Meteorological Service)], available at: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html> accessed 10 June 2020). Daily maximum temperature (Tmax), minimum temperature (Tmin), and precipitation (Pp) data were taken from each station. In accordance with López [40], the information was subjected to a quality control process using Rclimindex (ver 1.1, CDAS) and to homogenization with RHtests (ver4). Subsequently, 27 ETCCDI climate change indices [41] were estimated using RCLimDex [42]. The outputs of the climate change indices were classified into quartiles according to the observed change, as shown in Table 6.1.

**Table 6.1.** Classification of observed change in climate indices.

|            | Decrease | Increase |
|------------|----------|----------|
| Low        | -        | +        |
| Moderate   | --       | ++       |
| High       | ---      | +++      |
| Very high  | ----     | ++++     |
| No changes | N/C      |          |
| No data    | ND       |          |

NC = no

changes,

ND = no data. Blue colors refer to decrease in observed data, yellow and red colors refers to increase.

Climate change scenarios were taken from UNIATMOS (Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales, accessed 13 June 2020 at <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>) and Cavazos [43]. The models used were GFDL\_CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), HADGEM2-ES (Hadley Centre Global Environment Model), MPI (Max-Planck-Institut für Meteorologie), and CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) with a 30 \_ 30" resolution, and Representative Concentration Pathway values of RCP 4.5 W/m2 (low emissions) and 8.5 W/m2 (high emissions) for the near (2010–2039), medium (2040–2069), and distant (2070–2099) time horizons.

### 6.3.3. Local Knowledge

Focus groups and semi-structured interviews [44] were conducted with small producers. The three-fold objective was to find out the main weather and climate threats perceived by producers (snowfall, heavy rain, frost, hail, strong winds, ENSO, growing season, and rainfall changes), identify the impacts they have generated on the agricultural development of coffee, and learn about the adaptation actions that farmers are already taking. The questions focused on two aspects: the strategies adopted at the individual level to deal with the threats and those promoted by the organizations to which they belong. Supplementary Material 6 shows the main questions. The study involved 25 small producers who are members of the Catuaí Amarillo association and 43 coffee farmers in the municipality of Coatepec. The interviewees were selected according to their willingness to participate in the workshops.

#### 6.3.4. Evaluation of Adaptation Strategies

Based on the results of the interviews, some of the individually or collectively driven adaptation strategies were selected and evaluated. In the two cases studied, field trips were made to the coffee farms to confirm what was indicated by the producers. The adaptation strategies evaluated were improvements of biomass (agroforestry practices) and protection of soil moisture (agricultural practices). We used carbon content and water balance (growing season) values as indicators of future conditions of production in agroforestry systems and for the efficient use of water. It is possible to find other variables to evaluate adaptation, however we believe the previously used ones are sufficient to technically demonstrate local knowledge and responses to climate change. By improving both variables, it will be feasible to point out that adaptation actions address risks and are viable responses.

#### Carbon Content as Indicators of Future Conditions

We used carbon content projections to evaluate potential mitigation and current adaptation strategies and their impacts over time on the health of soils and agroecosystems [45]. To calculate the carbon contents in the aboveground biomass under the current conditions, the inventory made by Ruiz [46] for 25 coffee plots was taken as the basis (see Online Resource 1) and the model for quantifying carbon sequestration CO2Fix [47] was applied. The software requires evaluation from cohorts, which are groups of individuals or species assumed to have similar growth patterns [48]. According to Schelhaas [49] and Masera [47], the carbon stored in the living biomass ( $C_b$ ) of the entire system can be expressed as the sum of the biomass of each cohort (Equation (1)).

$$C_b = \sum C_{b_{it}} \quad (1)$$

where  $C_{b_{it}}$  is the carbon stored in the living biomass of cohort “i” at time “t” (Mg C/ha).

The total carbon stored will be the sum of the cohorts, which depends on the stem growth and biomass, expressed as a function of the current annual increase (CAI).

The CAI of each cohort is calculated based on the actual aboveground biomass over the current achievable maximum of the cohort. To calculate the simulation over time,  $C_{bit}$  is determined by Equation (2):

$$Cb_{it+1} = \sum Cb_{it} + Kc [Gb_{it} - Ms_{it} - T_{it} - H_{it} \quad (MgC/ha) \quad (2)$$

where  $Kc$  = constant for converting biomass into carbon content (Mg C per Mg of biomass dry weight);  $Gb_{it}$  = biomass growth;  $T_{it}$  = branch, foliage, and root rotation;  $Ms_{it}$  = tree mortality due to senescence;  $H_{it}$  = harvest. More information is presented in Supplementary Material 6.1.

### **Water Balance as Indicator of Future Conditions**

Water regulation, an ecosystem service, was projected to evaluate the impacts of current adaptation over time. The water regulation was determined following the modified Thornthwaite technique [50] to determine the monthly aridity index, soil moisture availability, and growth period. It should be noted that the climate change scenarios were applied to the base scenario in order to determine the impacts of the adaptation measures.

## **6.4. Results and Discussion**

### **6.4.1. Climate and Climate Change**

The areas studied have similar general characteristics—subtropical temperate summer climates, with little thermal oscillation. The highest temperatures of the year occur before the summer solstice; that is, in May. September is the month with the most rainfall. The area around Coatepec is slightly cooler than that around Coscomatepec, which is slightly further south. In summer, there are tropical air masses, eastern waves, depressions, tropical storms, and hurricanes, usually starting in June and sometimes during the second half of May [51]. In winter, from October to May, polar air masses arrive in the form of cold fronts called “nortes”, while cold air associated with the passage of polar troughs also sweeps over the region [52,53].

In the region, the beginning and end of the coffee production period largely depend on the elevation at which the plantation has been established, since it influences the temperature and moisture available for plant growth, as well as the good development and ripening of the coffee bean. The coffee plant's phenology should be noted, including for flowering (March to April), fruit growth and development (May to October), and ripening (November to February). Even the harvest can be affected by a climatic phenomenon.

Extreme events have impacted the region in recent decades (see Supplementary Material 6.2). Specifically, there has been snowfall, heavy rain, frost, hail, strong winds, forest fires, and landslides. The events associated with precipitation are explained by the way in which the rainfall pattern is changing. Slight increases in the numbers of days with rainfall greater than 10 and 20 mm were observed at the two sites studied. The weather station to the south (Coscomatepec) recorded a considerable increase in total annual rainfall, while the station further north (Teocelo) recorded less rainfall (Table 6.2). The rainfall pattern is becoming more irregular and increasingly stormy events are being recorded; that is, it rains a little more in fewer events. Regarding temperature, there are decreases in cold periods (days), cold nights, and cool days. Warm nights and extreme minimum temperatures are increasing. This indicates that increasingly extreme conditions, longer warm periods, and more frequent extreme minimums are occurring.

**Table 6.2.** Observed changes in trends in weather stations and adaptation actions (individual and collective).

| Index | Description                 | Coscomatepec | Teocelo | Adaptation actions |                              |
|-------|-----------------------------|--------------|---------|--------------------|------------------------------|
|       |                             |              |         | Individuals        | Collectives                  |
| CDD   | Maximum length of dry spell | -            | +       | Living fences      | Use of agroforestry systems  |
| CSDI  | Cold speel duration index   | --           | +++     |                    |                              |
| CWD   | Maximum length of wet spell | --           | +       | Living barriers    |                              |
| DTR   | Daily temperature range     | -            | +       |                    |                              |
| FD    | Number of frost days        | S/N          | +       |                    | Use of agroforestry systems. |
| GSL   | Growing season length       | -            | -       |                    |                              |

| Index   | Description                                                            | Coscomatepec | Teocelo | Adaptation actions         |                                                                                            |
|---------|------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                                        |              |         | Individuals                | Collectives                                                                                |
| ID      | Number of icing days                                                   | S/N          | S/N     |                            |                                                                                            |
| PRCPTOT | Annual total precipitation in wet days                                 | ++++         | --      | Living barriers and fences | Use of agroforestry systems with tress that don't compete for water resources with coffee. |
| R10mm   | Annual count of days when PRCP ≥ 10mm                                  | ++           | +       |                            |                                                                                            |
| R20mm   | Annual count of days when PRCP ≥ 20mm                                  | +            | -       |                            |                                                                                            |
| R95p    | Annual total PRCP when RR > 95p                                        | ----         | +       |                            | Use of agroforestry systems with tress that don't compete for water resources with coffee. |
| R99p    | Annual total PRCP when RR > 99p                                        | ---          | --      |                            |                                                                                            |
| Rnnmm   | Annual count of days when PRCP ≥ nnmm                                  | +            |         |                            |                                                                                            |
| RX1day  | Monthly maximum 1-day precipitation                                    | --           | -       |                            | Use of agroforestry systems with tress that don't compete for water resources with coffee. |
| RX5day  | Monthly maximum consecutive 5-day precipitation                        | --           | ++      |                            |                                                                                            |
| SDII    | Simple precipitation intensity index                                   | +            | -       |                            |                                                                                            |
| SU      | Number of summer days                                                  | +            | +++     |                            |                                                                                            |
| TN10p   | Percentage of days when TN < 10 <sup>th</sup> percentile (cold nights) | --           | ++      |                            | Tree shade regulation (40-80%)                                                             |
| TN90p   | Percentage of days when TN > 90 <sup>th</sup> percentile (hot nights)  | ++           | +       |                            |                                                                                            |
| TNn     | Monthly minimum value of daily minimum temperature                     | ++           | -       |                            | Tree shade regulation (40-80%)                                                             |

| Index | Description                                                          | Coscomatepec | Teocelo | Adaptation actions |                                |
|-------|----------------------------------------------------------------------|--------------|---------|--------------------|--------------------------------|
|       |                                                                      |              |         | Individuals        | Collectives                    |
| TNx   | Monthly maximum value of daily minimum temperature                   | +            | -       |                    |                                |
| TR    | Number of tropical nights                                            | -            | +       |                    |                                |
| TX10p | Percentage of days when TX < 10 <sup>th</sup> percentile (cold days) | --           | -       |                    |                                |
| TX90p | Percentage of days when TX > 90 <sup>th</sup> percentile (hot days)  | +            | ++      |                    | Use of agroforestry systems    |
| TXn   | Monthly minimum value of daily maximum temperature                   | +            | +       |                    | Tree shade regulation (40-80%) |
| TXx   | Monthly maximum value of daily maximum temperature                   | -            | +       |                    |                                |
| WSDI  | Warm speel duration index                                            | +            | ++      |                    |                                |

Note: \* adapted from responses given in focus groups and semi-structured interviews. Blue colors refer to decrease in observed data, yellow and red colors refers to increase.

Climate change scenarios indicate that precipitation levels in winter, spring, and summer will decrease for the 2070–2099 horizon by 15%, 14%, and 18%, respectively. In autumn, an increase of up to 13% is expected. Regarding the annual balance, a 6% variation in the above-mentioned period is possible. Regarding the maximum temperature, the scenarios indicate that it will increase throughout the year to 1.5 \_C in the near (2010– 2039), 3 \_C in the middle (2040– 2069), and up to 4 \_C in the distant (2070 2099) future. Increases of 1, 2, and up to 3 \_C in minimum temperature are projected for the same time horizons (see Supplementary Material 3).

#### 6.4.2. Local Knowledge on Adaptation to Extreme Events

The weather and coffee production are carefully monitored by farmers. Based on the opinions of those interviewed the last few years have been different in relation to average climate conditions. Producing coffee in the region means coping with

climate changes and solving marketing problems. Regarding the observed climate changes, most farmers agreed during the interviews that they are experiencing more prolonged droughts (now from June to November, before April to May). In relation to the mid-summer heatwave, colloquially known as the “dog days” (“canícula” in Spanish) of summer and marked by a brief reduction in rainfall in July–August, which now occurs over a longer period, starting as early as May or June.

The consequences if it lasts until September are the appearance of pests such as “palomilla” or stemborer (*Hammatoderus maculosus* Bates, 1880), “ojo de gallo” or rooster eye (*Mycena citricolor* Berkeley & Curtis), “antracnosis” or anthracnose (*Colletotrichum coffeanum* Noack), and stem rot (*Erythricium salmonicolor* Berk. & Broome). The phenomenon is known as “caniculón” (strong “canícula”). The increase in pests and diseases observed by farmers in this study coincides with what other researchers have reported in different coffee growing regions of Mexico and Latin America [20–22], who agree that the increase in temperature and changes in precipitation favor the development of pests and pathogens, which directly affect the coffee.

The presence of strong, warm winds in May to August are known as “suradas” (strong wind coming from the south) and affect the growth and development of coffee. The farmers also pointed out during the interviews that heatwaves (in March–April or even May) result in wilting of the flowers and drying-out the coffee trees. The cold fronts, called “nortes” (cold wind coming from the north), occur from September to March, affecting the coffee bean in its growth and ripening stages.

Hailstorms occur from March to May and are more frequent in summer, causing damage to leaves and fruits of coffee plants. The pest that most plagues the region is the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*, Fer.), which appears during the ripening of the fruit (July until September). The coffee berry borer is a beetle measuring just 2 mm in length. In the interviews, some producers stated that rising temperatures in the región have expanded the pest’s distribution area

to increasingly higher regions above 1000 m above sea level, where it was less frequently found before.

The increased temperature makes it easier for several generations of the pest to reproduce each year [54]. Infestation is greater in humid, shady plantations compared to those that are dry and exposed to air currents [55,56]. Therefore, the increase in irregular precipitation events may function as a triggering factor for the emergence of the coffee berry borer and its spread.

Rust is another major phytosanitary problem with coffee. It is caused by the fungus *Hemileia vastratix* Berk. and Br., which attacks the leaves and can cause total defoliation of the coffee trees, consequently resulting in no harvest occurring [57]. Temperature is a determining factor for its appearance; it has been reported that its presence is sporadic at elevations higher than 900 m above sea level. However, climatic conditions have been changing and it is now possible to find outbreaks at higher elevations. People mentioned in the interviews that the disease occurs in the rainy season, starting in September.

Regarding the economic crisis that has beset coffee producers, the disappearance of the Mexican Coffee Institute (1958–1989) marked the government's abandonment of the producers. It also induced migration by the youngest inhabitants, mainly to cities.

The small farmers who remained had to adjust their local production methods [58]. In the two areas studied, the farmers decided to group together. In the case of Coatepec, coffee farmers have organized themselves into the Regional Coffee Council of Coatepec A.C., which covers just over 15 municipalities. The organization began in 1996 and covers a little more than 3000 small and medium-sized farmers. For the other case study in Coscomatepec, the organization “Catuai Amarillo” is made up of small farmers who have been organized since the early 1990s and who together have 50 ha of shaded *Coffea arabica* L. production fields. Both organizations stated that they are producers of high-quality organic- and fair trade-certified coffee.

Since then, the two organizations have been instrumental in improving the adaptive capacity and adapting to the increases in various extreme events in the study area. Agronomic soil conservation practices that promote resilience are culturally transmitted between generations, from parents to children—they are used to maintain crop residues, maintain trees in the plots, and in replacement of sick or old trees. In any case, behind soil conservation is the promotion of adaptive capacity. The organized farmers of the region, armed with their traditional knowledge, created technological alternatives to enter the market and promote organic and fair trade coffee. This is an alternative development path that generates a reduction in vulnerability to climate change [31]. Organized producers enjoy benefits such as reducing production costs, sharing experiences, and obtaining benefits from the synergies caused by the grouping, thereby stabilizing the community way of life and reinforcing sustainable alternative development [59]. In this sense, the results of the interviews are grouped into two ways of addressing the challenges of coffee production, namely individually-driven and collectively-driven actions.

In collective adaptation actions dealing with climate change, it was found that the organizations have promoted the maintenance of production in agroforestry systems and the efficient use of water.

**Agroforestry systems.** The permanent use of coffee agroforestry systems with diversified species of multipurpose trees and shrubs represents a primary adaptation strategy in the area. This is a very common ecosystem-based adaptation strategy that has been identified in various coffee growing areas [23,30,38]. This activity has been passed down from generation to generation among the indigenous communities of the region, with little or no agricultural technology, due to the lack of economic resources and the marked relief that hinders access to coffee plots in some cases [60,61]. Small producers in the studied communities have a different worldview on the management of coffee agroforestry systems, allowing local sustainable development of family units [36]. Recently, multipurpose trees began to replace old trees that were only used for their shade.

About 50 multipurpose species used for coffee shade in the study regions have been recorded [46]. The diversity of trees and shrubs within the coffee plantations protects the crops against the increase in recurrent extreme phenomena in the evaluated areas (intense rain, prolonged droughts during the mid-summer heatwave season, frosts and hailstorms); it also creates greater adaptive capacity, since there is no longer a total dependence on the coffee bean. In the event of a drop in the price of coffee beans or low production caused by pests or diseases, the producer can obtain economic income from the sale of other products generated within the agroforestry system [62].

**Efficient use of water.** The small farmers interviewed are aware of the importance of water resources, making efficient water use one of their top priorities. Within the agroforestry systems, producers use tree and shrub species that do not demand much water to avoid competition for water resources with the coffee plants. The species they mostly use are *Lippia myriocephala* Schltdl. and Cham and Inga vera Willd. They avoid using *Trema micrantha* (L.) Blume because they assert that it competes with coffee for soil moisture [63]. Shade regulation within the coffee plantation is also essential for efficient water use. According to the producers interviewed, 95% of the coffee farms have between 40–80% shade cover, which helps to avoid water stress on the coffee plants when long heatwaves occur. According to Lin [64], 60–80% shade cover decreases soil evaporation rates and coffee transpiration demands because it affects the microclimate and the radiant energy within the system. Outside the coffee farms, producers make efficient use of water in the coffee processing stage (washing and pulping), as they reuse the water to irrigate the coffee seedlings and the multipurpose trees and shrubs produced in the organization's nursery. This water is also used in the solid waste composting process for the production of the organic fertilizer used on the coffee farms. With projected decreases in precipitation in drier climates, the use of a simple water protection measure will become even more essential, meaning the efficient use of water represents an adaptation strategy based on ecosystems of importance in coffee plantations [23].

In relation to individual adaptation actions taken to address climate change, examples of living fences and barriers were found.

