

Efecto del cambio climático en la aptitud agroclimática para la producción de café (*Coffea arabica*) en Chiapas, México

1.0. RESUMEN

El cambio climático modificará las condiciones agroclimáticas en las regiones cafetaleras, afectando su rendimiento y calidad. Este estudio evaluó su impacto en la extensión y la distribución altitudinal de las superficies aptas para la producción de *Coffea arabica* en Chiapas, México, tanto en el presente como en el futuro próximo. Se realizó una zonificación del cultivo considerando sus principales requerimientos edafoclimáticos (pH, capacidad de intercambio catiónico, textura, temperatura media, temperatura mínima del mes más frío y precipitación), clasificando las tierras en cuatro rangos de aptitud (óptimo, moderado, bajo e inadecuado). Los escenarios de aptitud futuros se evaluaron utilizando la información climática generada por el modelo MPI-ESM1-2-HR bajo 4 trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y 4 horizontes de tiempo (2020-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100). Los mapas de aptitud, generados mediante la técnica de análisis multicriterio, revelaron que, bajo el escenario de bajas emisiones (SSP1-2.6), las áreas óptimas podrían aumentar hasta un 12% en el año 2100. Sin embargo, para el mismo horizonte de tiempo, con el escenario de muy altas emisiones (SSP5-8.5), las superficies óptimas podrían reducirse hasta un 60%. Por el contrario, las zonas inadecuadas podrían incrementarse entre 68 y 361%. Además, se proyectó un desplazamiento de las áreas óptimas hacia altitudes superiores a 1,500 msnm, mientras que en las regiones de menor elevación se reducirían las superficies clasificadas como óptimas y moderadas, afectando negativamente la cantidad de parcelas y la superficie cosechada destinada a la producción de café de alta calidad.

Palabras clave: Análisis multicriterio, aptitud agrícola, modelo de cambio climático MPI-ESM1-2-HR (Max Planck Institute Earth System Model version 1.2 High Resolution), variables bioclimáticas, trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP).

2.0. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales y socioeconómicos que enfrenta el mundo en la actualidad, con efectos significativos sobre los ecosistemas naturales y los sistemas de producción agrícola. En este contexto, el estudio de la dinámica de la aptitud para la producción de café (*Coffea arabica*) es muy importante, ya que este cultivo es muy sensible a las condiciones climáticas y constituye una fuente clave de ingresos para millones de productores a nivel global. Según Chemura *et al.* (2015), *C. arabica* evolucionó como un cultivo de sotobosque en las tierras altas de África tropical, por lo cual, es sensible a las temperaturas extremas y a los cambios rápidos de temperatura.

39 Estudios previos han reportado que los aumentos de temperatura y los cambios en los
40 patrones de precipitación podrían disminuir el rendimiento y la calidad, e incrementar la
41 presión de plagas y enfermedades (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015; Avelino *et al.*, 2015). Estas
42 condiciones amenazan con desplazar las zonas aptas para la producción de café a nivel global
43 (Grüter *et al.*, 2022; Ranjitkar *et al.*, 2016; Baca *et al.*, 2014), provocando que el manejo del
44 cultivo requiera mayores inversiones, lo que podría comprometer la sostenibilidad de su
45 producción (Birthwright y Mighty, 2023; Fain *et al.*, 2018; Läderach *et al.*, 2017; Chemura
46 *et al.* 2015; Schroth *et al.*, 2009, Gay *et al.*, 2006).

47 Siendo un cultivo perenne con una larga vida útil (30 a 50 años), los efectos del cambio
48 climático resultan particularmente preocupantes para el sector cafetalero (Ranjitkar *et al.*,
49 2016; Bunn *et al.*, 2015a). Los arbustos de café están expuestos al ciclo completo de
50 variaciones climáticas estacionales a lo largo del año y requieren un período óptimo
51 relativamente largo para la producción de cerezas (Chemura *et al.*, 2015). Toma varios años
52 antes de que una nueva plantación entre en producción, por lo cual, los agricultores esperan
53 hasta 4 años antes de beneficiarse de las decisiones de manejo implementadas (de Sousa *et*
54 *al.*, 2019).

55 Las proyecciones generadas a partir de los modelos de circulación global indican que los
56 cambios en la temperatura y patrones de precipitación modificarán la aptitud de las tierras
57 para *C. arabica* (Grüter *et al.*, 2022; Baca *et al.*, 2014). En Brasil y Vietnam, se proyecta que
58 hasta un 60% de las áreas actualmente aptas para el cultivo de café dejarán de serlo hacia
59 finales del siglo, impactando en la sostenibilidad de estas regiones (Tavares *et al.*, 2018).
60 Ante esta situación, en regiones como Indonesia, los agricultores han comenzado a trasladar
61 los cultivos a mayor altitud para aprovechar condiciones más favorables (Bakri *et al.*, 2018);
62 no obstante, este cambio puede conllevar problemas ambientales, como la deforestación y el
63 uso insostenible del suelo en zonas de alta biodiversidad o ecosistemas frágiles, como los de
64 alta montaña (Schroth *et al.*, 2009). La disminución de la aptitud climática para el cultivo y
65 el incremento de los costos asociados a las estrategias de adaptación dificultan aún más la
66 sostenibilidad, especialmente para los pequeños productores en el cinturón tropical (Bracken
67 *et al.*, 2023).

68 Por esta razón, es muy importante identificar y mapear las áreas adecuadas para la producción
69 sostenible de café, tanto en las condiciones climáticas actuales como en las proyectadas
70 (Ranjitkar *et al.*, 2016). En Zimbabue, esta estrategia de planeación ante el cambio climático,
71 ha sido considerada una herramienta básica para que el café siga contribuyendo a la economía
72 nacional (Chemura *et al.*, 2015). Chemura *et al.* (2021), destacan que, en Etiopía, la pérdida
73 del estatus de café de especialidad en el mercado, al producir en condiciones de menor
74 aptitud, puede desincentivar su producción, llevándolos a optar por cultivos alternativos.
75 Asimismo, en Jamaica, la disminución en la calidad y el rendimiento del café amenaza la
76 competitividad de los productores en el mercado global (Birthwright y Mighty, 2023).

77 Particularmente, en la Sierra Madre de Chiapas, Schroth *et al.* (2009) resaltan que el cultivo
78 de café bajo sombra tiene una gran importancia ecológica y cultural, por lo que comprender
79 la vulnerabilidad de esta región al cambio climático y desarrollar opciones de adaptación

80 basadas en los ecosistemas podrían servir como modelo para las regiones montañosas de
81 otras partes del mundo. Las prácticas agroforestales en el café ofrecen soluciones basadas en
82 la naturaleza para mitigar y adaptarse a los desafíos del cambio climático, promoviendo la
83 sostenibilidad y resiliencia de los sistemas agrícolas (Koutouleas *et al.*, 2022; Davidson,
84 2004). Shinbrot *et al.* (2019) refuerzan esta idea, señalando que la adaptación al cambio
85 climático en comunidades cafetaleras requiere enfoques multidimensionales, como la
86 diversificación de cultivos y la integración de estrategias locales de gestión comunitaria.

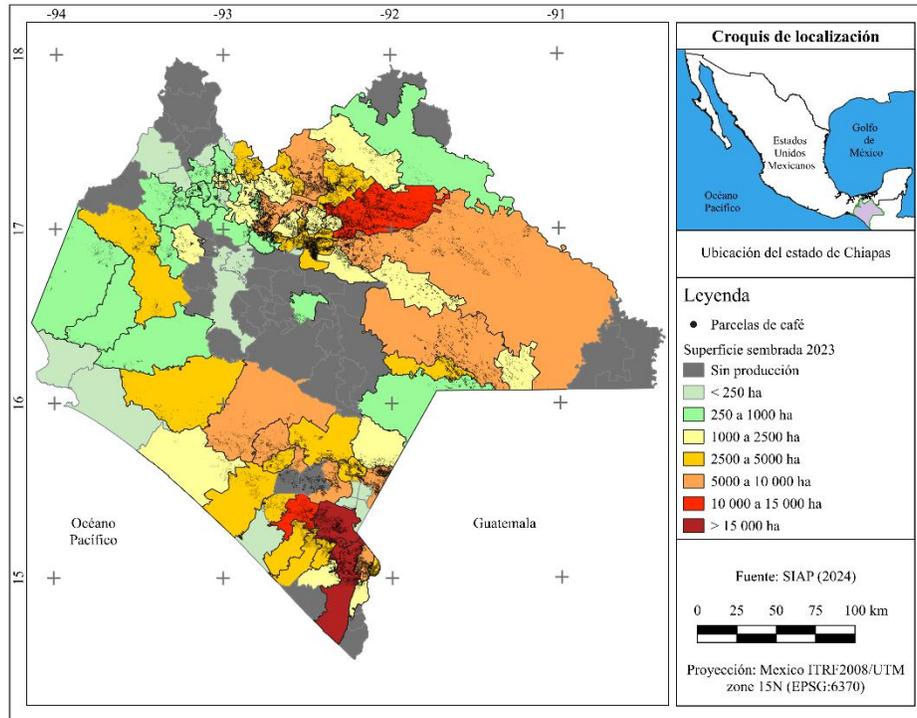
87 Aunque se han realizado estudios sobre los efectos del cambio climático en las zonas aptas
88 para la producción de café a nivel global, existe una notable escasez de investigaciones a
89 escala local. Este trabajo aborda cómo el aumento global de las temperaturas y los cambios
90 en los patrones de precipitación, vinculados al cambio climático, podrían transformar las
91 áreas óptimas para la producción de café en el estado de Chiapas. Para ello, se plantearon
92 tres objetivos: (1) identificar el grado de aptitud actual de las tierras para el cultivo de *C.*
93 *arabica* en el estado; (2) estimar el impacto del cambio climático en las zonas aptas utilizando
94 diferentes escenarios climáticos, basados en el modelo del sistema terrestre del Instituto Max
95 Planck (MPI-ESM1-2-HR); y (3) evaluar cómo los cambios de aptitud de las tierras
96 afectarían la distribución y cantidad de parcelas en cada categoría de aptitud.

97

98 3.0. MATERIALES Y MÉTODOS

99 3.1. Área de estudio

100 El estudio se realizó en el estado de Chiapas, principal productor de *C. arabica* en México.
101 Dicha entidad cuenta con 123 municipios, de los cuales, 87 registran superficie sembrada
102 (Figura 1). A nivel estatal, el cultivo de café abarca una superficie de 243 946 ha, destacando
103 los municipios de Tapachula y Motozintla con 24 880 y 15 894 ha sembradas,
104 respectivamente (SIAP, 2024).



105

106 Figura 1. Ubicación del área de estudio, rangos de superficie sembrada y parcelas cultivadas
 107 con café en el estado de Chiapas.

108

109 **3.2. Datos edafoclimáticos**

110 Para la zonificación actual del cultivo se utilizó el pH, la textura, la capacidad de intercambio
 111 catiónico (CIC), la temperatura media (Tmed), la temperatura mínima del mes más frío
 112 (Tmin) y la precipitación total anual (PP). Los rangos óptimos para el cultivo se obtuvieron
 113 de la literatura especializada y se clasificaron en cuatro niveles de aptitud: óptimo, moderado,
 114 bajo e inadecuado (Tabla 1). En la Tabla 2 se presentan las fuentes de información utilizadas.
 115 Siguiendo a Chemura *et al.* (2015) se definió a la aptitud como la capacidad de una superficie
 116 para completar el ciclo de producción del café desde el establecimiento hasta la cosecha.

117 La información se procesó en formato ráster, utilizando un tamaño de pixel mínimo acorde
 118 con la capa de mayor resolución (0.25 km). Se asumió que las propiedades del suelo (pH,
 119 CIC y textura) permanecieron constantes en los diferentes escenarios y horizontes de tiempo.
 120 Por otro lado, para las variables climáticas (Tmed, Tmin y PP) se utilizó la información
 121 generada por el modelo climático MPI-ESM1-2-HR (Max Planck Institute Earth System
 122 Model, versión 1.2, alta resolución). Se utilizaron las proyecciones de cuatro horizontes de
 123 tiempo (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100) bajo las trayectorias
 124 socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP por sus siglas en
 125 inglés) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Dichos escenarios consideran diferentes

126 niveles de forzamiento radiativo, y describen posibles trayectorias que la sociedad, la
 127 economía y el medio ambiente podrían seguir hasta finales del siglo XXI.