**Living fences.** Just over half of the producers interviewed use living fences to delimit the ownership of their plots. It is common for thunderstorms to occur in the study area, sometimes knocking down trees and branches, thus damaging fences. The use of living fences as an adaptation strategy in the face of the threat of extreme rainfall reduces the establishment and maintenance costs compared to dead fences [65]. **Living barriers.** Another adaptation action taken to reduce the impact of heavy rains is the use of living barriers. The farmers use various species of the genus *Bursera* sp. along the contour lines. The use of living barriers reduces soil loss due to water erosion by slowing down the speed of downstream runoff water; it also favors the sedimentation of soil particles on the upper parts of the living barriers and the formation of natural terraces [66].

With this strategy, the soil degradation process caused by heavy rains is reduced. Reforestation increases in protected area surfaces, and stricter forest management regulations were other key measures that coffee producers cited as possible means of preserving the regional climate. Without a doubt, the challenges posed by producers are greater than those answered; poverty, access to health services, and education are other challenges that they indicated require attention. They require support with technical assistance to continue production without losing yields.

### **Carbon Content Projections for Future Conditions**

Current carbon levels in the aboveground biomass and the projections of carbon stocks and fluxes in the aboveground biomass were obtained for three agroforestry designs that included collective and individual adaptation actions, which were identified through field visits to the coffee plots and interviews with producers: agroforestry design 1 (Af1), involving coffee plants with shade trees and living barriers; agroforestry design 2 (Af2), involving coffee plants with shade trees, banana trees, and living barriers; and agroforestry design 3 (Af3), involving

coffee plants with shade trees, banana trees, and living fences. The species found and the density of each design are described in greater detail in Supplementary Material 4. The use of agroforestry systems that includes shade trees for coffee plants corresponds to the collective adaptation actions carried out by small producers. Those that include living fences and barriers correspond to individual adaptation actions taken by producers.

The carbon content in the current aboveground biomass was the highest in Af1 with 32.20 Mg ha<sup>-1</sup> and was similar in Af2 and Af3, reaching 25.52 Mg C ha<sup>-1</sup> and 25.69 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectively. These results are within the range of 20.9 to 31 Mg C/ha<sup>-1</sup> reported for the aerial biomass in similar conditions to the study area [67,68].

The projected total carbon stocks in the aboveground biomass on the basis of a 50-year simulation (Table 6.3) showed a lower level in Af3 (70.88 Mg C ha<sup>-1</sup>) than in Af1 and Af2 (85.98 and 88.11 Mg C ha<sup>-1</sup>, respectively). The inclusion of shade trees in the coffee plots accounted for 75% of the total carbon in the aboveground biomass in Af1 and Af3 and 79% in Af2. Living fences used as adaptation measures accounted for 7% of the total carbon in the aboveground biomass in the Af1 and Af2 designs. The use of living fences accounted for 16% of the total carbon in the Af3 design.

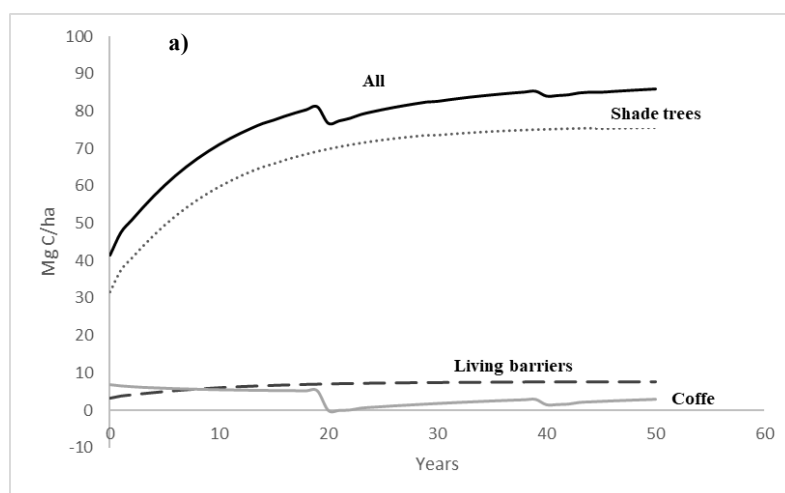
**Table 6.3.** Carbon stocks in aerial biomass (Mg Cha<sup>-1</sup>) projected for 50 years according to agroforestry designs (Chocamán, Veracruz).

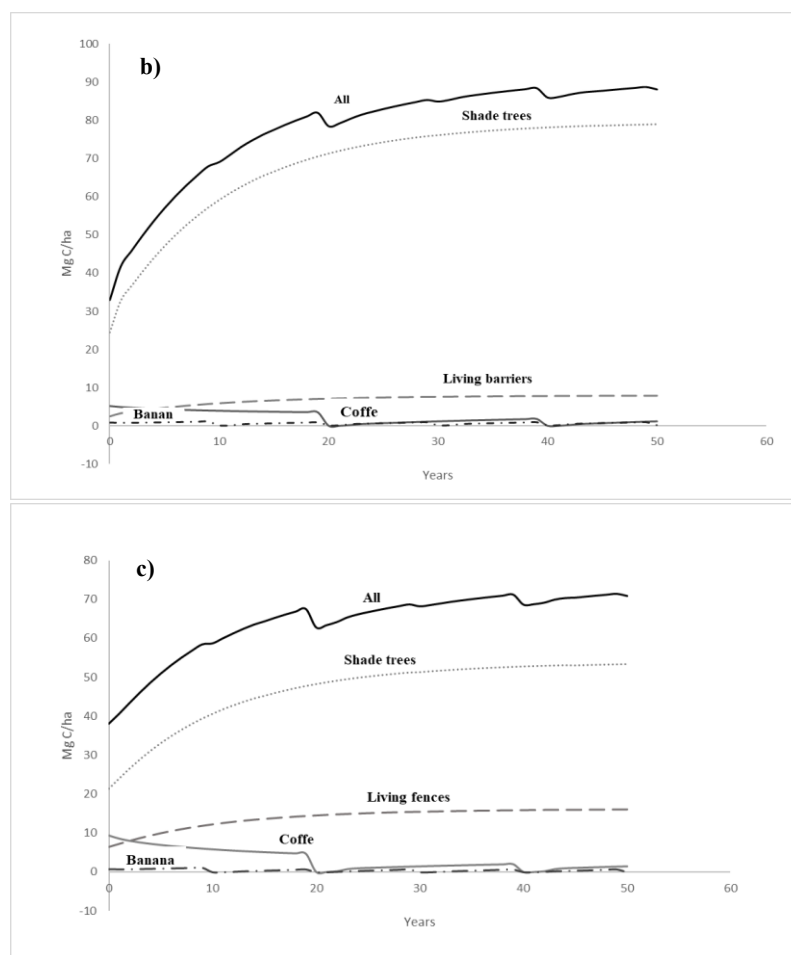
| Agroforestry Design | Carbon stocks |               |             |                 |               | Total   |
|---------------------|---------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|---------|
|                     | Coffee        | Shadow Trees* | Banana tree | Living barriers | Living fences |         |
| Af1                 | 2.90 ±        | 75.52 ±       | ----        | 7.55 ±          | ----          | 85.98 ± |
|                     | 3.51          | 43.99**       |             | 4.39            |               | 46.39   |
| Af2                 | 1.18 ±        | 78.90 ±       | 0.13 ±      | 7.89 ±          | ----          | 88.11 ± |
|                     | 0.76          | 52.12         | 0.41        | 5.21            |               | 57.38   |
| Af3                 | 1.45 ±        | 53.41 ±       | 0.69 ±      | ----            | 16.02 ±       | 70.88 ± |
|                     | 1.13          | 22.07         | 0.32        |                 | 6.62          | 28.61   |

The 50-year projection of carbon fluxes in the aboveground biomass is shown in Figure 6.2. According to what was stated in the interviews, a reduction in plant density was considered due to the rotation of coffee and banana plants every 10

and 20 years. Thus, the potential for carbon sequestration in the aboveground biomass by incorporating collective and individual adaptation responses is 96.62% for Af1, 98.66% for Af2, and 97.95% for Af3. Responses taken by coffee farmers suggest that they will increase biomass while sequestering more carbon over time. The results are similar to those projected in other coffee agroforestry systems with banana (76–122 Mg C ha<sup>-1</sup>) by Negash and Kanninen [69]. It should be noted that in sun-grown coffee crops, 2.76 Mg C ha<sup>-1</sup> is captured in areas surrounding Huatusco, Veracruz, Mexico [67]. As expected, the carbon content in the aboveground biomass in the present study is higher.

The adaptation strategies selected by farmers contribute to forming more aboveground biomass, which conserves carbon in trunks, roots, leaf litter, and dead branches. This helps carbon to be retained in the deepest soil layers. with a -4.5% loss rate [70]. In addition, the use of these adaptation actions helps in water retention, regulation of hydrological cycles, and protection against extreme weather events in the system [71].





**Figure 6.2.** Projections for 50-year carbon contents ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) in aerial biomass samples for (a) agroforestry design 1 (Af1), involving coffee plants with shade trees and living barriers; (b) agroforestry design 2 (Af2), involving coffee plants with shade trees, banana trees, and living barriers; and (c) agroforestry design 3 (Af3), involving coffee plants with shade trees, banana trees, and living fences.

### Water Balance Projections for Future Conditions

Regarding water balance variables, it was found that the rainfall pattern will continue to be irregular, with consequences for agricultural production. The start of the growing season will be delayed by up to one month, while its end could be brought forward by up to three months; that is, the rainy season will become shorter, with a high risk of more stormy rain events. The durations of the growing period and the wet period will be reduced by 100 days on average (Table 6.4). The monthly balance indicates that the moisture stored in the soil will also decrease. The winter months will be those in which the greatest reductions are expected (see Supplementary Material 6.5).

**Table 6.4.** Changes in growing season variables.

|                              | Current  | Climate change RCP 8.5 by 2099 |             |           |            |
|------------------------------|----------|--------------------------------|-------------|-----------|------------|
|                              |          | CNRM                           | GFDL        | HADGEM    | MPI        |
| Growing season starts        | 12-May   | 19-April                       | 28-April    | 23-April  | 25-May     |
| Growing season ends          | 19-April | 5-January                      | 20-February | 8-January | 2-November |
| Growing season length (days) | 349      | 298                            | 321         | 300       | 97         |
| Humid period length (days)   | 256      | 182                            | 206         | 206       | 36         |

Material 6.3 for climate change scenarios of precipitation. GFDL is for Geophysical Fluid Dynamics Laboratory model; HADGEM for Hadley Centre Global Environment Model; MPI for Max-Planck-Institut für Meteorologie model and CNRM for Centre National de Recherches Météorologiques model.

The adaptation strategies used by farmers also protect the soil moisture [72]. In the areas studied, coffee is rain-fed, so a deficit or excess of water in the soil modifies the phenological responses and subsequent coffee production [73]. The adaptation actions promoted in the region—both collective and individual—have shown the potential to reduce the impacts caused by decreases in the moisture stored in the soil in the dry months.

The presence of trees within the agroecosystem generates the phenomenon known as hydraulic lift, whereby trees take water from deep soil horizons and redistribute it on the surface when environmental conditions are dry [74]. The water extracted by the trees can then be used by the coffee plants, thereby reducing the impacts caused by the decrease in moisture content in dry periods projected due to climate change. The same situation occurs when the start of the rainy season is delayed.

The agroforestry strategies used, namely living fences and barriers, incorporate organic matter into the soil, involving significant water infiltration and storage, and they also prevent the destruction of aggregates and the drying of the soil [75]. Additionally, by regulating the microclimate, canopy trees in agroforestry systems help to control the water balance by influencing the system's radiant energy, which affects soil evaporation and leaf transpiration [76]. Coffee plants under full sun are

exposed to higher radiation, so they experience higher temperatures and less relative humidity, causing higher transpiration rates [61]. The use of shade trees means that the coffee trees receive less direct light and experience lower air temperatures and higher humidity, losing less water due to transpiration [64].

## **6.5. Conclusions**

The current capacities of coffee farmers are being diminished by more frequent and intense extreme weather events, and climate change may reduce them further. However, farmers are learning to cope with the changes with the greatest asset they have—their traditional and local knowledge. Through time and for generations, communities have passed down their knowledge from parents to children. Our results show that the adaptation strategies of local farmers are viable and fulfill many purposes.

The potential for carbon sequestration in aboveground biomass projected over 50 years demonstrates the relevance of collective and individual adaptation actions by small farmers based on local knowledge. However, further studies are needed to understand the potential for total carbon sequestration, considering the reservoirs of soil organic matter. Proposals aimed at improving the system's design to enhance the adaptive capacity of small producers in the study region are also required.

Local knowledge inherited from the country's indigenous origin (through ancestral experiences, stories, and life lessons) has shown producers that it is necessary to be well organized to cope with and adapt to climate change. The renewal of indigenous knowledge, such as traditional ecological knowledge, can bring local communities together to strengthen their own planning to address climate change [77]. Both a small local organization (Catuaí Amarillo, 25 producers) and a large one (Consejo de Café de Coatepec, more than 3000 producers) share success stories of strategies that enable them to deal with extreme events and climate change. The two local organizations, regardless of size, provide the space for producers to share experiences. This is an opportunity for national and regional governments to link with producers and support better adaptation strategies, and

there is an urgent need to incorporate local knowledge into national climate change adaptation policies. The local knowledge-based adaptation strategy includes crop diversification and improved system management strategies. The producers' understanding of the change in climate variables and traditional knowledge help to generate better adaptation strategies that reduce vulnerability to climate change in the coffee sector [78]. Adaptation strategies provide more benefits besides coping with climate change; for this, we used carbon content (our results showed that carbon will improve over time) and water balance (our results showed that water availability will be reduced) as indicators. Thus, the adaptation strategies were well selected. Coffee farmers are aware of climate variability and have noticed firsthand the increase in temperature and reduction in precipitation. As the coffee plantations are immersed in the cloud forest, an ecosystem rich in biodiversity, the farmers feel and act as though they are guardians for its conservation.

#### **6.6. Acknowledgments:**

P.R.G. thanks the grant by CONACYT. All authors thanks Universidad Autónoma Chapingo (CIRENAM, DGIP, Departamento de Suelos y Fitotecnia) and Universidad Nacional Autónoma de México (CCA). We gratefully acknowledge the comments and suggestions of the anonymous reviewers, whose comments have substantially improved the paper.

## 6.7. References

1. UNFCCC. Synthesis Report on the Aggregate Effect of Intended National and Determined Contributions (INDCs). An Overview; United Nations Framework Convention on climate Change: Bonn, Germany, 2015.
2. UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement, 21<sup>st</sup> Conference of the Parties; United Nations: Paris, France, 2015.
3. USAID. Analysis of Intended Nationally Determined Contributions (INDCs); United States Agency for International Development: Washington, DC, USA, 2016.
4. Klein, R.J.T.; Nicholls, R.J.; Thomalla, F. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Environ. Hazards* **2003**, 5, 35–45. [[CrossRef](#)]
5. Berkes, F. Understanding uncertainty and reducing vulnerability: Lessons from resilience thinking. *Nat. Hazards* **2007**, 41, 283–295. [[CrossRef](#)]
6. Tompkins, E.L.; Lemos, M.C.; Boyd, E. A less disastrous disaster: Managing response to climate-driven hazards in the Cayman Islands and NE Brazil. *Glob. Environ. Chang.* **2008**, 18, 736–745. [[CrossRef](#)]
7. Walker, B.; Holling, C.S.; Carpenter, S.R.; Kinzig, A.P. Resilience, Adaptability and Transformability in Social ecological Systems. *Ecol. Soc.* **2004**, 9, art5. [[CrossRef](#)]
8. SEMARNAT-INECC. Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bial de Actualización Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Ciudad de México, México, 2018.
9. DOF. Cámara de Diputados Ley General de Cambio Climático; Gobierno de México: Ciudad de México, México, 2012; Volume 52. 10. INECC. Teoría del Cambio de la Política Nacional de Cambio Climático; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: Ciudad de México, México, 2017.
11. SEMARNAT. México. Intended Nationally Determined Contribution; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Ciudad de México, México, 2015.
12. CONEVAL. Diez años de Medición de Pobreza Multidimensional en México: Avances y Desafíos en Política Social; Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social: Ciudad de México, México, 2018.
13. INEGI. Los Hombres y las Mujeres en las Actividades Económicas. Censos Económicos 2014; Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Aguascalientes, México, 2015.
14. INEGI. Encuesta Nacional Agropecuaria 2017; Instituto Nacional de Estadística y Geografía: Aguascalientes, México, 2017.

15. Läderach, P.; Ramirez-Villegas, J.; Navarro-Racines, C.; Zelaya, C.; Martinez-Valle, A.; Jarvis, A. Climate change adaptation of coffee production in space and time. *Clim. Chang.* **2017**, *141*, 47–62. [[CrossRef](#)]
16. Ovalle-Rivera, O.; Läderach, P.; Bunn, C.; Obersteiner, M.; Schroth, G. Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0124155. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Brígido, J.G.; Nikolskii, I.; Terrazas, L.; Herrera, S.S. Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnol. Cienc. Agua* **2015**, *6*, 101–116.
18. Villers-Ruiz, L.; Arizpe, N.; Orellana, R.; Conde, C.; Hernández, J. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia* **2009**, *34*, 322–329.
19. Peters, V.E.; Carroll, C.R. Temporal variation in coffee flowering may influence the effects of bee species richness and abundance on coffee production. *Agrofor. Syst.* **2012**, *85*, 95–103. [[CrossRef](#)]
20. Libert Amico, A.; Ituarte-Lima, C.; Elmqvist, T. Learning from social–ecological crisis for legal resilience building: Multi-scale dynamics in the coffee rust epidemic. *Sustain. Sci.* **2020**, *15*, 485–501. [[CrossRef](#)]
21. Avelino, J.; Cristancho, M.; Georgiou, S.; Imbach, P.; Aguilar, L.; Bornemann, G.; Läderach, P.; Anzueto, F.; Hruska, A.J.; Morales, C. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* **2015**, *7*, 303–321. [[CrossRef](#)]
22. Magrach, A.; Ghazoul, J. Climate and Pest-Driven Geographic Shifts in Global Coffee Production: Implications for Forest Cover, Biodiversity and Carbon Storage. *PLoS ONE* **2015**, *10*, e0133071. [[CrossRef](#)]
23. Schroth, G.; Laderach, P.; Dempewolf, J.; Philpott, S.; Hagggar, J.; Eakin, H.; Castillejos, T.; Moreno, J.G.; Pinto, L.S.; Hernández, R.; et al. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, México. *Mitig Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2009**, *14*, 605–625. [[CrossRef](#)]
24. CENAPRED. Características e Impactos Socioeconómicos de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2012. Número 14; Centro Nacional de Prevención de Desastres: Ciudad de México, México, 2014.
25. Cavazos, T. Conviviendo con la Naturaleza: El Problema de los Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos en México; Cavazos, T., Ed.; REDES-Clim. Ediciones ILCSA: Ciudad de México, México, 2015.