128 Tabla 1. Rangos de las variables utilizadas para determinar la aptitud de las tierras para el
 129 cultivo de café.

Variable	Grado de aptitud				Fuente
	Óptimo	Moderado	Bajo	Inadecuado	
pH	5.5-6.5	6.5-7.0 y 5.0-5.5	7.0-7.5 y 4.5-5.0	>7.5 y <4.5	Sys <i>et al.</i> (1993)
Textura	Media	fina		gruesa	López-Carmona <i>et al.</i> (2021)
CIC (mmol (+) kg ⁻¹ de arcilla)	>240	160-240	<160		Sys <i>et al.</i> (1993)
Temperatura media (°C)	17-22	22-25 y 15-17	25-28 y 12-15	>28 y <12	Grüter <i>et al.</i> (2022)
Temperatura mínima del mes más frío (°C)	10 a 19	19-21 y 7-10	21-23 y 4-7	>23 y <4	Sys <i>et al.</i> (1993)
Precipitación media anual (mm)	1400-1800	1800-2300 y 1000-1400	2300-4200 y 750-1000	>4200 y <750	Grüter <i>et al.</i> (2022)

130 Tabla 2. Variables utilizadas en la determinación de la aptitud actual y futura de las tierras
 131 del estado de Chiapas para el cultivo de café.

Variable	Fuente de datos	Dirección de la página de internet	Resolución espacial (km)	Autores	
pH	SoilGrids: (pH del suelo 0-5 cm de profundidad)	https://files.isric.org/soilgrids/latest/data/	0.25	Hengl <i>et al.</i> (2017)	
CIC	SoilGrids: (CIC del suelo 0-5 cm de profundidad)	https://files.isric.org/soilgrids/latest/data/	0.25	Hengl <i>et al.</i> (2017)	
Textura	Edafología 2006 (Serie II)	https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/	Sin resolución espacial	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)	
Temperatura media	WorldClim: version 2.0 (BIO 1)	https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html	0.90	Hijmans <i>et al.</i> (2005); Fick y Hijmans (2017)	
Temperatura mínima del mes más frío	WorldClim: version 2.0 (BIO 6)	https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html	0.90	Hijmans <i>et al.</i> (2005); Fick y Hijmans (2017)	
Precipitación total anual	WorldClim: version 2.0 (BIO 12)	https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html	0.90	Hijmans <i>et al.</i> (2005); Fick y Hijmans (2017)	

133 Para generar el mapa de aptitud actual y de cada horizonte de tiempo, se aplicó la técnica de
134 suma lineal ponderada, una de las metodologías más sencillas y ampliamente utilizadas en la
135 evaluación multicriterio. Esta técnica ha sido reconocida por su flexibilidad y simplicidad en
136 la integración de múltiples variables para la toma de decisiones espaciales (Delgado y Sendra,
137 2004). En este trabajo, se utilizó la forma más simple de esta técnica, asignando el mismo
138 peso a todas las variables consideradas (Manzano, 2019). Cada variable se reclasificó en
139 función de los rangos de aptitud definidos (Tabla 1), asignando valores del 1 al 4 (1: óptimo,
140 2: moderado, 3: bajo y 4: inadecuado). Generando un mapa de aptitud individual por variable.

141 Con la suma de las capas reclasificadas se obtuvo un ráster con valores de 6 a 24 que se
142 reclasificó de la siguiente manera: a los píxeles con valores de 6 y 7 se les asignó el grado
143 óptimo; 8 y 9 el moderado; 10, 11 y 12 el bajo; y a los mayores de 12 el inadecuado. Se
144 excluyeron los cuerpos de agua, las zonas urbanas, los polígonos de los asentamientos rurales
145 y los distritos de riego. Sin embargo, las áreas naturales protegidas no se excluyeron, para
146 identificar las zonas que podrían experimentar algún tipo de presión social ante el cambio
147 climático (Birthwright yMighty, 2023). Como resultado, se obtuvo un mapa de aptitud actual
148 y 16 mapas de aptitud proyectados para escenarios futuros.

149

150 3.3. Análisis de la información

151 La información manejada en este estudio se estructuró en cuatro etapas:

- 152 1. Análisis de las variables climáticas: Se evaluó el grado de aptitud de seis variables
153 bajo el escenario actual, junto con el porcentaje de cambio en su aptitud en diferentes
154 horizontes temporales y SSP.
- 155 2. Comparación de superficies aptas: Se compararon las áreas correspondientes a cada
156 grado de aptitud bajo el escenario actual con las proyectadas en los mapas de aptitud
157 futura.
- 158 3. Dinámica de la aptitud futura: Se examinó cómo la aptitud futura se relaciona con las
159 condiciones actuales, categorizándola en cinco rangos altitudinales (<500 m, 500-
160 1000 m, 1000-1500 m, 1500-2000 m, y >2000 m). Para conocer las áreas ocupadas
161 por cada rango altitudinal se utilizó el modelo digital de elevación del estado de
162 Chiapas con una resolución espacial de 30 m descargado del portal Geoweb Chiapas
163 3.0 (<https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>). Este análisis permitió inferir un
164 posible desplazamiento de las zonas aptas hacia regiones de mayor altitud.
- 165 4. Distribución de parcelas: Se analizó la distribución de 324 768 parcelas cultivadas
166 con café (Figura 1), en función de la aptitud actual y futura. La información de las
167 parcelas fue obtenida a través del portal Geoweb Chiapas 3.0
168 (<https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>).