26. Conde, C. Coping with Climate Change Impacts on Coffee and Maize for Peasants in México. In *Coping with Global Environmental Change, Disasters and Security*; Brauch, H.G., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 1067–1080. ISBN 9783642177767.
27. Tucker, C.M.; Eakin, H.; Castellanos, E.J. Perceptions of risk and adaptation: Coffee producers, market shocks, and extreme weather in Central America and Mexico. *Glob. Environ. Chang.* **2010**, *20*, 23–32. [[CrossRef](#)]
28. Gay, C.; Estrada, F.; Conde, C.; Eakin, H.; Villers, L. Potential Impacts of Climate Change on Agriculture: A Case of Study of Coffee Production in Veracruz, Mexico. *Clim. Chang.* **2006**, *79*, 259–288. [[CrossRef](#)]
29. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. *Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*; Technical Series No. 41; Convention on Biological Diversity Montreal: Montréal, QC, Canada, 2009; 126p.
30. Viguera, B.; Alpízar, F.; Harvey, C.A.; Ruth Martínez-Rodríguez, M.; Saborío-Rodríguez, M. Climate change perceptions and adaptive responses of small-scale coffee farmers in Costa Rica. *Agron. Mesoam.* **2019**, *30*, 333–351. [[CrossRef](#)]
31. Ajani, E.; Mgbenka, R.N.; Okeke, M.N. Use of Indigenous Knowledge as a Strategy for Climate Change Adaptation among Farmers in sub-Saharan Africa: Implications for Policy. *Asian J. Agric. Ext. Econ. Sociol.* **2013**, *2*, 23–40. [[CrossRef](#)]
32. Reyes-Sánchez, C.; González-Ulin, V.; Luna-Ortega, H.; Hernández-Martínez, E.B.; Dey-Zárate, X.; Loreto-Bermúdez, F. *Perfil Social y Económico de la Población Indígena en Veracruz*, 1st ed.; Secretaría de Finanzas y Planeación: Xalapa, México, 2016; ISBN 978-607-8489-05-3.
33. Naess, L.O. The role of local knowledge in adaptation to climate change. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* **2013**, *4*, 99–106. [[CrossRef](#)]
34. Altieri, M.A.; Nicholls, C.I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Clim. Chang.* **2017**, *140*, 33–45. [[CrossRef](#)]
35. Escamilla, P.E.; Díaz, S.C. *Sistemas de Cultivo de Café en México*; Centro Nacional de Investigación, Innovación y Desarrollo Tecnológico del Café. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación: Huatusco, Veracruz, 2016.
36. Guevara Romero, M.L.; Téllez Morales, M.B.R.; Flores Lucero, M.D.L. Aprovechamiento sustentable de los recursos naturales desde la visión de las comunidades indígenas: Sierra Norte del Estado de Puebla. *Nov. Sci.* **2015**, *7*, 511–537. [[CrossRef](#)]

37. Zuluaga, V.; Labarta, R.; Läderach, P. Climate Change Adaptation: The Case of the Coffee Sector in Nicaragua. In Proceedings of the 2015 AAEA Joint Annual Meeting, San Francisco, CA, USA, 26–28 July 2015; Agricultural and Applied Economics Association: Washington, DC, USA, 2015.
38. Harvey, C.A.; Martínez-Rodríguez, M.R.; Cárdenas, J.M.; Avelino, J.; Rapidel, B.; Vignola, R.; Donatti, C.I.; Vilchez-Mendoza, S. The use of Ecosystem-based Adaptation practices by smallholder farmers in Central America. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2017**, *246*, 279–290. [[CrossRef](#)]
39. Janif, S.Z.; Nunn, P.D.; Geraghty, P.; Aalbersberg, W.; Thomas, F.R.; Camailakeba, M. Value of traditional oral narratives in building climate-change resilience: Insights from rural communities in Fiji. *Ecol. Soc.* **2016**, *21*, 7. [[CrossRef](#)]
40. López-Díaz, F.; Conde, C.; Sánchez, O. Analysis of indices of extreme temperature events at Apizaco, Tlaxcala, México: 1952–2003. *Atmósfera* **2013**, *26*, 349–358. [[CrossRef](#)]
41. Karl, T.R.; Nicholls, N.; Ghazi, A. CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In *Weather and Climate Extremes*; Karl, T., Nicholls, N., Ghazi, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1999; pp. 3–7.
42. Zhang, X.; Yang, F. RCLimDex (1.0): Manual del Usuario. (Traducción de Santos J.L.); Climate Research Branch, Environment Canada: Ottawa, ON, Canada, 2004.
43. Cavazos, T.; Salinas, J.; Martínez, B.; Colorado, G.; De Grau, P.; Prieto, R.; Conde, C.; Quintanar, A.; Santana, J.; Romero, R.; et al. Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México Como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: Ciudad de México, México, 2013.
44. Campos Sánchez, M.; Herrador, D.; Manuel Valdés, C.; Mccall, M.K. Estrategias de adaptación al cambio climático en dos comunidades rurales de México y El Salvador. *Boletín Asoc. Geógrafos Españoles* **2013**, 329–349. [[CrossRef](#)]
45. Paustian, K.; Lehmann, J.; Ogle, S.; Reay, D.; Robertson, G.P.; Smith, P. Climate-smart soils. *Nature* **2016**, *532*, 49–57. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Ruiz-García, P.; Gómez-Díaz, J.D.; Valdes-Velarde, E.; Tinoco-Rueda, J.A.; Flores-Ordoñez, M.; Monterroso-Rivas, A.I. Biophysical and structural composition characterization in agroforestry systems of organic coffee from Veracruz. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* **2020**, *23*, 37.
47. Masera, O.R.; Garza-Caligaris, J.F.; Kanninen, M.; Karjalainen, T.; Liski, J.; Nabuurs, G.J.; Pussinen, A.; De Jong, B.H.J.; Mohren, G.M.J. Modeling

- carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO2FIX V.2 approach. *Ecol. Modell.* **2003**, 164, 177–199. [\[CrossRef\]](#)
48. Alder, D.; Silva, J.N.M. An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manag.* **2000**, 130, 141–157. [\[CrossRef\]](#)
  49. Schelhaas, M.J.; Esch, P.W.; van Groen, T.A.; Jong, B.H.J.; Kanninen, M.; Liski, J.; Masera, O.; Mohren, G.M.J.; Nabuurs, G.J.; Palosuo, T.; et al. CO2FIX V 3.1-A Modelling Framework for Quantifying Carbon Sequestration in Forest Ecosystems; Alterra-Centrum Ecosystemen: Wageningen, The Netherlands, 2004.
  50. Dunne, T.; Leopold, L.B. *Water in Environmental Planning*; W. H. Freeman Co.: New York, NY, USA, 1978; ISBN 978-0716700791.
  51. Palma-Grayeb, B. Generación de Escenarios de Cambio Climático para la Zona Centro del Estado de Veracruz. Master's Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 2005.
  52. Tejeda-Martínez, A.; Jáuregui, E.; Acevedo, F. Atlas Climático del Estado de Veracruz; Colección; Universidad Veracruzana: Xalapa, México, 1989.
  53. Acevedo-Rosas, F.; Luna-Díaz, P. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al estado de Veracruz en el año 2005. In *Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz*; Tejeda Martínez, A., Welsh Rodríguez, C., Eds.; Universidad Veracruzana y Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología: Xalapa, México, 2006; pp. 53–67.
  54. Ticheler, H. Etude analytique de l'épidémiologie du scolyte des graines de café, Stephanodewes Izarnpei Ferr., en Côte d'Ivoire. Bachelor's Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherland, 1961.
  55. Le Pelley, R. *Las Plagas del Café*; Editorial Labor: Barcelona, Spain, 1968.
  56. Barrera, J.; Covarrubias, M. Efecto de diferentes condiciones de sombra del cafetal sobre la intensidad del ataque de la broca del grano del café, en el Soconusco, Chiapas, México. In *Proceedings of the II Congreso Nacional de Manejo Integrado de Plagas*, Guatemala, CA, USA, 20–24 February 1984.
  57. Morfin, V.; Castillo, P.; Vizcaino, G. *El Cultivo del Café (Coffea arabica L.) en Colima*; Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria INIFAP: Tecomán, Colima, 2006.
  58. Velasco Murguía, A.; Duran Medina, E.; Rivera, R.; Bray, D.B. Cambios en la cobertura arbolada de comunidades indígenas con y sin iniciativas de conservación, en Oaxaca, México. *Investig. Geográficas* **2015**, 56–74. [\[CrossRef\]](#)
  59. Ferro-Soto, C.; Mili, S. Desarrollo rural e internacionalización mediante redes de Comercio Justo del café. Un estudio del caso. *Cuad. Desarro. Rural* **2013**, 10, 267–289.

60. Bautista, E.; Ordaz, V.; Gutiérrez, M.; Gutierrez, E.; Cajuste, L. Coffee agroforestry systems in Veracruz, México: Spatial identification and quantification using GIS, remote sensing and local knowledge. *Terra Lat.* **2018**, *36*, 261–273.
61. Lin, B.B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agric. For. Meteorol.* **2007**, *144*, 85–94. [[CrossRef](#)]
62. Rahn, E.; Läderach, P.; Baca, M.; Cressy, C.; Schroth, G.; Malin, D.; van Rikxoort, H.; Shriver, J. Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: Where are the synergies? *Mitig Adapt. Strateg Glob. Chang.* **2014**, *19*, 1119–1137. [[CrossRef](#)]
63. Escamilla-Prado, E.; Escamilla-Femat, S.; Gómez-Utrilla, J.; Andrade, M.; Ramos-Elorduy, J.; Pino-Moreno, J. Uso tradicional de tres especies de insectos comestibles en agroecosistemas cafetaleros del estado de Veracruz. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* **2012**, *15*, 101–109.
64. Lin, B.B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agric. For. Meteorol.* **2010**, *150*, 510–518. [[CrossRef](#)]
65. Ruiz García, P.; Gómez Díaz, J.D.; Monterroso Rivas, A.I.; Uribe Gómez, M. Tecnologías agroforestales para una Selva Baja Caducifolia: Propuesta metodológica. *Rev. Mex. Ciencias For.* **2019**, *10*. [[CrossRef](#)]
66. Singh, G.; Gupta, G.N. Living Barriers in Indian Arid Zone and Their Ecological Benefits. *Indian For.* **2000**, *126*, 257–268.
67. Masuhara, A.; Valdés, E.; Pérez, J.; Gutiérrez, D.; Cutberto Vázquez, J.; Salcedo, E.; De Jesús Juárez, M.; Merino, A. Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Rev. Amaz. Cienc. Tecnol.* **2015**, *4*, 66–93.
68. Espinoza-Domínguez, W.; Krishnamurthy, L.; Vázquez-Alarcón, A.; Torres-Rivera, A. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Rev. Chapingo Ser. Ciencias For. Ambient.* **2012**, *18*, 57–70. [[CrossRef](#)]
69. Negash, M.; Kanninen, M. Modeling biomass and soil carbon sequestration of indigenous agroforestry systems using CO2FIX approach. *Agric. Ecosyst Environ.* **2015**, *203*, 147–155. [[CrossRef](#)]
70. Soto-Pinto, L.; Jiménez-Ferrer, G. Socio-environmental contradictions in carbon mitigation processes in agroforestry systems. *Madera Bosques* **2018**, *24*, e2401887. [[CrossRef](#)]
71. Philpott, S.M.; Lin, B.B.; Jha, S.; Brines, S.J. A multi-scale assessment of hurricane impacts on agricultural landscapes based on land use and topographic features. *Agric. Ecosyst Environ.* **2008**, *128*, 12–20. [[CrossRef](#)]
72. de Gomes, L.C.; Cardoso, I.M.; de Mendonça, E.S.; Fernandes, R.B.A.; Lopes, V.S.; Oliveira, T.S. Trees modify the dynamics of soil

- CO<sub>2</sub> efflux in coffee agroforestry systems. *Agric. For. Meteorol.* **2016**, 224, 30–39. [[CrossRef](#)]
73. Ramírez, V.H.; Jaramillo, A.; Arcila, J. Índices para evaluar el estado hídrico en los cafetales. *Cenicafé* **2010**, 61, 55–66.
74. Norton, J.L.; Hart, S.C. Hydraulic lift: A potentially important ecosystem process. *Trends Ecol. Evol.* **1998**, 13, 232–235. [[CrossRef](#)]
75. Siriri, D.; Wilson, J.; Coe, R.; Tenywa, M.M.; Bekunda, M.A.; Ong, C.K.; Black, C.R. Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. *Agrofor. Syst.* **2013**, 87, 45–58. [[CrossRef](#)]
76. Jackson, N.A.; Wallace, J.S. Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. *Agric. For. Meteorol.* **1999**, 94, 203–215. [[CrossRef](#)]
77. Whyte, K. Indigenous Climate Change Studies: Indigenizing Futures, Decolonizing the Anthropocene. *Engl. Lang. Notes* **2017**, 55, 153–162. [[CrossRef](#)]
78. Chengappa, P.G.; Devika, C.M.; Rudragouda, C.S. Climate variability and mitigation: Perceptions and strategies adopted by traditional coffee growers in India. *Clim. Dev.* **2017**, 9, 593–604. [[CrossRef](#)]

## **7. RECOMENDACIONES DE ADAPTACIÓN-MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO CON POTENCIAL DE SINERGIA EN SISTEMAS AGROFORESTALES DE CAFÉ<sup>7</sup>**

### **7.1. Resumen**

Ante la problemática del cambio climático actual y futuro es indispensable integrar acciones de adaptación y mitigación para obtener sinergias entre ambas acciones y hacer frente al cambio climático. El objetivo de esta investigación fue diseñar recomendaciones de adaptación-mitigación ante el cambio climático mediante el análisis de sus sinergias para hacer frente a los impactos del cambio climático y mantener la viabilidad actual y futura de los sistemas agroforestales de café de la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo, Chocamán, Veracruz. Estas recomendaciones se generaron con base en la evaluación del comportamiento del clima, actual y futuro utilizando los Escenarios SSP3-7 y SSP5-8.5 en el horizonte de tiempo lejano (2081-2100) en el municipio de Chocamán y mediante observaciones directas en campo en las parcelas de Catuaí Amarillo, donde se visualizó la problemática que debe ser atendida para mantener al sistema a través del tiempo. Las recomendaciones propuestas se centraron en mejorar las ya existentes, las cuales se han llevado a cabo bajo el conocimiento tradicional de los pequeños productores. Se deben realizar nuevas investigaciones en donde se consideren todos los sectores tanto políticos como sociales y académicos para incrementar el enfoque sinérgico en los sistemas cafetaleros.

**Palabras clave:** SSPs, conocimiento tradicional, amenazas climáticas, clima futuro.

---

<sup>7</sup> Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible  
Autor: Patricia Ruiz García  
Director de tesis: Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas

## **7.2. Abstract**

Faced with the problem of current and future climate change, it is essential to integrate adaptation and mitigation actions to obtain synergies between both actions and deal with climate change. The objective of this research was to design adaptation-mitigation actions in the face of climate change by analyzing their synergies to face the impacts of climate change and maintain the current and future viability of the coffee agroforestry systems of the Social Solidarity Society. Yellow Catuaí, Chocaman, Veracruz. These actions were generated based on the evaluation of current and future climate behavior using the SSP3-7 and SSP5-8.5 scenarios in the distant time horizon (2081-2100) in the municipality of Chocamán and through direct observations in the field in the plots of Catuaí Amarillo, where the problem that must be addressed to maintain the system over time was visualized. The proposed actions focused on improving the existing ones, which have been carried out under the traditional knowledge of small producers. New research should be carried out where all political, social and academic sectors are considered to increase the synergistic approach in the coffee systems.

**Keywords:** SSPs, traditional knowledge, climate threats, future climate.

### 7.3. Introducción

De acuerdo con la información del reporte del Grupo de Trabajo I del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) al Sexto Informe de Evaluación (IPCC, 2021) no hay duda de que la influencia humana es la principal responsable del calentamiento de la atmósfera con un aumento de la temperatura media global de 1.1 °C. En cuanto al régimen de lluvias, es probable que las actividades antropogénicas hayan contribuido al patrón de cambios de precipitación observados desde mediados del siglo XX. También se tiene evidencia de que las acciones antropogénicas son las responsables de que cada vez más se generen fenómenos meteorológicos y extremos climáticos en todas las regiones del mundo (olas de calor, fuertes precipitaciones, sequías y ciclones tropicales (IPCC, 2021).

Históricamente, se han utilizado escenarios de cambios globales futuros para poder estimar los efectos potenciales de las emisiones de gases efecto invernadero y sus consecuencias en el incremento de la temperatura. Destaca el uso de escenarios con modelos climáticos asociados a diferentes niveles de forzamiento radiativo (*Representative Concentration Pathways*, RCP por sus siglas en inglés). Los RCP ayudan a representar la incertidumbre sobre los efectos climáticos que habrá en un futuro con respecto al incremento de temperatura, precipitación y otras variabilidades climáticas (Moss et al., 2008).

Recientemente en el sexto informe de evaluación del IPCC se planteó el uso de escenarios denominados Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP por sus siglas en inglés) que buscan incorporar las dimensiones del cambio social esperado que podrían afectar tanto los niveles de emisiones como la adaptación al cambio climático (Escoto et al., 2017). Los SSP se combinaron con los RCP para cubrir el aspecto tanto ambiental, como social que pueden afectar el clima en un futuro.

Bajo estos nuevos escenarios, se proyecta que la temperatura seguirá aumentando en todos los escenarios de emisiones considerados. Además, se

estima que el calentamiento global de 1.5 °C y 2 °C se superará durante el siglo XXI a no ser que se reduzcan los GEI a niveles considerables (IPCC, 2021).

Además de que se incrementará la frecuencia e intensidad de los extremos cálidos, fuertes precipitaciones, sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones y la proporción de ciclones tropicales intensos. Se proyecta que el calentamiento global continuo intensificará aún más el ciclo global del agua, incluida su variabilidad, las precipitaciones monzónicas globales y la gravedad de los eventos húmedos y secos.

Ante esta problemática el último informe del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC propone la integración de las estrategias de adaptación y mitigación para obtener sinergias entre ambas acciones y hacer frente al cambio climático (IPCC, 2022). Esto es especialmente importante en la política de desarrollo entre las comunidades indígenas remotas, donde las demandas de desarrollo a menudo no han ido acompañadas de esfuerzos acordes para responder a los futuros impactos del cambio climático (Thornton & Comberti, 2017). Si bien existe consenso en que es necesario centrarse tanto en la adaptación como en la mitigación para abordar los impactos del cambio climático, se necesita una mejor comprensión de sus interacciones para maximizar de manera eficiente sus potenciales (Sharifi, 2021).

El desarrollo de los beneficios colaterales de la mitigación y la adaptación es una estrategia en la que todos ganan, y será el principal patrón de desarrollo sostenible y con bajas emisiones de carbono en el futuro. Sin embargo, los desafíos clave que aún deben abordarse a través de la investigación incluyen: identificar cómo se puede promover la eficiencia general, si existen efectos sinérgicos en las políticas existentes de fusiones y adquisiciones, y cómo evaluar y promover los cobeneficios en el cambio climático (Zhao et al., 2018).

Los sistemas agroforestales tienen la capacidad de generar acciones ganar-ganar (IPCC, 2022). Sin embargo, existen pocas experiencias y proyectos que busquen vincular las sinergias entre la mitigación y la adaptación en estos

sistemas (Canal & Andrade, 2019). El enfoque de acciones de adaptación basadas en la naturaleza, vistas a través del prisma de justicia climática, pueden integrar las acciones de adaptación-mitigación en los sistemas cafetaleros, ya que se basa en la conservación, restauración o gestión de la biodiversidad (a nivel genético, de especies o de ecosistemas) y los procesos y servicios ecosistémicos (Dookey et al., 2020; Vignola, et al., 2015). Estas prácticas aprovechan el conocimiento local y tradicional de los pequeños productores, aparte de ser de bajos costos de implementación y necesidades laborales (Munang et al., 2014).

Todavía existe información limitada sobre cómo medir el éxito de este enfoque y cuales prácticas pueden considerarse efectivas para que se den situaciones ganar-ganar, con el objeto de ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático y al mismo tiempo, generar acciones de mitigación (Donnati, 2020; Harvey et al., 2017). El modelo básico de sinergia superaditiva podría ayudar en la medición y mejora de las estrategias de adaptación basadas en la naturaleza dentro de los sistemas agroforestales de café para encontrar un punto de equilibrio. Este paradigma menciona que el todo es mayor que la suma de las partes, ya que hay un resultado mejorado cuando los componentes interactúan entre sí (von Eye et al., 1998). Con esta perspectiva se busca lograr de manera óptima múltiples cobeneficios simultáneos mientras se mantiene y mejora la funcionalidad del sistema (Duguma et al., 2014).

Para generar posibles sinergias entre adaptación-mitigación basadas en la naturaleza en sistemas agroforestales, o en su defecto, mejorarlas, es indispensable conocer el clima actual y futuro, con el objeto de identificar las principales amenazas climáticas que aquejan al sistema (IPCC, 2022). Actualmente existe información limitada sobre el clima futuro con los nuevos Escenarios SSP en la región central cafetalera de Veracruz, que es el segundo estado con mayor producción de café bajo sombra en el país (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria [CEDRSSA], 2019). Otro aspecto importante que considerar para abordar las sinergias entre

adaptación-mitigación es identificar las prácticas de intervención, comprender los procesos y abordar las compensaciones (Duguma et al., 2014).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue diseñar recomendaciones de adaptación-mitigación ante el cambio climático mediante el análisis de sus sinergias para hacer frente a los impactos del cambio climático y mantener la viabilidad actual y futura de los sistemas agroforestales de café de la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo, Chocamán, Veracruz.

#### **7.4. Materiales y Métodos**

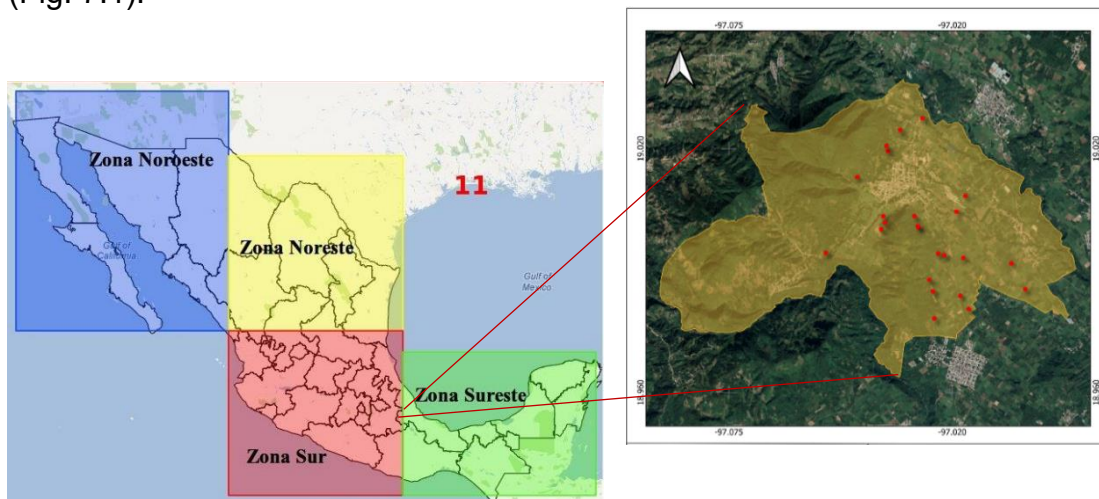
El estudio se llevó a cabo en 25 parcelas de café orgánico bajo sistemas agroforestales. Los terrenos pertenecen a productores de pequeña escala organizados en la cooperativa Catuaí Amarillo S.S.S., localizada en el municipio de Chocamán, Veracruz. La superficie de las fincas cafetaleras es variable, estando en un rango de 0.5 a 5 ha.

##### **7.4.1. Diseño de recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de sinergia**

Se adaptó la metodología que propuso Duguma et al. (2014) para encontrar sinergias entre acciones de adaptación-mitigación al cambio climático en los sistemas cafetaleros evaluados. A continuación, se describen los pasos que se siguieron:

1. **Proyección del clima futuro.** Se exploró el cambio en las variables de temperatura y precipitación del municipio de Chocamán, Veracruz con los Escenarios SSP3-7 y SSP5-8.5 para el horizonte de tiempo lejano (2081-2100). Se consideró que bajo esos escenarios los impactos potenciales serían los más severos. Se utilizaron tres modelos de circulación general CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, versión 6) disponibles en una base de datos d WorldClim (2021).

Para seleccionar los modelos que se utilizaron se retomó el análisis de desempeño propuesto por Cavazos et al. (2013). En dicho trabajo se evaluó el desempeño de 15 modelos de circulación general (MCG) del CMIP5 para el período histórico de 1961 a 2000 mediante métricas climáticas (error absoluto medio [MAE], desviación estándar [Std], correlación [r] y diagramas de Taylor) (Cuadro 7.1) a escalas anuales y estacionales, para las variables precipitación, temperatura promedio, temperatura máxima y temperatura mínima en cuatro regiones del país. Cabe mencionar que la zona de estudio se localiza en la región sureste, por lo que sólo se analizó el desempeño de los modelos en esa región (Fig. 7.1).



**Figura 7.1.** Localización del área de estudio en la zona sureste propuesta por Cavazos et al. (2013)

**Cuadro 7.1.** Métricas climáticas y fórmulas propuestas por Cavazos et al. (2013) para analizar el desempeño de los modelos de circulación general.

| Métricas climáticas        | Fórmula                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Error absoluto medio [MAE] | $MAE = 1/n \sum_{i=1}^n  D_{sim} - D_{obs} $ <p>Donde <math>D_{sim}</math> y <math>D_{obs}</math>, representan los datos simulados y observados, respectivamente, y <math>n</math> es el número de observaciones en cada punto de malla.</p> |
| Desviación estándar [Std]  | $Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$ <p>Donde <math>X_i</math> y <math>\bar{X}</math> representan el valor de una variable en un tiempo dado y <math>\bar{X}</math> es el valor promedio climatológico.</p>               |
| Correlación [r]            | $r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ <p>Donde <math>X</math> e <math>Y</math> representan dos variables</p>                                        |

En el cuadro 7.2 se muestran las métricas climáticas (error absoluto medio [MAE], desviación estándar [Std] y correlación [r]) para la variable de precipitación de los modelos CMIP5 que se tomaron de Cavazos et al. (2013) y que se homologaron con los nuevos modelos CMIP6. De acuerdo con las métricas climáticas, los modelos CMIP5 con mejor desempeño en la zona sureste para precipitación fueron CNRM-CM5, MIROC5 y MRI-CGCM3 ya que tienen una mayor correlación con respecto al clima histórico, además de que tienen menor STD y MAES. Por lo tanto, los modelos seleccionados para CMIP6 fueron los homólogos CNRM-CM6-1 (creado por el Centro Nacional de Investigaciones Meteorológicas de Francia), MIROC6 (creado por JAMSTEC, AORI, NIES y R-CCS de Japón) y MRI-ESM2-0 (creado por el Instituto de Investigación Meteorológica de la Agencia Meteorológica de Japón).

**Cuadro 7.2.** Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para precipitación para evaluar su desempeño en la región sureste de México.

| Modelo           | Correlación | STD (Desviación estándar) | MAES (Error medio absoluto) |
|------------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|
| BCC-CSM1-1       | 0.54        | 2.12                      | 4.17                        |
| <b>CNRM-CM5</b>  | <b>0.63</b> | <b>1.32</b>               | <b>3.48</b>                 |
| CanESM2          | 0.25        | 1.06                      | 3.69                        |
| IPSL-cm5a-lr     | 0.30        | 0.58                      | 2.76                        |
| MIROC-esm        | 0.34        | 1.39                      | 3.24                        |
| <b>MIROC5</b>    | <b>0.44</b> | <b>2.36</b>               | <b>3.03</b>                 |
| <b>MRI-CGCM3</b> | <b>0.63</b> | <b>1.74</b>               | <b>2.88</b>                 |

**Fuente:** Adaptado de Cavazos et al. (2013).

En los cuadros 7.3, 7.4 y 7.5, se muestran las métricas climáticas (error absoluto medio [MAE], desviación estándar [Std] y correlación [r]) para las variables de temperatura media, mínima y máxima de los modelos CMIP5. Nuevamente los modelos con mejor desempeño en la zona sureste para temperatura media, mínima y máxima fueron CNRM-CM5, MIROC5 y MRI-CGCM3 ya que tienen una mayor correlación con respecto al clima histórico, además de que tienen menor STD y MAES. Los homólogos en el caso de CMIP6 fueron CNRM-CM6-1, MIROC6 y MRI-ESM2-0.

**Cuadro 7.3.** Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura media para evaluar su desempeño en la región sureste de México

| Modelo           | Correlación | STD (Desviación estándar) | MAES (Error medio absoluto) |
|------------------|-------------|---------------------------|-----------------------------|
| BCC-CSM1-1       | 0.72        | 1.68                      | 1.96                        |
| <b>CNRM-CM5</b>  | <b>0.85</b> | <b>2.26</b>               | <b>1.67</b>                 |
| CanESM2          | 0.66        | 1.88                      | 3.56                        |
| IPSL-cm5a-lr     | 0.77        | 2.44                      | 2.12                        |
| MIROC-esm        | 0.72        | 2.56                      | 2.81                        |
| <b>MIROC5</b>    | <b>0.66</b> | <b>2.41</b>               | <b>1.86</b>                 |
| <b>MRI-CGCM3</b> | <b>0.73</b> | <b>1.62</b>               | <b>1.72</b>                 |

**Fuente:** Adaptado de Cavazos et al. (2013).

**Cuadro 7.4.** Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura mínima para evaluar su desempeño en la región sureste de México.

| Modelo           | Correlación | STD<br>(Desviación<br>estándar) | MAES (Error<br>medio absoluto) |
|------------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|
| BCC-CSM1-1       | 0.76        | 1.85                            | 3.13                           |
| <b>CNRM-CM5</b>  | <b>0.85</b> | <b>2.44</b>                     | <b>2.15</b>                    |
| CanESM2          | 0.56        | 2.22                            | 3.09                           |
| IPSL-cm5a-lr     | 0.67        | 1.71                            | 2.44                           |
| MIROC-esm        | 0.59        | 3.13                            | 3.37                           |
| <b>MIROC5</b>    | <b>0.63</b> | <b>2.12</b>                     | <b>2.73</b>                    |
| <b>MRI-CGCM3</b> | <b>0.61</b> | <b>1.99</b>                     | <b>2.85</b>                    |

**Fuente:** Adaptado de Cavazos et al. (2013).

**Cuadro 7.5.** Métricas climáticas de los modelos CMIP5 para temperatura máxima para evaluar su desempeño en la región sureste de México.

| Modelo           | Correlación | STD (Desviación<br>estándar) | MAES (Error medio<br>absoluto) |
|------------------|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| BCC-CSM1-1       | 0.83        | 1.75                         | 3.74                           |
| <b>CNRM-CM5</b>  | <b>0.72</b> | <b>2.14</b>                  | <b>1.83</b>                    |
| CanESM2          | 0.81        | 2.53                         | 3.02                           |
| IPSL-cm5a-lr     | 0.74        | 3.12                         | 3.44                           |
| MIROC-esm        | 0.67        | 2.21                         | 4.55                           |
| <b>MIROC5</b>    | <b>0.78</b> | <b>1.88</b>                  | <b>3.41</b>                    |
| <b>MRI-CGCM3</b> | <b>0.89</b> | <b>1.79</b>                  | <b>2.21</b>                    |

**Fuente:** Adaptado de Cavazos et al. (2013).

2. **Identificación de las prácticas de intervención.** Se detectaron las prácticas de adaptación con potencial de mitigación basadas en el conocimiento tradicional de los productores que podrían mejorarse o diseñarse.
3. **Comprensión de los procesos.** Se identificaron los principales cobeneficios ambientales que se generaron con la implementación de las prácticas detectadas.
4. **Abordaje de las compensaciones.** Mediante recorridos en campo se detectaron las principales amenazas de manejo del sistema y se midieron las emisiones de CO<sub>2</sub> en las cuatro estaciones del año con una cámara dinámica de flujo de gas (LI-8100A, LI-COR Biosciences).

Con la información previa del clima futuro, los pasos que propuso Duguma et al. (2014), así como el conocimiento tradicional, cultura y valores de los productores de café, se procedió a diseñar acciones sinérgicas entre adaptación-mitigación que fueran accesibles, rentables y equitativas para reducir el impacto del cambio climático en los sistemas cafetaleros evaluados.

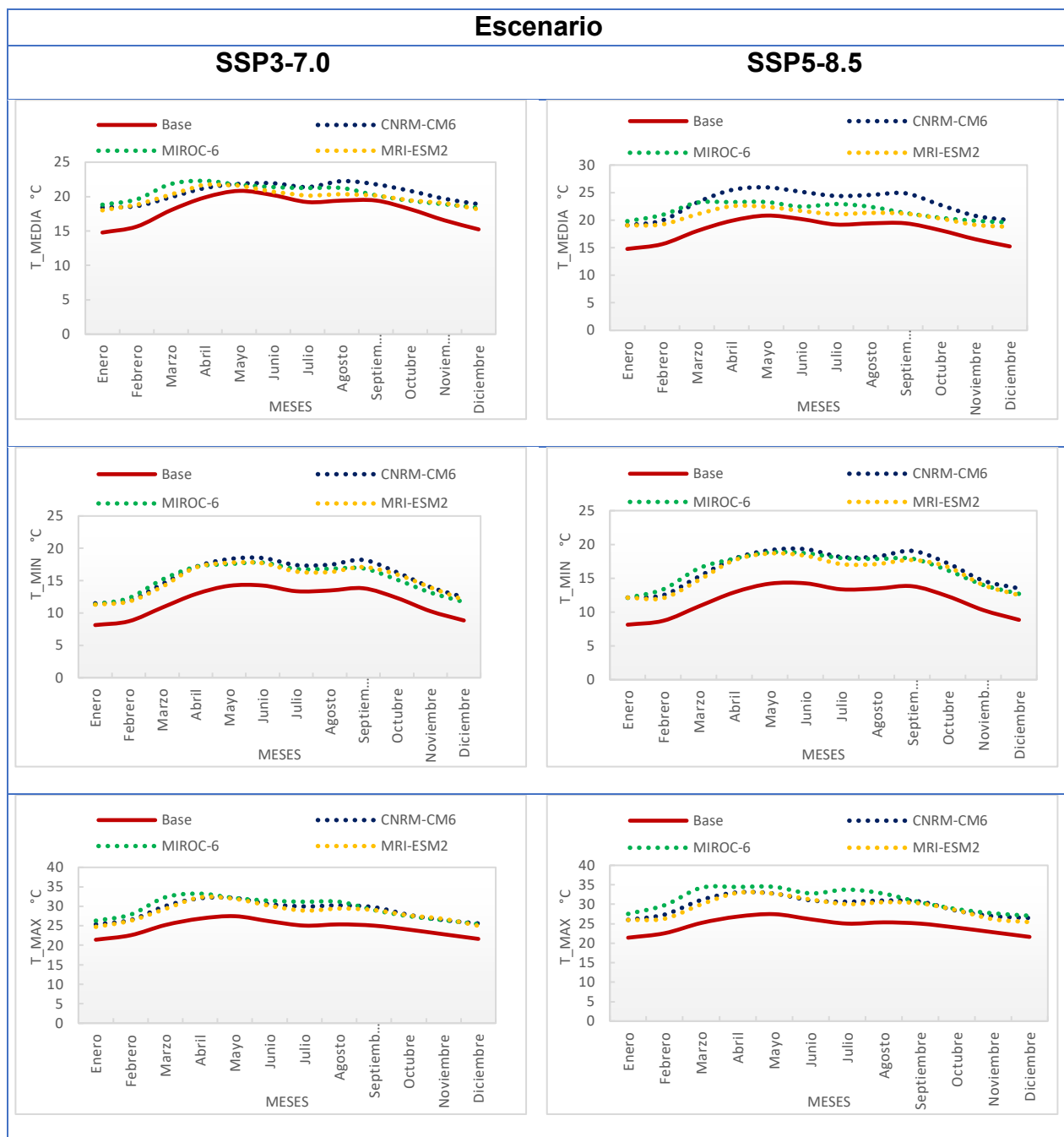
## **7.5. Resultados y Discusión**

### **7.5.1. Diseño de recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de sinergia**

#### **1. Proyección del clima futuro**

##### ***Cambios en la temperatura***

En las figuras 7.2 se muestra el comportamiento mensual de la temperatura anual, mínimas y máximas del municipio de Chocamán, Veracruz, para los datos climáticos históricos (línea base 1970-2000) y para los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos MIROC-6, CNRM-CM6 y MRI-ESM2 extraídos del WorldClim. En los cuadros 7.6, 7.7 y 7.8 se muestran las anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura anual, mínima y máxima con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Se observó que la temperatura media anual puede aumentar hasta 2.5 °C en el Escenario SSP3-7 con el modelo CNRM-CM6 en comparación con la línea base y hasta 5 °C en el Escenario SSP58.5 con el mismo modelo. Las temperaturas máximas y mínimas tendrán un incremento similar en ambos escenarios.