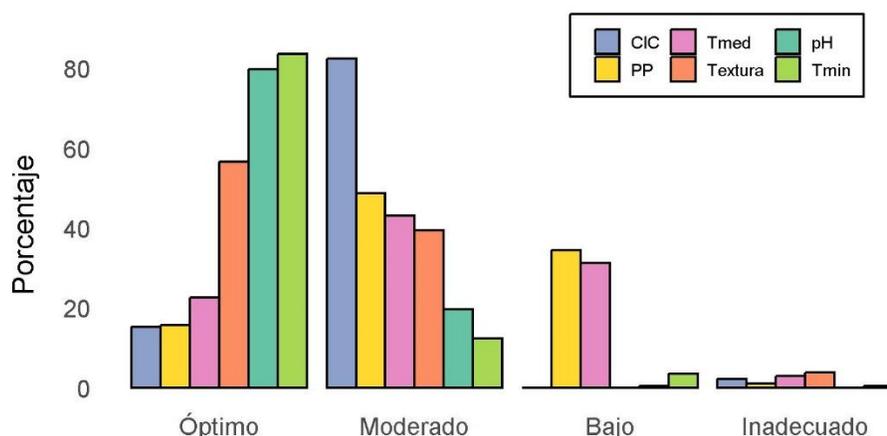
169 Los análisis de la información se realizaron en el *software* QGIS versión 3.34.11, utilizando
170 el sistema de referencia de coordenadas EPSG:6370 - Mexico ITRF2008 / UTM zone 15N.

171

172 4.0. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

173 4.1. Dinámica de la aptitud de las variables en el escenario actual y futuro

174 En la Figura 1 se observa que la CIC, la PP y la Tmed fueron las variables más limitantes
175 para que las tierras de Chiapas alcanzaran el grado de aptitud óptimo, contribuyendo con el
176 15, 16 y 23% de la superficie estatal, respectivamente. En contraste, variables como la textura
177 del suelo, el pH y la Tmin tuvieron una contribución mayor al grado óptimo (57, 80 y 84%,
178 respectivamente). Para las variables limitantes es necesario implementar medidas que
179 contribuyan a mantener o incrementar el grado de aptitud óptimo.



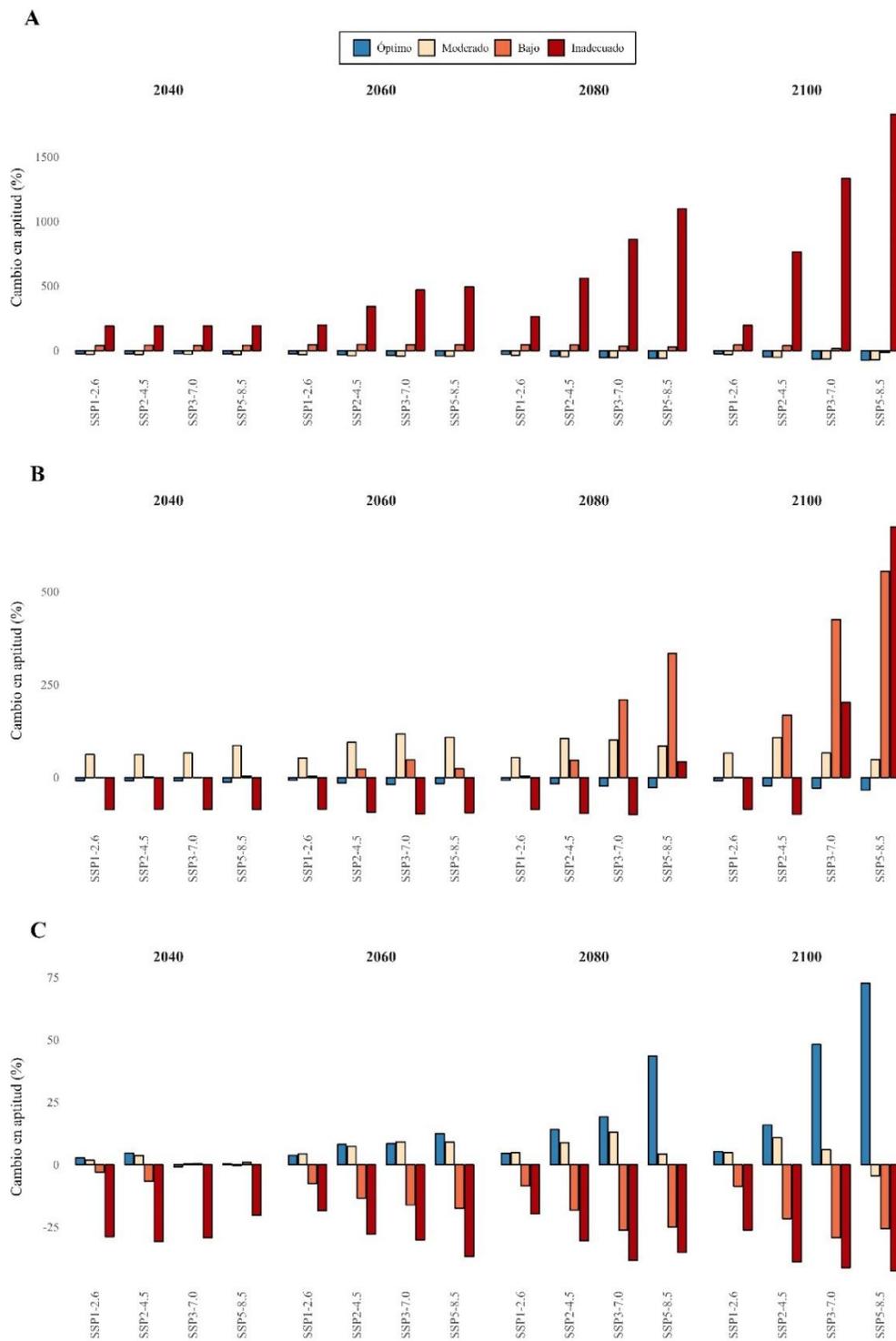
180

181 Figura 2. Distribución porcentual de la superficie según el grado de aptitud para el cultivo
182 de *C. arabica*.

183 La Figura 3 expone el porcentaje de cambio de aptitud de las condiciones futuras de la Tmed
184 (Figura 3A), la Tmin (Figura 3B) y la PP (Figura 3C), respecto a las condiciones actuales.
185 La Tmed manifiesta una disminución en las tierras con grado óptimo y moderado, así como
186 un incremento de las tierras con grado de aptitud bajo e inadecuado. La Tmin muestra una
187 disminución en los grados óptimo e inadecuado, mientras que los grados de aptitud moderado
188 y bajo se incrementan. La reducción en las áreas óptimas es más significativa en los
189 escenarios con mayor forzamiento radiativo.