**Figura 7.2.** Temperatura media, mínima y máxima bajo los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos CNRM-CM6-1, MIROC6 y MRI-ESM2-0 comparada con la línea base en el municipio de Chocamán, Veracruz.

**Cuadro 7.6.** Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura anual con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Mes        | Base  | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|-------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |       | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |       | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 14.78 | 3.65           | 4.04    | 3.24     | 24.72                    | 27.32   | 21.90    | 4.30           | 5.04    | 4.27     | 29.07                    | 34.08   | 28.90    |
| Febrero    | 15.64 | 2.97           | 3.96    | 3.16     | 19.02                    | 25.30   | 20.19    | 4.28           | 5.29    | 3.57     | 27.38                    | 33.83   | 22.85    |
| Marzo      | 18.02 | 1.89           | 3.81    | 2.29     | 10.51                    | 21.15   | 12.73    | 5.15           | 5.14    | 3.03     | 28.59                    | 28.55   | 16.80    |
| Abril      | 19.89 | 1.36           | 2.40    | 1.91     | 6.85                     | 12.04   | 9.61     | 5.59           | 3.38    | 2.65     | 28.09                    | 16.99   | 13.30    |
| Mayo       | 20.83 | 1.02           | 0.88    | 0.77     | 4.88                     | 4.24    | 3.68     | 5.12           | 2.45    | 1.58     | 24.56                    | 11.76   | 7.60     |
| Junio      | 20.21 | 1.73           | 1.18    | 0.51     | 8.55                     | 5.83    | 2.53     | 4.94           | 2.24    | 1.48     | 24.47                    | 11.11   | 7.31     |
| Julio      | 19.21 | 2.18           | 2.04    | 0.89     | 11.34                    | 10.65   | 4.66     | 5.19           | 3.73    | 1.88     | 27.05                    | 19.41   | 9.78     |
| Agosto     | 19.42 | 2.83           | 1.83    | 0.95     | 14.56                    | 9.42    | 4.87     | 5.15           | 3.00    | 1.91     | 26.54                    | 15.42   | 9.84     |
| Septiembre | 19.43 | 2.35           | 0.75    | 0.74     | 12.11                    | 3.87    | 3.79     | 5.44           | 1.87    | 1.75     | 28.02                    | 9.62    | 9.02     |
| Octubre    | 18.18 | 2.66           | 1.22    | 1.31     | 14.62                    | 6.73    | 7.19     | 4.60           | 2.26    | 2.12     | 25.30                    | 12.42   | 11.68    |
| Noviembre  | 16.55 | 3.13           | 2.35    | 2.48     | 18.90                    | 14.17   | 14.97    | 4.25           | 3.33    | 2.60     | 25.64                    | 20.11   | 15.68    |
| Diciembre  | 15.24 | 3.66           | 3.13    | 2.91     | 24.02                    | 20.52   | 19.10    | 4.76           | 4.34    | 3.54     | 31.24                    | 28.51   | 23.26    |
| Anual      | 18.12 | 2.45           | 2.30    | 1.76     | 13.54                    | 12.69   | 9.73     | 4.90           | 3.51    | 2.53     | 27.04                    | 19.35   | 13.98    |

**Cuadro 7.7.** Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura mínima con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

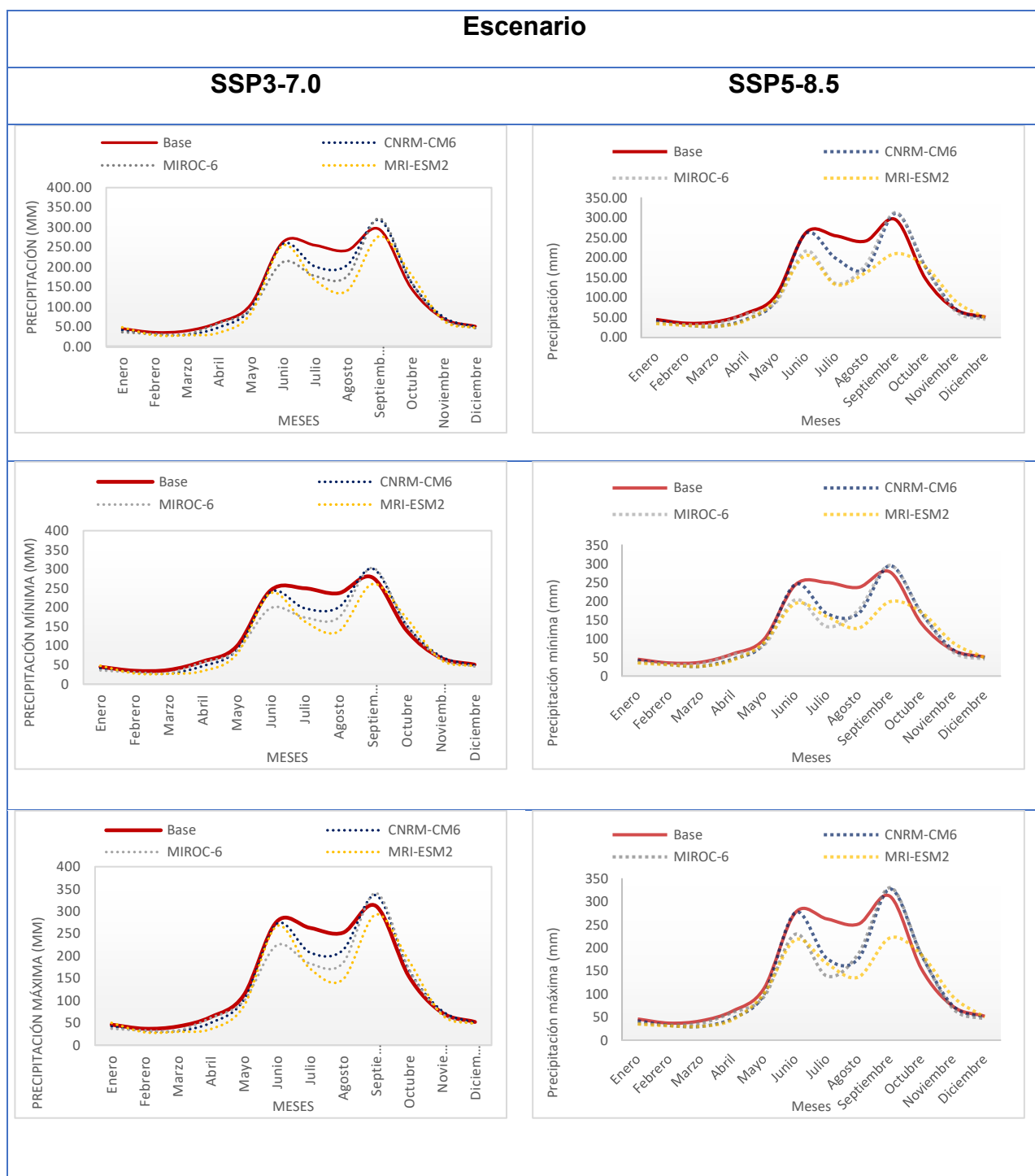
| Mes        | Base  | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|-------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |       | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |       | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 8.14  | 3.36           | 3.20    | 3.16     | 41.35                    | 39.30   | 38.89    | 4.01           | 3.96    | 4.00     | 49.34                    | 48.72   | 49.13    |
| Febrero    | 8.72  | 3.15           | 3.58    | 3.05     | 36.15                    | 41.12   | 35.00    | 3.78           | 4.65    | 3.35     | 43.41                    | 53.36   | 38.44    |
| Marzo      | 10.84 | 3.62           | 4.32    | 3.22     | 33.41                    | 39.86   | 29.72    | 4.41           | 5.62    | 3.89     | 40.63                    | 51.85   | 35.87    |
| Abril      | 12.93 | 4.20           | 4.20    | 4.10     | 32.50                    | 32.50   | 31.73    | 4.97           | 4.97    | 4.74     | 38.43                    | 38.43   | 36.63    |
| Mayo       | 14.20 | 4.13           | 3.36    | 3.56     | 29.07                    | 23.67   | 25.08    | 4.95           | 4.63    | 4.46     | 34.82                    | 32.59   | 31.42    |
| Junio      | 14.25 | 4.25           | 3.55    | 3.45     | 29.81                    | 24.89   | 24.19    | 5.05           | 4.45    | 4.08     | 35.42                    | 31.21   | 28.64    |
| Julio      | 13.37 | 4.03           | 3.43    | 3.03     | 30.16                    | 25.67   | 22.68    | 4.78           | 4.63    | 3.73     | 35.77                    | 34.65   | 27.92    |
| Agosto     | 13.48 | 3.99           | 3.35    | 2.85     | 29.57                    | 24.88   | 21.17    | 4.72           | 4.39    | 3.62     | 35.01                    | 32.54   | 26.85    |
| Septiembre | 13.82 | 4.38           | 3.08    | 3.28     | 31.67                    | 22.26   | 23.71    | 5.23           | 4.08    | 3.88     | 37.82                    | 29.50   | 28.05    |
| Octubre    | 12.34 | 3.96           | 2.83    | 3.63     | 32.09                    | 22.91   | 29.39    | 4.86           | 3.83    | 4.33     | 39.38                    | 31.01   | 35.06    |
| Noviembre  | 10.28 | 3.72           | 2.88    | 3.68     | 36.15                    | 28.05   | 35.83    | 4.37           | 3.72    | 3.72     | 42.47                    | 36.15   | 36.15    |
| Diciembre  | 8.85  | 3.59           | 2.85    | 3.15     | 40.52                    | 32.23   | 35.62    | 4.65           | 3.85    | 3.65     | 52.58                    | 43.54   | 41.27    |
| Anual      | 11.77 | 3.86           | 3.39    | 3.35     | 32.84                    | 28.78   | 28.45    | 4.65           | 4.40    | 3.95     | 39.49                    | 37.37   | 33.59    |

**Cuadro 7.8.** Anomalías y porcentaje de cambio de la temperatura máxima con respecto a la línea base en SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Mes        | Base  | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|-------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |       | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |       | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 21.42 | 3.94           | 4.88    | 3.31     | 18.41                    | 22.77   | 15.45    | 21.42          | 4.58    | 6.11     | 3.63                     | 21.37   | 28.52    |
| Febrero    | 22.57 | 3.90           | 5.30    | 3.73     | 17.28                    | 23.48   | 16.54    | 22.57          | 4.78    | 7.20     | 4.13                     | 21.19   | 31.90    |
| Marzo      | 25.20 | 4.87           | 7.13    | 4.13     | 19.31                    | 28.31   | 16.40    | 25.20          | 5.90    | 9.03     | 4.60                     | 23.41   | 35.85    |
| Abril      | 26.85 | 5.22           | 6.39    | 5.45     | 19.45                    | 23.80   | 20.32    | 26.85          | 6.20    | 7.59     | 5.59                     | 23.11   | 28.27    |
| Mayo       | 27.46 | 4.64           | 4.64    | 4.44     | 16.89                    | 16.89   | 16.16    | 27.46          | 5.29    | 7.00     | 4.82                     | 19.25   | 25.50    |
| Junio      | 26.16 | 4.37           | 5.27    | 3.97     | 16.72                    | 20.16   | 15.19    | 26.16          | 4.84    | 6.64     | 5.63                     | 18.51   | 25.39    |
| Julio      | 25.04 | 4.92           | 6.12    | 3.86     | 19.66                    | 24.45   | 15.40    | 25.04          | 5.61    | 8.72     | 6.99                     | 22.39   | 34.84    |
| Agosto     | 25.36 | 4.87           | 5.80    | 4.07     | 19.20                    | 22.88   | 16.05    | 25.36          | 5.59    | 7.37     | 6.10                     | 22.03   | 29.06    |
| Septiembre | 25.04 | 4.73           | 3.99    | 3.99     | 18.88                    | 15.95   | 15.95    | 25.04          | 5.66    | 5.46     | 5.04                     | 22.61   | 21.81    |
| Octubre    | 24.01 | 3.79           | 3.45    | 3.65     | 15.77                    | 14.38   | 15.21    | 24.01          | 4.34    | 4.75     | 4.08                     | 18.06   | 19.79    |
| Noviembre  | 22.83 | 3.64           | 3.64    | 3.94     | 15.95                    | 15.95   | 17.26    | 22.83          | 4.12    | 4.84     | 3.68                     | 18.06   | 21.20    |
| Diciembre  | 21.63 | 3.97           | 3.77    | 3.37     | 18.35                    | 17.43   | 15.58    | 21.63          | 4.87    | 5.44     | 3.73                     | 22.51   | 25.13    |
| Anual      | 24.46 | 4.41           | 5.03    | 3.99     | 18.01                    | 20.57   | 16.33    | 24.46          | 5.15    | 6.68     | 4.84                     | 21.04   | 27.31    |

### ***Cambios en la precipitación***

En la figura 7.3 se observó el comportamiento de la precipitación total anual (mm) media en la zona de estudio, así como la precipitación mínima y máxima que se puede dar en el área evaluada bajo los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos seleccionados comparados con la línea base en el municipio de Chocamán. En los cuadros 7.9, 7.10 y 7.11 se muestran las anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación total anual, mínima y máxima con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Se observó que la precipitación total anual puede disminuir hasta 250 mm en el Escenario SSP3-7 con el modelo MRI en comparación con la línea base y hasta 350 mm en el Escenario SSP58.5 con el mismo modelo. También se observó una mayor disminución de la precipitación en los meses de canícula.



**Figura 7.3.** Precipitación total anual, mínima y máxima bajo los Escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con los modelos CNRM-CM6-1, MIROC6 y MRI-ESM2-0 comparada con la línea base en la región cafetalera del centro de Veracruz.