190 En general, la PP revela un incremento de las áreas con grado de aptitud óptimo y moderado.
191 Mientras que, las áreas con aptitud baja e inadecuada se reducen, lo que podría estar
192 relacionado con un balance hídrico más favorable en ciertas regiones. Sin embargo, aunque
193 los cambios en la PP podrían ampliar las áreas óptimas, también plantea riesgos relacionados
194 con la variabilidad climática, incluyendo lluvias intensas y períodos prolongados de sequía
195 (Schroth *et al.*, 2009; Gay *et al.*, 2006). De acuerdo con Schroth *et al.* (2009), los cambios de
196 temperatura y precipitación también alterarán la presión de plagas y enfermedades, a las que
197 los agricultores deberán adaptar sus prácticas de manejo. Además, de la amenaza que
198 presentan el aumento gradual de la temperatura y la variación de las tasas de precipitación

199 sobre el café (Lin *et al.*, 2008); también se debe considerar el efecto que tienen los eventos
 200 meteorológicos extremos, como los huracanes, sobre este cultivo (Holt-Giménez, 2002).



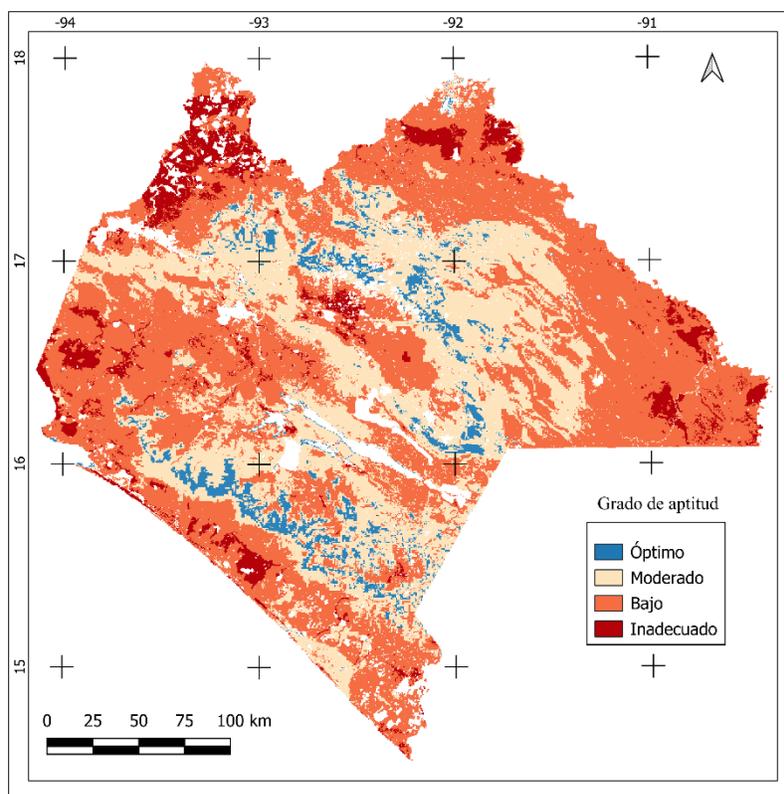
201

202 Figura 3. Dinámica del grado de aptitud de la Tmed(A), la Tmin (B) y la PP (C).

203 4.2. Comportamiento de la aptitud en el escenario actual y escenarios futuros

204

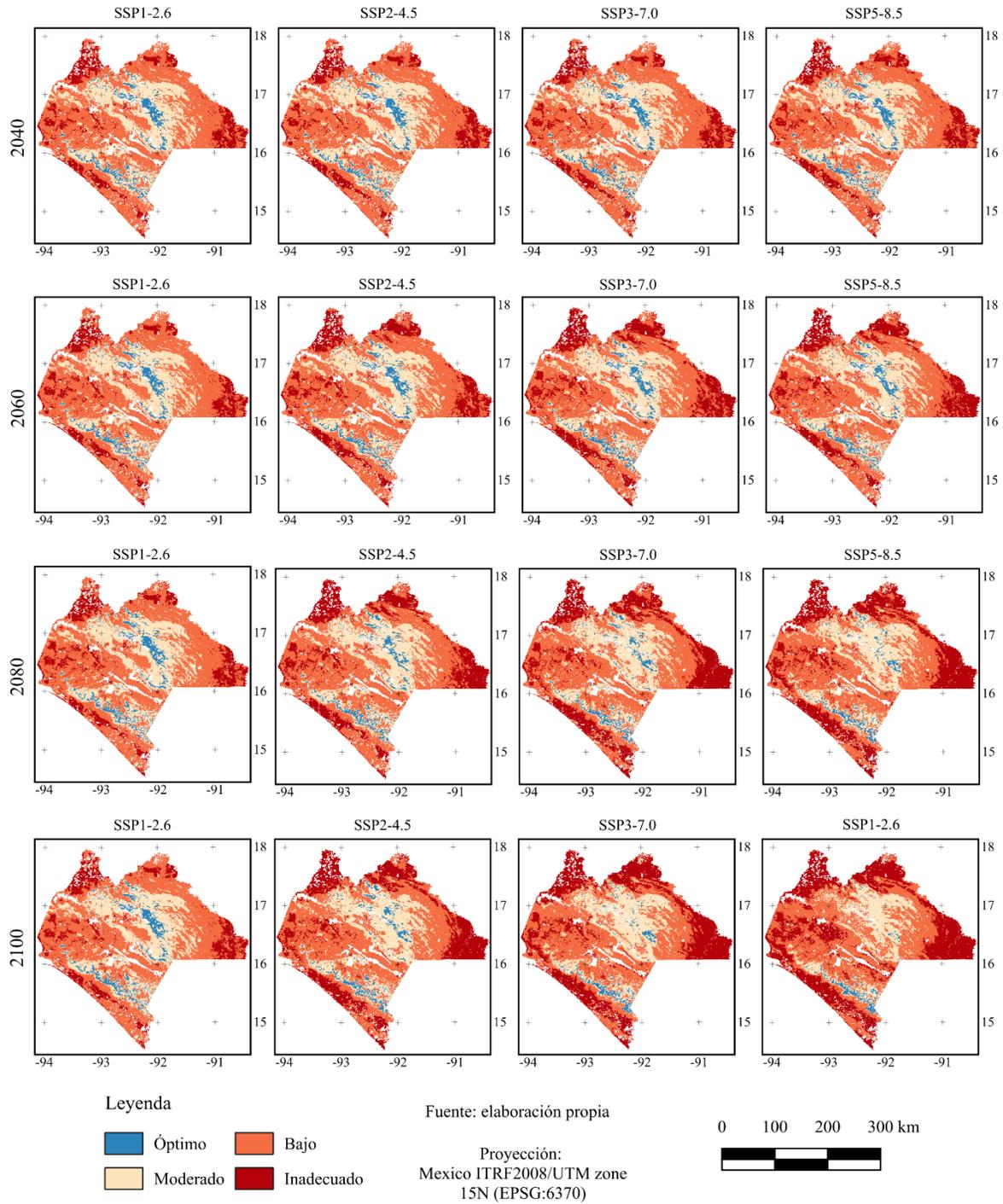
205 En la Figura 4 se muestra el mapa de aptitud actual, la superficie estatal evaluada cubrió 6
206 757 019 ha. Las tierras con grado óptimo, moderado, bajo e inadecuado abarcaron el 4.5,
207 33.7, 54.3 y 7.5% de la superficie evaluada, respectivamente. Por lo cual, las tierras con las
208 condiciones óptimas son limitadas, de manera que es importante implementar estrategias de
209 manejo sostenible para aprovechar y conservar las tierras más productivas.