**Cuadro 7.9.** Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación anual con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Mes        | Base  | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|-------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |       | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |       | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 45.33 | -4.00          | -9.00   | 3.33     | -8.82                    | -19.85  | 7.35     | -3.33          | -9.33   | -10.3    | -7.35                    | -20.59  | -22.79   |
| Febrero    | 36.00 | -5.00          | -4.00   | -7.33    | -13.89                   | -11.11  | -20.37   | -4.50          | -3.50   | -5.50    | -12.50                   | -9.72   | -15.28   |
| Marzo      | 39.67 | -9.67          | -8.67   | -11.0    | -24.37                   | -21.85  | -27.73   | -11.67         | -4.67   | -11.6    | -29.41                   | -11.76  | -29.41   |
| Abril      | 60.67 | -12.33         | -2.00   | -26.0    | -20.33                   | -3.30   | -42.86   | -14.67         | -2.17   | -17.6    | -24.18                   | -3.57   | -29.12   |
| Mayo       | 105.6 | -10.67         | -12.67  | -23.0    | -10.09                   | -11.99  | -21.77   | -13.17         | -17.6   | -10.6    | -12.46                   | -16.72  | -10.09   |
| Junio      | 262.6 | -4.67          | -50.00  | -8.33    | -1.78                    | -19.04  | -3.17    | -1.67          | -45.6   | -56.6    | -0.63                    | -17.39  | -21.57   |
| Julio      | 255   | -53.33         | -77.33  | -88.0    | -20.92                   | -30.33  | -34.51   | -56.50         | -119    | -122     | -22.16                   | -46.86  | -48.04   |
| Agosto     | 242   | -37.33         | -65.33  | -101     | -15.43                   | -27.00  | -42.01   | -70.00         | -59.5   | -79.5    | -28.93                   | -24.59  | -32.85   |
| Septiembre | 295.3 | 23.67          | 27.33   | -18.0    | 8.01                     | 9.26    | -6.09    | 16.17          | 18.17   | -84.8    | 5.47                     | 6.15    | -28.72   |
| Octubre    | 147.0 | 14.67          | 16.00   | 33.6     | 9.98                     | 10.88   | 22.90    | 29.00          | 29.50   | 30.50    | 19.73                    | 20.07   | 20.75    |
| Noviembre  | 70.67 | 4.00           | -2.00   | -5.00    | 5.66                     | -2.83   | -7.08    | 1.33           | -4.67   | 20.83    | 1.89                     | -6.60   | 29.48    |
| Diciembre  | 51.33 | -2.00          | -5.00   | -4.00    | -3.90                    | -9.74   | -7.79    | -1.83          | -5.83   | -1.83    | -3.57                    | -11.36  | -3.57    |
| Anual      | 1611  | -96.67         | -192.6  | -255     | -6.00                    | -11.96  | -15.85   | -130           | -224    | -349     | -8.12                    | -13.95  | -21.71   |

**Cuadro 7.10.** Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación mínima con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Mes        | Base | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |      | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |      | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 45   | -4.00          | -9.00   | 3.00     | -8.89                    | -20.00  | 6.67     | -3.00          | -9.00   | -10.0    | -6.67                    | -20.00  | -22.22   |
| Febrero    | 35   | -4.00          | -4.00   | -7.00    | -11.43                   | -11.43  | -20.00   | -4.00          | -3.00   | -5.00    | -11.43                   | -8.57   | -14.29   |
| Marzo      | 37   | -9.00          | -8.00   | -10.0    | -24.32                   | -21.62  | -27.03   | -11.00         | -4.00   | -11.0    | -29.73                   | -10.81  | -29.73   |
| Abril      | 59   | -12.00         | -2.00   | -25.0    | -20.34                   | -3.39   | -42.37   | -14.00         | -2.00   | -17.0    | -23.73                   | -3.39   | -28.81   |
| Mayo       | 98   | -10.00         | -12.00  | -21.0    | -10.20                   | -12.24  | -21.43   | -12.00         | -16.0   | -9.00    | -12.24                   | -16.33  | -9.18    |
| Junio      | 244  | -4.00          | -46.00  | -7.00    | -1.64                    | -18.85  | -2.87    | 1.00           | -40.0   | -50.0    | 0.41                     | -16.39  | -20.49   |
| Julio      | 250  | -52.00         | -76.00  | -86.0    | -20.80                   | -30.40  | -34.40   | -83.00         | -118    | -91.0    | -33.20                   | -47.20  | -36.40   |
| Agosto     | 237  | -37.00         | -64.00  | -100     | -15.61                   | -27.00  | -42.19   | -70.00         | -60.0   | -109     | -29.54                   | -25.32  | -45.99   |
| Septiembre | 278  | 23.00          | 25.00   | -17.0    | 8.27                     | 8.99    | -6.12    | 17.00          | 18.00   | -79.0    | 6.12                     | 6.47    | -28.42   |
| Octubre    | 140  | 14.00          | 15.00   | 32.0     | 10.00                    | 10.71   | 22.86    | 28.00          | 28.00   | 30.00    | 20.00                    | 20.00   | 21.43    |
| Noviembre  | 69   | 4.00           | -2.00   | -5.00    | 5.80                     | -2.90   | -7.25    | 1.00           | -5.00   | 20.00    | 1.45                     | -7.25   | 28.99    |
| Diciembre  | 51   | -2.00          | -5.00   | -4.00    | -3.92                    | -9.80   | -7.84    | -2.00          | -6.00   | -2.00    | -3.92                    | -11.76  | -3.92    |
| Anual      | 1543 | -4.00          | -9.00   | 3.00     | -8.89                    | -20.00  | 6.67     | -3.00          | -9.00   | -10.0    | -6.67                    | -20.00  | -22.22   |

**Cuadro 7.11** Anomalías y porcentaje de cambio de la precipitación máximas con respecto a la línea base en el Escenario SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Mes        | Base | SSP3-7.0       |         |          |                          |         |          | SSP5-8.5       |         |          |                          |         |          |
|------------|------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|---------|----------|--------------------------|---------|----------|
|            |      | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          | Anomalías (°C) |         |          | Porcentaje de cambio (%) |         |          |
|            |      | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6       | MIROC-6 | MRI-ESM2 | CNRM-CM6                 | MIROC-6 | MRI-ESM2 |
| Enero      | 46   | -4.00          | -9.00   | 4.00     | -8.70                    | -19.57  | 8.70     | -4.00          | -10.0   | -11      | -8.70                    | -21.74  | -23.91   |
| Febrero    | 37   | -5.00          | -4.00   | -8.0     | -13.51                   | -10.81  | -21.62   | -5.00          | -4.00   | -6.00    | -13.51                   | -10.81  | -16.22   |
| Marzo      | 42   | -10.0          | -9.00   | -12      | -23.81                   | -21.43  | -28.57   | -12.00         | -5.00   | -12.0    | -28.57                   | -11.90  | -28.57   |
| Abril      | 63   | -13.0          | -2.00   | -27      | -20.63                   | -3.17   | -42.86   | -16.00         | -3.00   | -19.0    | -25.40                   | -4.76   | -30.16   |
| Mayo       | 112  | -11.0          | -13.0   | -25      | -9.82                    | -11.61  | -22.32   | -13.00         | -18.0   | -11.0    | -11.61                   | -16.07  | -9.82    |
| Junio      | 277  | -5.00          | -53.0   | -10      | -1.81                    | -19.13  | -3.61    | 0.00           | -47.0   | -59.0    | 0.00                     | -16.97  | -21.30   |
| Julio      | 263  | -55.0          | -80.0   | -91      | -20.91                   | -30.42  | -34.60   | -86.00         | -124    | -97.0    | -32.70                   | -47.15  | -36.88   |
| Agosto     | 252  | -39.0          | -68.0   | -105     | -15.48                   | -26.98  | -41.67   | -75.00         | -64     | -115     | -29.76                   | -25.40  | -45.63   |
| Septiembre | 312  | 24.0           | 29.00   | -19      | 7.69                     | 9.29    | -6.09    | 16.00          | 19.00   | -90.0    | 5.13                     | 6.09    | -28.85   |
| Octubre    | 154  | 15.0           | 17.00   | 35       | 9.74                     | 11.04   | 22.73    | 30.00          | 31.00   | 31.00    | 19.48                    | 20.13   | 20.13    |
| Noviembre  | 73   | 4.00           | -2.00   | -5.0     | 5.48                     | -2.74   | -6.85    | 1.00           | -5.00   | 21.00    | 1.37                     | -6.85   | 28.77    |
| Diciembre  | 52   | -2.00          | -5.00   | -4.0     | -3.85                    | -9.62   | -7.69    | -2.00          | -6.00   | -2.00    | -3.85                    | -11.54  | -3.85    |
| Anual      | 1683 | -4.00          | -9.00   | 4.00     | -8.70                    | -19.57  | 8.70     | -4.00          | -10.0   | -11.0    | -8.70                    | -21.74  | -23.91   |

**2. Identificación de las prácticas de intervención.** La identificación de dichas estrategias se realizó en un trabajo previo en la zona de estudio, donde se determinó que los productores utilizan árboles y arbustos de usos múltiples para la sombra del cafetal, así como cercas y barreras vivas para proteger al suelo de la erosión hídrica (Ruiz-García et al., 2021).

**3. Comprensión de los procesos.** En un estudio previo, se detectó que el principal cobeneficio ambiental generado fue la captura de carbono aéreo (CBA) y del suelo (COS) con un potencial de captura de carbono en la línea base de 124 t ha<sup>-1</sup> y de 155 en una proyección a 50 años (Ruiz-García et al., 2022).

#### 4. Abordaje de las compensaciones

Las principales amenazas del sistema que se detectaron en los recorridos de campo fueron:

- Edad avanzada de las plantaciones. La mayoría de los cafetales tienen más de 30 años de establecidos, esto puede generar que la planta sea más susceptible a plagas y enfermedades.

- Erosión hídrica. Este proceso degradativo se está presentando en algunas parcelas que se encuentran ubicadas en las laderas con pendientes > 30%, que tienen baja densidad de árboles y alta densidad de plátano.
- Exceso de sombra. Se estimó que el 90% de las plantaciones de café tiene entre un 80 a 90% de sombra, en algunos casos se está afectando la producción de café.
- Falta de nutrientes. Las parcelas con alta densidad de plátano (>300 plantas/ha) están presentando deficiencias de P, N y K.

Se detectó que las emisiones de CO<sub>2</sub> son más altas en las estaciones de primavera y verano (Cuadro 7.12). Esto puede ser un problema si se llevan a cabo prácticas agrícolas del suelo, ya que pueden ocasionar un mayor aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

**Cuadro 7.12.** Emisiones de CO<sub>2</sub> (kg ha<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) en las diferentes estaciones del año.

| Estación del año | Emisiones de CO <sub>2</sub><br>(g m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ) | Emisiones de CO <sub>2</sub><br>(kg ha <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> ) |
|------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Primavera        | 23.10                                                                  | 231.04                                                                   |
| Verano           | 22.33                                                                  | 223.33                                                                   |
| Otoño            | 10.91                                                                  | 109.10                                                                   |
| Invierno         | 13.17                                                                  | 131.74                                                                   |

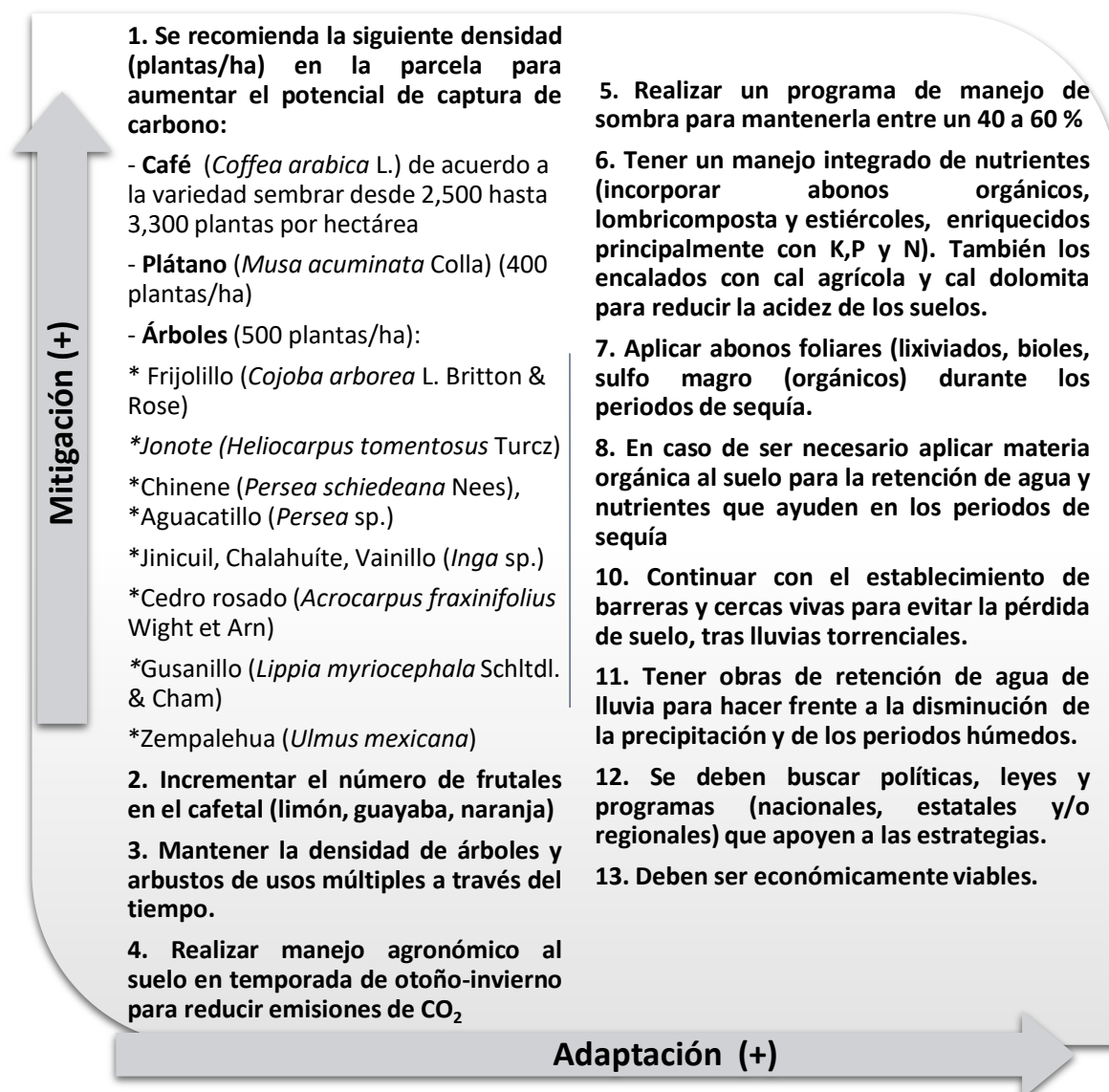
### **Recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de sinergias**

En el cuadro 7.13 se presentan algunas acciones de adaptación que tienen la capacidad de generar cobeneficios de mitigación y viceversa, además de que tienen el potencial de generar sinergias en los sistemas agroforestales de café de Catuaí Amarillo S.S.S. Las acciones propuestas se centraron en mejorar las ya existentes, las cuales se han llevado a cabo bajo el conocimiento tradicional de los pequeños productores que integran la cooperativa. Para incrementar el potencial de mitigación de las parcelas cafetaleras, se recomienda incrementar la densidad arbórea diversificada en aquellas parcelas con baja densidad,

además de que ayudarán a regular la temperatura dentro de los cafetales. Así mismo, es necesario diversificar la producción e ingresos económicos, por lo que se recomienda incrementar la densidad de frutales para que los productores no dependan del cultivo de café y puedan recuperarse más rápido en caso de existir alguna crisis cafetalera. Es importante que las actividades agronómicas del suelo se lleven a cabo en las estaciones de otoño e invierno, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Para mantener la producción del sistema se recomienda realizar un manejo de sombra que esté entre 40-60% dependiendo de la ubicación de la parcela en el terreno. Además de que es indispensable tener un manejo integrado de nutrientes para evitar deficiencias de elementos indispensables para el adecuado desarrollo del cafetal (N, P, K).

En los periodos de sequía que cada vez serán más intensos y prolongados, se recomienda aplicar abonos foliares, materia orgánica al suelo y obras de retención de agua de lluvia. Esta última acción se recomienda sólo en caso de contar con los suficientes recursos económicos para llevarla a cabo en las parcelas. Para reducir el impacto de lluvias torrenciales que están generando erosión hídrica se recomienda continuar con el establecimiento y mantenimiento de las barreras y cercas vivas. Es indispensable buscar políticas, leyes y/o programas nacionales, estatales o regionales que ayuden a llevar a cabo las acciones propuestas en esta investigación.

**Cuadro 7.13.** Recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de generar sinergias en sistemas cafetaleros de Catuái Amarillo S.S.S. Chocamán, Veracruz.



## **7.6. Conclusiones**

Mediante la metodología empleada fue posible generar recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático con potencial de sinergias para hacer frente a los impactos del cambio climático y mantener la viabilidad actual y futura de los sistemas agroforestales de café de la Sociedad de Solidaridad Social Catuaí Amarillo, Chocamán, Veracruz. Estas recomendaciones se generaron con base en la evaluación del comportamiento del clima futuro, la identificación de las prácticas de intervención, la comprensión de los procesos y el abordaje de las compensaciones. Las recomendaciones propuestas se centran en mejorar las ya existentes, las cuales se han llevado a cabo bajo el conocimiento tradicional de los pequeños productores para hacer frente a las principales amenazas climáticas y de manejo del sistema, con el objeto de mantener la viabilidad actual y futura de los sistemas cafetaleros. Por primera vez, en este trabajo se generaron los escenarios CIMP6 para la región de estudio. Con ellos, es posible analizar los posibles umbrales críticos que pueden afectar a la producción de café. También se refuerza la conclusión de que el conocimiento tradicional entraña acciones que corresponden a las llamadas Soluciones Basadas en la Naturaleza, esto es, a los co-beneficios de acciones de adaptación – mitigación. Se deben realizar nuevas investigaciones en donde se consideren todos los sectores tanto políticos como sociales y académicos para incrementar el enfoque sinérgico en los sistemas cafetaleros.

## 7.7. Literatura citada

- Canal, D.D.S., & Andrade, C.H.J. (2019). Sinergias mitigación - adaptación al cambio climático en sistemas de producción de café (*Coffea arabica*), de Tolima, Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 67(1), 36-46.
- Cavazos, T., Colorado, G., Martínez-López, B., Conde, C....et al. (2013). *Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productores de la quinta comunicación nacional*. In *Informe final* (pp. 4-151). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Centro de Ciencias de la atmósfera UNAM.
- Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. (2019). *Investigación interna. Comercio internacional del café, el caso de México*. Editorial Palacio Legislativo de San Lázaro. <https://bit.ly/3tTv4p6>
- Duguma, L., Minang, P., & Noordwijk, M. (2014). Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: from complementarity to synergy. *Environmental Management*, 54(3), 420-432.
- Escoto, C.A., Sánchez, P.L., & Gachuz, D.S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669-693. doi: <http://dx.doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf)
- Moss, R.H., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., & Zurek, M. (2008). Exploración de nuevos Escenarios para el análisis de las emisiones, de cambio climático, de sus impactos y de las estrategias de respuesta, Ginebra, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Ruiz-García, P., Monterroso-Rivas, A.I. Valdés-Velarde, E., Escamilla-Prado, E., & Gómez-Díaz, J.D. (2022). Carbon stocks in coffee agroforestry systems

in the face of climate change: case México. *Agronomía Mesoamericana*. (aceptado para su publicación).

- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A.I. (2021). Projections of Local Knowledge-Based Adaptation Strategies of Mexican Coffee Farmers. *Climate*, 9(60). <https://doi.org/10.3390/cli9040060>.
- Sharifi, A. (2021). Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Science of The Total Environment* 750, 141642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141642>.
- Thornton, T.F., & Combetti, C. (2017). Synergies and trade-offs between adaptation, mitigation and development. *Climatic Change*, 140, 5–18. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0884-3>.
- WorldClim. (2022). Mapas, gráficos, tablas y datos del clima global. Disponible en: <https://www.worldclim.org/data/index.html>.
- Zhao, C., Yan, Y., Wang, C., Tang, M., Wu, G., Ding, D. & Song, Y. (2018) Adaptation and mitigation for combating climate change – from single to joint. *Ecosystem Health and Sustainability*, 4:4, 85-94, <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1466632>.