210

211 Figura 4. Mapa de aptitud actual.

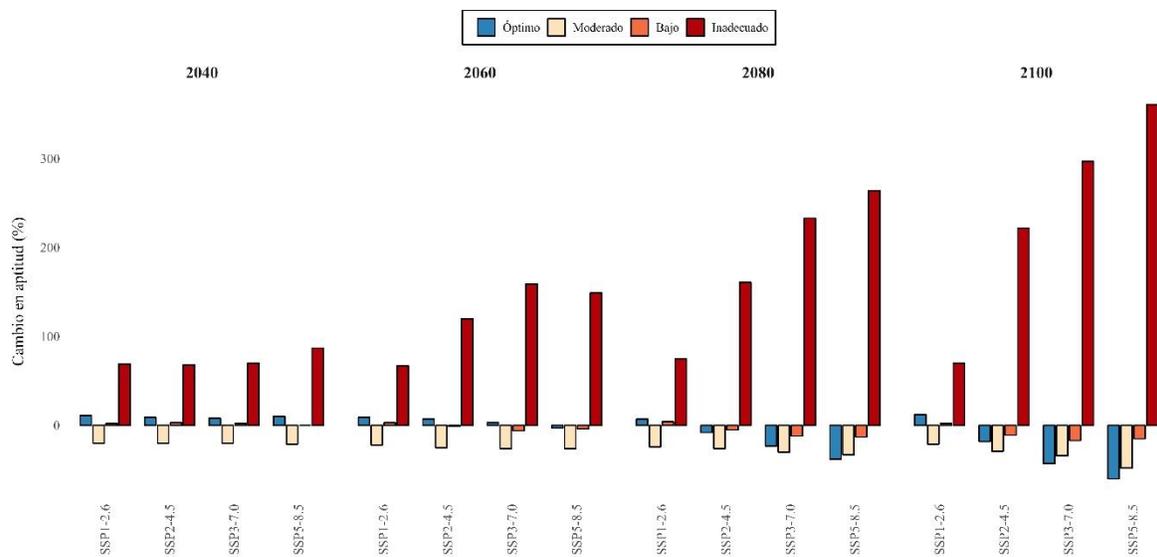
212 En la Figura 5 se presentan los 16 mapas de aptitud generados, en esta se observa una
213 reducción en las zonas clasificadas como óptimas y un incremento en las zonas inadecuadas,
214 particularmente en 2080 y 2100 para los SSP3-7.0 y SSP5-8.5. La disminución de las zonas
215 óptimas es más acentuada en el norte del estado (Figura 5), lo cual concuerda con lo reportado
216 por Baca *et al.* (2014). No obstante, debido a que la interpretación visual resulta difícil, se
217 realizó una comparación cuantitativa entre los grados de aptitud actual y los proyectados
218 (Figura 6).



219

220 Figura 5. Mapas de aptitud futuros de las tierras del estado de Chiapas.

221



222

223 Figura 6. Comparación del grado de aptitud actual respecto a los proyectados.

224

225 En la Figura 6 se puede notar que el grado de aptitud óptimo se incrementa para los cuatro
 226 SSP en 2040, en ese sentido el SSP1-2.6 muestra incrementos en las superficies con grado
 227 óptimo de hasta 12% en 2100. En cambio, para 2080 y 2100 las SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-
 228 8.5 muestran una reducción de los tres grados de aptitud. Las mayores reducciones de áreas
 229 óptimas se obtuvieron bajo el SSP5-8.5 con el 38 y 60% para 2080 y 2100, respectivamente.
 230 En relación con las zonas de aptitud moderada, se observa una reducción general en cada
 231 SSP y horizontes de tiempo, acentuándose hacia finales del siglo. Por último, las zonas
 232 inadecuadas presentan un incremento (Figura 6). Esto subraya la necesidad de desarrollar e
 233 implementar estrategias de adaptación que mitiguen estos impactos y fomenten el uso
 234 eficiente de las tierras que conservarán su aptitud en el futuro.

235

236

237 La tendencia en la disminución de zonas aptas para *C. arabica* también fue documentada por
 238 Grüter *et al.* (2022) en un estudio realizado a nivel mundial y por Birthwright y Mighty
 239 (2023) en Jamaica. De forma adicional, Ranjitkar *et al.* (2016) encontraron que en Nepal se
 240 espera una reducción de hasta 72 % en las áreas adecuadas para la producción de café para
 241 el año 2050. Por su parte, Läderach *et al.* (2017) encontraron que en Nicaragua se espera una
 242 reducción en la superficie apta en más del 90% de las regiones áreas de cultivo para el mismo
 243 periodo. Las altas diferencias en el porcentaje de disminución de los territorios óptimos
 244 reportados por estos autores con respecto a los obtenidos en este trabajo, se atribuye se
 245 atribuye a los modelos climáticos y a la fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos
 246 Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project, CIMP por sus siglas en inglés)
 247 empleados para determinar las regiones óptimas para el café.

248

249

250

251

252 4.3. Aptitud de las tierras en función de la altitud

253

254 La Tabla 3 expone el porcentaje de la superficie del estado que se encuentra en los cinco
255 rangos de altitud seleccionados (<500, 500-1000, 1000-1500, 1500-2000 y >2000). De
256 acuerdo con esta información, cerca del 70 % de la superficie se encuentra por debajo de los
257 1000 msnm, entretanto sobre los 1500 m se tiene el 13.4%.

258 Tabla 3. Distribución altitudinal de la superficie del estado de Chiapas y superficie ocupada
259 por grado de aptitud en función de la altitud.

Grado de aptitud	Rangos de altitud				
	<500	500-1000	1000-1500	1500-2000	>2000
Porcentaje	34.9	35.0	16.7	8.8	4.6
Óptimo	7436	27 923	122 978	132 804	8861
Moderado	220 700	895 765	739 889	372 782	49 571
Bajo	1 737 379	1 366 108	261 385	90 384	218 065
Inadecuado	393 471	77 392	3598	619	31 911
Total	2 358 986	2 367 187	1 127 849	596 589	308 408

260

261 Al analizar la distribución de la aptitud actual, en función de los rangos altitudinales, se
262 observa que el grado óptimo de las tierras se concentran entre los 1000 y 2000 m (85.3%), lo
263 que se atribuye a las condiciones climáticas y edáficas más favorables para el cultivo en estos
264 intervalos de altitud. En contraste, las zonas inferiores a los 1000 y superiores a los 2000
265 msnm presentan menos superficie óptima.

266 Para evaluar los cambios del grado de aptitud en relación con la altitud, se consideró el
267 porcentaje de cambio de la aptitud actual (Figura 4) con respecto a los mapas de aptitud
268 futuros (Figura 5), contemplando cada rango de altitud (Tabla 3). Se encontró una
269 disminución de las zonas aptas y un incremento de las zonas inadecuadas a menos de 500
270 msnm (Figura 7A). De 500 a 1000 msnm (Figura 7B), se identificó una disminución en las
271 superficies con grado óptimo y moderado, mientras que las áreas con grado bajo e inadecuado
272 muestran un incremento. Este patrón se repite en el intervalo de 1000 a 1500 msnm (Figura
273 7C).

274 Por otro lado, de 1500 a 2000 msnm (Figura 7D), para 2040 y 2060, se registra un incremento
275 en las zonas óptimas. No obstante, hacia 2080 y 2100, bajo los SSP3-7.0 y SSP5-8.5, estas
276 áreas muestran una reducción significativa. Por último, en altitudes superiores a los 2000 m
277 (Figura 7E), se registra un incremento en las zonas con grado óptimo y moderado,
278 acompañado de una disminución en los grados de aptitud bajo e inadecuado.

279 Así, mientras que las áreas de baja altitud se vuelven progresivamente menos aptas, las zonas
280 de altitudes medias y altas muestran una mejora en su aptitud. Estos resultados resaltan cómo
281 el cambio climático podría redefinir los límites de aptitud agrícola en función de la altitud.
282 Estudios previos también han reportado una reducción y desplazamiento de las áreas óptimas
283 a regiones de mayor altitud (Birthwright y Mighty, 2023; Grüter *et al.*, 2022; Bunn *et al.*

284 2015a; Chemura *et al.*, 2015; Ovalle-Rivera *et al.*, 2015; Baca *et al.*, 2014; Schroth *et al.*,
285 2009). Asimismo, Läderach *et al.* (2017) reportaron, para Nicaragua, una reducción del 25
286 al 50 % de la superficie apta para la producción de café en zonas ubicadas entre los 500 y
287 800 msnm, incluso en el escenario más optimista. Según estos autores, esta disminución de
288 la aptitud en zonas bajas afecta atributos como la acidez y el sabor del café en taza, factores
289 críticos para la calidad del café.