## **8. CONCLUSIONES GENERALES**

La metodología empleada en esta investigación permitió diseñar recomendaciones de adaptación-mitigación al cambio climático en un sistema cafetalero mediante el análisis de sus sinergias bajo distintos escenarios que permitirán al sistema contar con elementos para enfrentar los efectos del cambio climático de forma programada.

Los sistemas agroforestales de café juegan un papel importante en el desarrollo sustentable de productores de pequeña escala de México. Las crisis económicas por el precio del café, la migración, plagas y enfermedades y la vulnerabilidad ante el cambio climático son amenazas que limitan la transmisión de conocimiento empírico y conllevan al abandono de los cafetales. Sin embargo, el uso de este modo de producción representa para el campesino una vía para subsistir y mantener su sistema de reproducción social.

El detalle alcanzado en las variables biofísicas, de estructura y composición en las parcelas evaluadas facilita la selección de especies que respondan tanto a las características del sitio, como a las necesidades del productor en la comunidad de Chocamán, Veracruz. Fue posible simular a una proyección de cincuenta años, las reservas de carbono en la biomasa aérea y suelo en la línea base y bajo los diferentes escenarios de cambio climático mediante el uso del modelo CO2Fix. Las reservas de C se mantuvieron a través del tiempo a causa de la permanencia de la cohorte de árboles, que fue la principal fuente de almacenaje del carbono en la biomasa aérea y suelo, tanto en la línea base como en los distintos escenarios evaluados.

Las capacidades actuales de los caficultores se ven disminuidas por fenómenos meteorológicos extremos más frecuentes e intensos, y el cambio climático puede

reducirlas aún más. Sin embargo, los agricultores están aprendiendo a hacer frente a los cambios con el mayor activo que tienen: su conocimiento tradicional y local. A través del tiempo y por generaciones, las comunidades han transmitido sus conocimientos de padres a hijos. Nuestros resultados muestran que las estrategias de adaptación de los agricultores locales son viables y cumplen muchos propósitos.

Los resultados que se generaron contribuyen en la obtención de información sobre cómo abordar el enfoque de sinergia entre adaptación y mitigación. Se identificaron algunas estrategias que pueden considerarse efectivas para que se den situaciones ganar-ganar con el objeto de ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático y al mismo tiempo, generar acciones de mitigación. Las acciones que se diseñaron se centran en mejorar las ya existentes, las cuales se han llevado a cabo bajo el conocimiento tradicional de los pequeños productores para hacer frente a las principales amenazas climáticas y de manejo del sistema. Se enfocan a reducir el estrés hídrico de la planta, aumentar la diversificación de especies y mejorar las prácticas agronómicas, al mismo tiempo que incrementan el potencial de captura de CO<sub>2</sub> y reducen las emisiones bajo distintos escenarios.

Por primera vez, en este trabajo se generaron los escenarios CIMP6 para la región de estudio. Con ellos, es posible analizar los posibles umbrales críticos que pueden afectar a la producción de café. También se refuerza la conclusión de que el conocimiento tradicional entraña acciones que corresponden a las llamadas Soluciones Basadas en la Naturaleza, esto es, a los co-beneficios de acciones de adaptación – mitigación. Para generar el modelo de sinergia que se planteó en el objetivo 3 hicieron falta más variables de interacción (económicas, políticas y sociales) por lo que se deben realizar nuevas investigaciones en donde se consideren todos los sectores tanto políticos como sociales y académicos para incrementar el enfoque sinérgico en los sistemas cafetaleros.

## 9. APÉNDICES

**Apéndice 4.1.** Superficie promedio por hectárea, altitud promedio (msnm), topoforma, tipo de clima, edad promedio del cafetal, variedades utilizadas de café y densidades por hectárea de cafeto, árboles y arbustos y plátano de las parcelas cafetaleras evaluadas en el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Parcela | Superficie promedio (ha) | Distancia media al centro de población (km) | Altitud promedio (msnm) | Topoforma                      | Tipo climático  | Tipo de manejo          | Edad promedio del cafetal                   | Variedades de café utilizadas                             | Densidad total de cafetos/ha | Densidad total de árboles y arbustos/ha | Densidad total de plátanos/ha |
|---------|--------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| 1       | 0.86                     | 1.78                                        | 1400                    | Ladera escarpada               | (A)Cb(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 3.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca, Colombia, Garnica, Typica,                    | 1920                         | 320                                     | 0                             |
| 2       | 1.88                     | 1.67                                        | 1408                    | Ladera escarpada               | (A)Cb(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 40 años   | Colombia, Oro azteca, Bourbon, y Typica.                  | 2560                         | 192                                     | 320                           |
| 2       | 1.88                     | 1.67                                        | 1408                    | Ladera escarpada               | (A)Cb(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 5.5 años<br>Planta grande: 60 años | Colombia, Costa Rica y Caturra.                           | 1280                         | 256                                     | 0                             |
| 4       | 1.59                     | 3.49                                        | 1229                    | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 3 años<br>Planta grande: 57 años.  | Typica, Colombia y Costa Rica                             | 2560                         | 64                                      | 2400                          |
| 3       | 1.76                     | 4.68                                        | 1335                    | Ladera moderadamente escarpada | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 6 años<br>Planta grande: 24 años   | Geisha, Bourbon Costa Rica, Oro azteca, Caturra y Typica, | 1664                         | 192                                     | 1216                          |
| 6       | 0.91                     | 0.73                                        | 1397                    | Ladera inclinada               | (A)Cb(fm)(i)gw" | Policultivo comercial   | Planta grande: 35 años                      | Typica, Bourbon, Garnica, Oro azteca, Geisha y Colombia.  | 2592                         | 64                                      | 1920                          |
| 4       | 1.59                     | 3.49                                        | 1229                    | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 20 años   | Bourbon, Geisha, Colombia y Oro azteca                    | 4272                         | 384                                     | 3904                          |
| 8       | 1.36                     | 3.93                                        | 1400                    | Ladera escarpada               | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 3 años<br>Planta grande: 45 años   | Oro azteca, Colombia, Garnica, Costa Rica, Typica         | 2912                         | 400                                     | 0                             |
| 5       | 9.23                     | 2.34                                        | 1330                    | Ladera moderadamente escarpada | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 40 años | Geisha, Oro azteca y Bourbon                              | 2016                         | 144                                     | 1840                          |
| 10      | 0.95                     | 4.06                                        | 1238                    | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i)gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 20 años   | Costa Rica, Oro azteca, Typica, Garnica, Colombia         | 3280                         | 208                                     | 2976                          |

|    |      |      |      |                                |                  |                         |                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                         |      |     |      |
|----|------|------|------|--------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|------|
| 6  | 0.91 | 0.73 | 1315 | Ladera inclinada               | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 36 años                                                                                           | Colombia<br>Typica, Oro<br>azteca, Garnica,<br>Costa Rica,<br>Geisha y<br>Bourbón.                                                                                                      | 1392 | 480 | 0    |
| 7  | 1.34 | 2.76 | 1266 | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i')gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 3.5 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 1.5 años<br>Planta grande: 12 y 28 años                                       | Oro azteca,<br>Colombia,<br>Garnica, Geisha<br>y Typica<br>Mundo Novo,<br>Typica,<br>Colombia y<br>Geisha.                                                                              | 4080 | 368 | 1552 |
| 13 | 1.50 | 1.69 | 1230 | Valle ligeramente ondulado     | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 18 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 15 años.                                               | Oro azteca,<br>Bourbón.<br>Colombia y<br>Typica,<br>Geisha, Oro<br>azteca y<br>Colombia.                                                                                                | 880  | 448 | 368  |
| 15 | 1.53 | 1.39 | 1373 | Ladera moderadamente escarpada | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 22 años                                                                                           | Catuai amarillo,<br>Bourbón, y<br>Typica                                                                                                                                                | 2720 | 160 | 800  |
| 9  | 1.66 | 2.52 | 1467 | Ladera escarpada               | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 3 años<br>Planta grande: 31 años<br>Renuevo: 4 años                                                                          | Costa Rica,<br>Geisha,<br>Bourbón.y<br>Typica,<br>Oro azteca,<br>Colombia, Costa<br>Rica, Typica,                                                                                       | 3472 | 512 | 0    |
| 17 | 0.52 | 1.54 | 1436 | Ladera moderadamente escarpada | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 5 años<br>Planta grande: 27 años<br>Renuevo: 3.5 años<br>Planta grande: 31 años                                              | Catuai rojo,<br>Colombia,<br>Caturra, Typica,<br>Typica, Oro<br>azteca,<br>Colombia,<br>Garnica, Costa<br>Rica, Geisha y<br>Bourbón.                                                    | 3360 | 304 | 944  |
| 10 | 0.95 | 4.06 | 1238 | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca,<br>Colombia, Costa<br>Rica, Typica,<br>Catuai rojo,<br>Colombia,<br>Caturra, Typica,<br>Typica, Oro<br>azteca,<br>Colombia,<br>Garnica, Costa<br>Rica, Geisha y<br>Bourbón. | 2875 | 368 | 9280 |
| 19 | 1.03 | 1.16 | 1470 | Ladera escarpada               | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca,<br>Catuai amarillo,<br>Bourbón y<br>Typica,<br>Colombia,<br>Geisha, Oro<br>azteca, Bourbón,<br>y Typica.<br>Geisha,Typica,<br>Bourbón,<br>Garnica, Oro<br>azteca            | 2784 | 336 | 112  |
| 11 | 1.3  | 3.38 | 1325 | Ladera moderadamente escarpada | (A)Ca(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Typica, Oro<br>azteca,<br>Colombia,<br>Garnica, Costa<br>Rica, Geisha y<br>Bourbón.                                                                                                     | 3712 | 336 | 224  |
| 21 | 1.80 | 1.52 | 1292 | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i')gw" | Policultivo comercial   | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca,<br>Catuai amarillo,<br>Bourbón y<br>Typica,<br>Colombia,<br>Geisha, Oro<br>azteca, Bourbón,<br>y Typica.<br>Geisha,Typica,<br>Bourbón,<br>Garnica, Oro<br>azteca            | 4560 | 416 | 0    |
| 12 | 1.03 | 3.73 | 1235 | Valle ligeramente ondulado     | (A)Ca(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca,<br>Catuai amarillo,<br>Bourbón y<br>Typica,<br>Colombia,<br>Geisha, Oro<br>azteca, Bourbón,<br>y Typica.<br>Geisha,Typica,<br>Bourbón,<br>Garnica, Oro<br>azteca            | 4832 | 128 | 4288 |
| 23 | 0.52 | 1.06 | 1436 | Ladera moderadamente escarpada | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo tradicional | Renuevo: 4 años<br>Planta grande: 26 años<br>Renuevo: 2 años<br>Planta grande: 25 años<br>Renuevo: 2.5 años<br>Planta grande: 30 años | Oro azteca,<br>Catuai amarillo,<br>Bourbón y<br>Typica,<br>Colombia,<br>Geisha, Oro<br>azteca, Bourbón,<br>y Typica.<br>Geisha,Typica,<br>Bourbón,<br>Garnica, Oro<br>azteca            | 2320 | 208 | 224  |

|    |      |      |      |                                     |                  |                            |                                                   |                                                                   |      |     |     |
|----|------|------|------|-------------------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|
| 13 | 1.5  | 1.69 | 1230 | Valle ligeramente<br>ondulado       | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo<br>tradicional | Renuevo: 3.5<br>años<br>Planta grande:<br>40 años | Typica, Bourbon,<br>Garnica, Oro<br>azteca, Geisha y<br>Colombia. | 2400 | 240 | 0   |
| 25 | 1.05 | 0.93 | 1450 | Ladera<br>moderadamete<br>escarpada | (A)Cb(fm)(i')gw" | Policultivo<br>tradicional | Renuevo: 2<br>años<br>Planta grande:<br>52 años   | Costa Rica, Oro<br>azteca, y Typica                               | 3360 | 304 | 928 |

**Apéndice 4.2.** Descripción de los diferentes tipos climáticos encontrados en las parcelas de café orgánico bajo sombra en el municipio de Chocamán, Veracruz.

| Clima             | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (A)Cb(fm) (i')gw" | Semicálido del grupo de los templados con verano fresco largo, húmedo, con régimen de lluvias intermedio, porcentaje de lluvia invernal menor de 18, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, con marcha anual de la temperatura tipo Ganges y presencia de canícula. |
| (A)Ca(fm) (i')gw" | Semicálido del grupo de los templados con verano cálido, húmedo, con régimen de lluvias intermedio, porcentaje de lluvia invernal menor de 18, poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, con marcha anual de la temperatura tipo Ganges y presencia de canícula.           |
| A(C) f(m) (i')gw" | Semicálido del grupo de los cálidos, húmedo, con régimen de lluvias intermedio, porcentaje de lluvia invernal menor de 18, con poca oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, con marcha anual de la temperatura tipo Ganges y presencia de canícula.                           |

**Apéndice 4.3.** Composición arbórea y arbustiva del policultivo tradicional y comercial de café orgánico en la comunidad de Chocamán, Veracruz. Se consideró como árbol aquellos especímenes que presentaron un fuste principal con la primera ramificación después de 1 m de altura. Hábito: H= herbácea, Ar= arbusto, A= árbol.

| Nombre común      | Especie                                      | Familia       | Policultivo |           | Hábito |
|-------------------|----------------------------------------------|---------------|-------------|-----------|--------|
|                   |                                              |               | tradicional | comercial |        |
| Aguacate          | <i>Persea americana</i> Mill.                | Lauraceae     | x           |           | A      |
| Aguacatillo       | <i>Persea</i> spp.                           | Lauraceae     | x           |           | A      |
| Álamo             | <i>Platanus mexicana</i> Moric.              | Platanaceae   |             | x         | A      |
| Cacahuapatl       | <i>Hamelia erecta</i> Jacq.                  | Rubiaceae     | x           |           | Ar     |
| Cacahuatillo      | N/I*                                         |               | x           |           | Ar     |
| Cacao             | <i>Virola guatemalensis</i> (Hemsl.) Warb.   | Myristicaceae | x           |           | A      |
| Cacazaca          | N/I                                          |               | x           |           |        |
| Canilla de venado | <i>Cupania dentata</i> DC                    | Sapindaceae   | x           |           | A      |
| Cedro             | <i>Cedrela odorata</i> L.                    | Meliaceae     | x           |           | A      |
| Cedro rosado      | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight et Arn | Fabaceae      | x           | x         | A      |
| Chalauite         | <i>Inga spuria</i> Humb & Bonpl. Ex Willd    | Fabaceae      | x           | x         | A      |
| Chinene           | <i>Persea schiedeana</i> Nees                | Lauraceae     | x           | x         | A      |
| Chinicuil         | <i>Inga edulis</i> Mart.                     | Fabaceae      | x           |           | A      |
| Durazno           | <i>Prunus persica</i> (L.) Stokes            | Rosaceae      | x           | x         | Ar     |
| Encino            | <i>Quercus</i> spp                           | Fagaceae      |             | x         | A      |
| Fresno            | <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh       | Oleaceae      | x           | x         | A      |
| Frijolillo        | <i>Cojoba arborea</i> (L.) Britton & Rose    | Fabaceae      | x           |           | A      |
| Frutilla          | N/I.                                         |               | x           |           | A      |
| Grevilea          | <i>Grevillea robusta</i> Cun.                | Proteaceae    | x           | x         | A      |

|               |                                                    |               |   |   |    |
|---------------|----------------------------------------------------|---------------|---|---|----|
| Guarumbo      | <i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol                 | Urticaceae    | x |   | A  |
| Guayaba       | <i>Psidium guajava</i> L.                          | Myristicaceae | x |   | Ar |
| Gusanillo     | <i>Lippia myriocephala</i> Schltdl. & Cham         | Verbenáceas   | x | x | A  |
| Huizache      | <i>Acacia pennatula</i> (Schltdl. et Cham.) Benth. | Fabaceae      | x |   | A  |
| Ilite         | <i>Alnus acuminata</i> Kunth                       | Betulaceae    | x | x | A  |
| Ixpepe        | <i>Trema micrantha</i> (L.) Blume                  | Canabaceae    | x | x | A  |
| Jinicuil      | <i>Inga jinicuil</i> Schltdl. & Cham. Ex G. Don    | Fabaceae      | x | x | A  |
| Jonote        | <i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose             | Malvaceae     | x | x | A  |
| Limón         | <i>Citrus limon</i> (L.)                           | Rutaceae      | x |   | Ar |
| Macadamia     | <i>Macadamia</i> spp.                              | Proteaceae    | x | x | A  |
| Mandarina     | <i>Citrus reticulata</i>                           | Rutaceae      | x |   | Ar |
| Berenjena     | N/I                                                |               |   | x | Ar |
| Naranja       | <i>Citrus</i> sp                                   | Rutaceae      | x | x | Ar |
| Níspero       | <i>Eriobotrya japonica</i>                         | Rosaceae      | x |   | Ar |
| Nogal         | <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams   | Juglandaceae  | x | x | A  |
| Palma         | <i>Chamaedorea</i> spp.                            | Arecaceae     | x |   | A  |
| Palo de agua  | <i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne. & Planch.  | Araliaceae    | x |   | A  |
| Pata de cabra | <i>Bauhinia</i> spp.                               | Fabaceae      | x |   | Ar |
| Pixtle        | <i>Ehretia tinifolia</i> L.                        | Boraginaceae  | x | x | A  |
| Platano       | <i>Musa acuminata</i> Colla                        | Musaceae      | x | x | H  |
| Poma rosa     | <i>Syzygium jambos</i> (L.) Alston                 | Myristicaceae | x |   | A  |
| Quebrache     | <i>Diphysa robinoides</i> Benth                    | Fabaceae      | x |   | A  |
| Quiabis       | <i>Meliosma alba</i> (Schltdl.)Walp.               | Sabiaceae     | x |   | A  |
| Iquimite      | <i>Erythrina americana</i> Mill                    | Fabaceae      | x |   | A  |
| Sauquillo     | <i>Sanbucus nigra</i> L.                           | Sabiaceae     | x | x | Ar |
| Sopa de pan   | <i>Alchornea latifolia</i> Swartz                  | Euphorbiaceae | x |   | A  |
| Tianguis      | N/I                                                |               | x |   |    |
| Merenjena     | <i>Solanum betaceum</i> Cav. Anales Hist. Nat.     | Solanaceas    | x |   | Ar |
| Vainillo      | <i>Inga vera</i> Willd                             | Fabaceae      | x | x | A  |
| Xochicuahuilt | <i>Cordia alliodora</i> (Ruíz & Pav.) Oken         | Boraginaceae  | x | x | A  |
| Zapote negro  | <i>Diospyros digyna</i> Jacq., PL. Hort. Schoenbr. | Ebenaceae     | x |   | A  |

\*No identificado

**Appendices 6.1.** Input data to run CO2Fix model in the biomass module. Example of a plot with base scenario 1 (Shade trees-coffee-living barriers).

| Cohort        | Maximum<br>aboveground<br>biomass (Mg ha <sup>-1</sup> ) | C content<br>(%) | Wood<br>density<br>(MgDM/m3) | Bio/<br>Biomax | Stem                                             | Foliage                                |                    | Branch                                 |                    | Roots                   |                    |                         |                                       |
|---------------|----------------------------------------------------------|------------------|------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------------------------|
|               |                                                          |                  |                              |                | Growth (ICA<br>m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Initial<br>C (Mg<br>ha <sup>-1</sup> ) | Relative<br>growth | Initial<br>C (Mg<br>ha <sup>-1</sup> ) | Relative<br>growth | Initial<br>C<br>(Mg/ha) | Relative<br>growth | Initial<br>C<br>(Mg/ha) | Mortality<br>(20% ST*;<br>10% coffee) |
| Shade trees   | 36.5                                                     | 0.48             | 0.6                          | 0.000          | 0.000                                            |                                        | 0.000              |                                        | 0.000              |                         | 0.000              |                         | 0.050                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.016          | 9.108                                            |                                        | 0.079              |                                        | 0.175              |                         | 0.101              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.042          | 13.790                                           |                                        | 0.180              |                                        | 0.597              |                         | 0.265              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.131          | 28.242                                           | 8.716                                  | 0.446              | 1.741                                  | 1.664              | 6.025                   | 0.814              | 2.979                   | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.156          | 16.428                                           |                                        | 0.519              |                                        | 1.976              |                         | 0.970              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.272          | 13.266                                           |                                        | 0.838              |                                        | 3.409              |                         | 1.690              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.500          | 3.000                                            |                                        | 0.800              |                                        | 3.000              |                         | 1.000              |                         | 0.050                                 |
| Coffee        | 13.99                                                    | 0.49             | 0.62                         | 0.002          | 0.670                                            |                                        | 0.001              |                                        | 0.011              |                         | 0.005              |                         | 0.030                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.009          | 3.856                                            |                                        | 0.006              |                                        | 0.066              |                         | 0.029              |                         | 0.010                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.025          | 0.528                                            | 3.791                                  | 0.016              | 0.319                                  | 0.136              | 2.649                   | 0.058              | 1.141                   | 0.010                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.057          | 0.100                                            |                                        | 0.038              |                                        | 0.317              |                         | 0.137              |                         | 0.040                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.000          | 0.000                                            |                                        | 0.000              |                                        | 0.000              |                         | 0.000              |                         | 0.050                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.001          | 0.910                                            |                                        | 0.007              |                                        | 0.017              |                         | 0.010              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.004          | 1.379                                            |                                        | 0.018              |                                        | 0.059              |                         | 0.026              |                         | 0.020                                 |
| Live barriers | 3.65                                                     | 0.48             | 0.6                          | 0.013          | 2.824                                            | 1.752                                  | 0.044              | 0.174                                  | 0.166              | 0.602                   | 0.081              | 0.297                   | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.015          | 1.642                                            |                                        | 0.051              |                                        | 0.197              |                         | 0.097              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.027          | 1.326                                            |                                        | 0.083              |                                        | 0.340              |                         | 0.169              |                         | 0.020                                 |
|               |                                                          |                  |                              | 0.050          | 0.300                                            |                                        | 0.080              |                                        | 0.300              |                         | 0.100              |                         | 0.050                                 |

ST\* = Shade tres. For all cohorts: Foliage rotation rate: stem and foliage, 0.5; branches, 0.05 and roots, 0.05.

**Appendices 6.2.** Input data to parameterize the CO2Fix model in the biomass module. Example of a plot with base scenario 3 (Shade trees-banana-coffee-living fences).

| Cohort        | Maximum aboveground biomass (Mg ha <sup>-1</sup> ) | C content (%) | Wood density (MgDM/m <sup>3</sup> ) | Bio/Biomax | Stem                                          |                                  | Foliage         |                                  | Branch          |                                  | Roots           |                                  | Mortality (20% ST; 10% coffee and banana) |
|---------------|----------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
|               |                                                    |               |                                     |            | Growth (ICA m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Initial C (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Relative growth | Initial C (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Relative growth | Initial C (Mg ha <sup>-1</sup> ) | Relative growth | Initial C (Mg ha <sup>-1</sup> ) |                                           |
| Shade trees   | 12.866                                             | 0.480         | 0.600                               | 0          | 0                                             |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0.050                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.010      | 0.122                                         |                                  | 0.018           |                                  | 0.059           |                                  | 0.021           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.027      | 0.463                                         |                                  | 0.047           |                                  | 0.090           |                                  | 0.060           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.055      | 5.672                                         | 3.267                            | 0.090           | 0.785                            | 0.184           | 1.781                            | 0.120           | 1.040                            | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.101      | 10.558                                        |                                  | 0.172           |                                  | 0.376           |                                  | 0.221           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.441      | 2.651                                         |                                  | 0.692           |                                  | 1.703           |                                  | 0.964           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.800      | 0.500                                         |                                  | 0.600           |                                  | 1.700           |                                  | 0.960           |                                  | 0.050                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0          | 0                                             |                                  | 0               |                                  |                 |                                  | 0               |                                  | 0.030                                     |
| Banana        | 1.628                                              | 0.470         | 0.200                               | 0.005      | 0.128                                         |                                  | 0.000           |                                  |                 |                                  | 0.000           |                                  | 0.010                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.009      | 2.854                                         | 0.405                            | 0.002           | 0.163                            |                 |                                  | 0.001           | 0.044                            | 0.010                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.015      | 10.616                                        |                                  | 0.006           |                                  |                 |                                  | 0.002           |                                  | 0.010                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.024      | 1.715                                         |                                  | 0.011           |                                  |                 |                                  | 0.003           |                                  | 0.010                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.050      | 0.500                                         |                                  | 0.010           |                                  |                 |                                  | 0.002           |                                  | 0.030                                     |
| Coffee        | 2.369                                              | 0.490         | 0.620                               | 0          | 0                                             |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0.040                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.006      | 0.910                                         | 0.656                            | 0.001           | 0.055                            | 0.006           | 0.458                            | 0.002           | 0.197                            | 0.030                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.049      | 0.220                                         |                                  | 0.006           |                                  | 0.046           |                                  | 0.020           |                                  | 0.010                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.050      | 0.100                                         |                                  | 0.005           |                                  | 0.040           |                                  | 0.010           |                                  | 0.200                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0          | 0                                             |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0               |                                  | 0.050                                     |
| Living fences | 3.858                                              | 0.480         | 0.600                               | 0.003      | 0.036                                         |                                  | 0.005           |                                  | 0.017           |                                  | 0.006           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.008      | 0.138                                         |                                  | 0.014           |                                  | 0.027           |                                  | 0.018           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.016      | 1.701                                         | 0.978                            | 0.027           | 0.235                            | 0.055           | 0.534                            | 0.036           | 0.312                            | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.030      | 3.167                                         |                                  | 0.051           |                                  | 0.112           |                                  | 0.006           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.132      | 0.795                                         |                                  | 0.207           |                                  | 0.510           |                                  | 0.289           |                                  | 0.020                                     |
|               |                                                    |               |                                     | 0.240      | 0.150                                         |                                  | 0.180           |                                  | 0.510           |                                  | 0.288           |                                  | 0.050                                     |

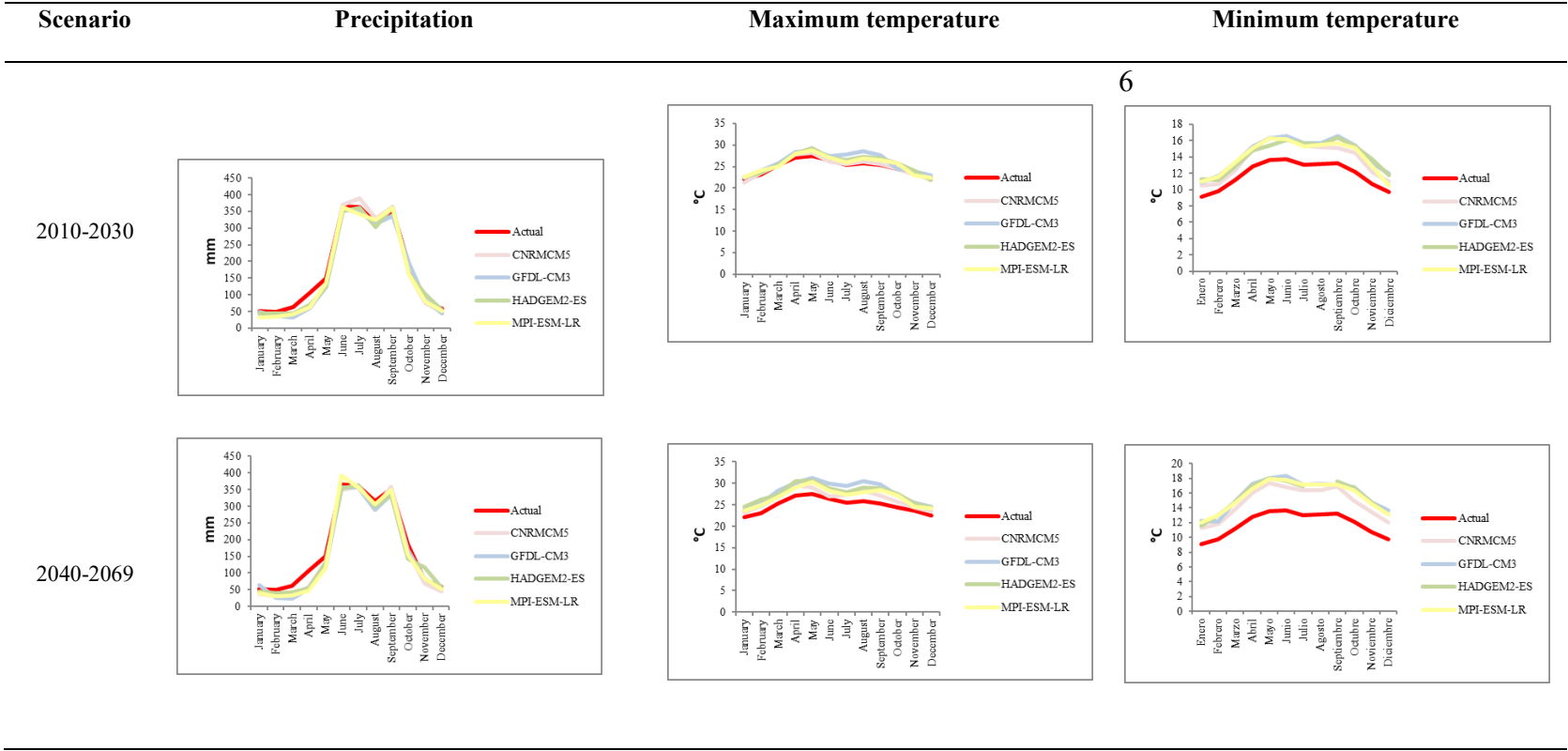
For all cohorts: Foliage rotation rate: stem and foliage, 0.5; branches, 0.05 and roots, 0.05.

### Appendices 6.3. Weather events recorded in media from 1970 to 2013

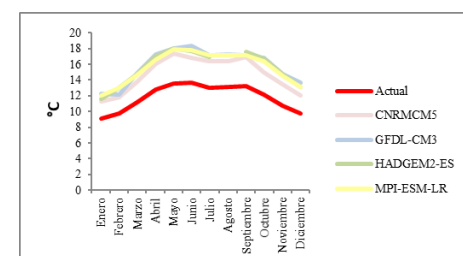
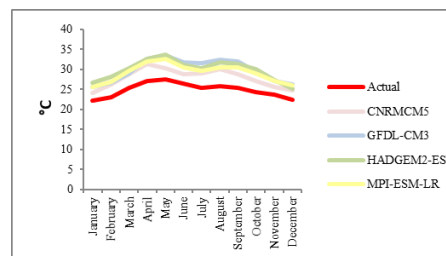
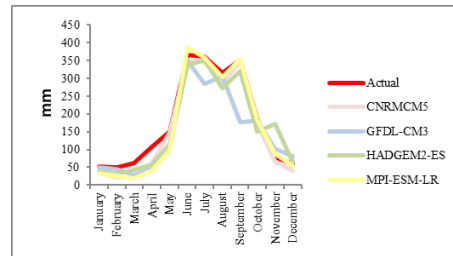
| <b>Municipality</b> | <b>Date</b> | <b>Weather event</b> | <b>Damages</b>                                                                                                   |
|---------------------|-------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coscomatepec        | 17/Nov/1970 | Snowfall             | Coffee plantations with damages. Losses in plants, grains. Low coffee quality for trade.                         |
| Coatepec            | 25/Nov/1970 | Frost                | Coffee plantations with damages. Losses in plants, grains. Low coffee quality for trade.                         |
| Coatepec            | 26/Oct/1970 | Frost                | It affected the coffee harvest, the farmers thought about changing products                                      |
| Coscomatepec        | 19/Mar/1976 | Hail                 | Crop losses                                                                                                      |
| Coatepec            | 3/May/1981  | Storm, heavy winds   | ND                                                                                                               |
| Coatepec            | 10/Jun/1996 | Frost                | Crops damages                                                                                                    |
| Coatepec            | 11/Apr/1999 | Forest fire          | ND                                                                                                               |
| Coscomatepec        | 02/May/2006 | Hail                 | Effects on agriculture and livestock                                                                             |
| Coscomatepec        | 12/Dec/2006 | Frost                | Municipality declared in emergency. Impact on agriculture and livestock.                                         |
| Coscomatepec        | 09/Jun/2008 | Landslides           | Damage to highways and roads                                                                                     |
| Coscomatepec        | 12/Sep/2009 | Heavy rains          | Damage to highways and roads                                                                                     |
| Coscomatepec        | 06/Jan/2010 | Cold front           | ND                                                                                                               |
| Coscomatepec        | 19/Sep/2010 | Heavy rains          | Victims, damages in all public services, damages to agriculture and livestock due to Hurricane Karl -category 3. |
| Coscomatepec        | 09/Aug/2012 | Heavy rains          | Damage to highways and roads due to tropical storm Ernesto                                                       |
| Coscomatepec        | 23/Sep/2013 | Heavy rains          | Hundreds of homes affected. Roads and bridges damaged by a cold front                                            |

Fuente: LaRed, 2019

**. Appendices 6.4.** Climate change scenarios of precipitation, maximum and minimum temperature with RCP 8.5 for Chocamán, Veracruz.



2070-2099



**Appendices 6.5.** Cohorts species by agroforestry design in coffee plots.

| Agroforestry design | Cohort          | Species with highest importance value            | Tree / Plant Density (ha <sup>1</sup> ) |
|---------------------|-----------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Af1                 | Shade trees     | <i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham       | 88                                      |
|                     |                 | <i>Inga vera</i> Willd                           | 96                                      |
|                     |                 | <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams | 96                                      |
| Af2                 | Coffee          | <i>Coffea arabica</i> L                          | 2600                                    |
|                     | Living barriers | <i>Bursera</i> sp.                               | 1500                                    |
|                     | Shade trees     | <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> Wight            | 32                                      |
|                     |                 | <i>Inga vera</i> Willd                           | 72                                      |
|                     |                 | <i>Juglans olanchana</i> Standl & L. O. Williams | 80                                      |
|                     |                 | <i>Coffea arabica</i> L                          | 2800                                    |
| Af3                 | Banana tree     | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 1250                                    |
|                     | Living barriers | <i>Bursera</i> sp.                               | 1600                                    |
|                     | Shade trees     | <i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham       | 40                                      |
|                     |                 | <i>Inga vera</i> Willd                           | 38                                      |
|                     |                 | <i>Coffea arabica</i> L                          | 3100                                    |
|                     | Banana tree     | <i>Musa acuminata</i> Colla                      | 1650                                    |
|                     | Living fences   | <i>Inga</i> sp.                                  | 80                                      |

**Appendices 6.6.** Water balance variables: current and future monthly humidity index and soil moisture storage, RCP 8.5 by 2099.

| Month    | Monthly humidity index |              |              |              |              |
|----------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|          | Current                | CNRM         | GFDL         | HADGEM       | MPI          |
| January  | Humid                  | Intermediate | Intermediate | Intermediate | Dry          |
| February | Intermediate           | Intermediate | Intermediate | Intermediate | Dry          |
| March    | Dry                    | Intermediate | Dry          | Intermediate | Dry          |
| April    | Dry                    | Intermediate | Dry          | Intermediate | Dry          |
| May      | Intermediate           | Humid        | Intermediate | Humid        | Dry          |
| June     | Humid                  | Humid        | Humid        | Humid        | Humid        |
| July     | Humid                  | Humid        | Humid        | Humid        | Intermediate |
| August   | Humid                  | Humid        | Humid        | Humid        | Intermediate |

|           |       |              |              |              |              |
|-----------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| September | Humid | Humid        | Humid        | Humid        | Humid        |
| October   | Humid | Humid        | Humid        | Humid        | Intermediate |
| November  | Humid | Intermediate | Humid        | Humid        | Dry          |
| December  | Humid | Intermediate | Intermediate | Intermediate | Dry          |
| Year      | Humid | Humid        | Humid        | Humid        | Intermediate |

**Appendices 6.6.** Soil moisture storage (mm) by month, current and climate change scenarios, RCP 8.5 by 2099.