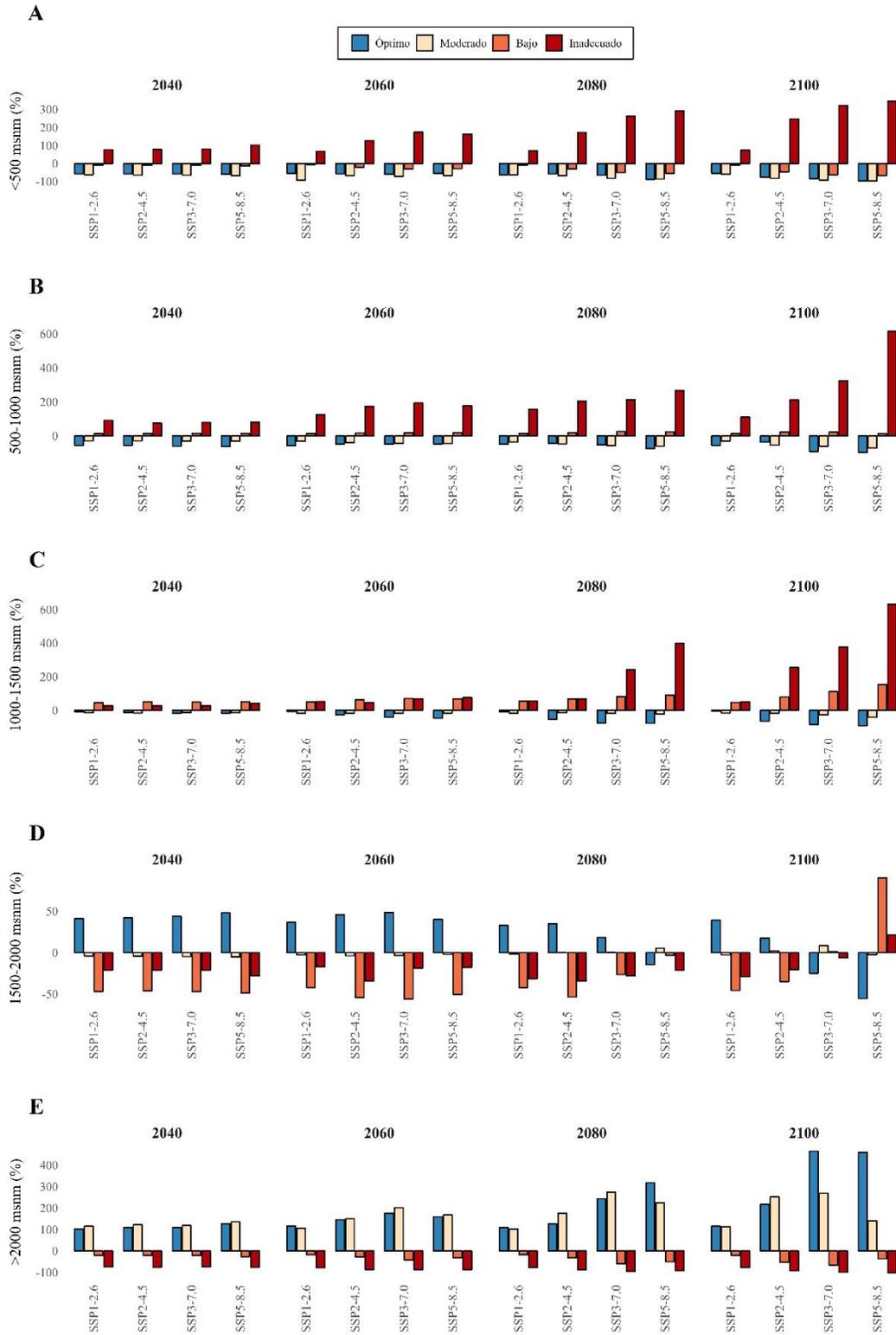
290 Específicamente en la Sierra madre de Chiapas, Schroth *et al.*, 2009 encontraron una
291 disminución de la aptitud en tierras ubicadas a menos de 1700 msnm, reducción que se
292 acentúa por debajo de los 1200 msnm. Ante este panorama, dichos autores sugieren
293 diversificar la producción, especialmente en parcelas ubicadas a menor de 900 msnm, donde
294 *c. arabica* probablemente perderá su viabilidad como cultivo en las próximas décadas.
295 Considerando este panorama, es importante destacar que la migración de las zonas aptas para
296 la producción de café presenta múltiples limitaciones tanto físicas como sociales. Entre estas
297 se incluyen restricciones en el acceso a tierras de mayor altitud, conflictos en el uso del suelo
298 y la necesidad de ajustar las prácticas agrícolas a nuevas condiciones climáticas y
299 topográficas (Birthwright y Mighty, 2023; Läderach *et al.*, 2017; Schroth *et al.*, 2009; Gay
300 *et al.*, 2006).

301 De acuerdo con Schroth *et al.* (2009) la disminución de las zonas aptas para *c. arabica* en
302 altitudes inferiores a los 1500 m se relaciona con un aumento de las temperaturas. Tal
303 condición podría acelerar la maduración de los frutos, empeorando la calidad en taza, ante lo
304 cual es recomendable el uso de sombra para compensar parcialmente el déficit climático
305 generado por la altitud (Vaast *et al.* 2006). Por otro lado, las temperaturas más altas en
306 altitudes elevadas podrían generar condiciones climáticas más favorables (incremento de
307 temperaturas y número de días soleados) para este cultivo (Schroth *et al.*, 2009).

308 Es importante señalar que, si bien la metodología empleada en este trabajo es muy simple,
309 basado únicamente en tendencias y analogías temporales, las predicciones para la región son
310 similares a las obtenidas utilizando modelos más complicados.

311

312



313

314 Figura 7. Cambio porcentual en los grados de aptitud futura respecto al escenario actual en
 315 función de la altitud.

316 4.4. Distribución de las parcelas en los grados de aptitud

317 De las 324 768 parcelas consideradas en este trabajo, el 25% contó con una superficie menor
318 a 0.25 ha, mientras que el 50% no superó las 0.4 ha. Solo el 25% de las parcelas excedió las
319 0.66 ha (Tabla 5). Únicamente 1558 productores cultivan parcelas mayores a 7 ha. Según
320 Avelino *et al.* (2015), aquellos con menos de 7 ha enfrentan serias dificultades para garantizar
321 su seguridad alimentaria y generar excedentes comercializables. En este contexto, la gran
322 mayoría de los productores de café en Chiapas enfrentan condiciones de vulnerabilidad
323 económica y alimentaria, debido a la alta fragmentación de la tierra que limita la capacidad
324 de implementar prácticas agrícolas tecnificadas o la diversificación de cultivos, aumentando
325 la dependencia de un modelo de subsistencia.

326 Esta situación se ve agravada por el cambio climático, que se proyecta cambiará la aptitud
327 para el cultivo y reducirá la producción agrícola debido al aumento de la frecuencia e
328 intensidad de los eventos climáticos extremos, así como crear condiciones para la mayor
329 incidencia de plagas y enfermedades (IPCC, 2021). Este panorama exige políticas públicas
330 orientadas a fortalecer la tenencia de la tierra, mejorar la productividad en parcelas pequeñas
331 y fomentar estrategias de adaptación al cambio climático. Entre estas estrategias destacan los
332 sistemas agroforestales y las prácticas de manejo sostenible del suelo, que pueden mitigar
333 estos riesgos y promover la resiliencia de los pequeños productores.

334 En la Tabla 5 se exhibe la distribución de las parcelas y la superficie sembrada en cada grado
335 de aptitud. De acuerdo con esta información la cantidad de parcelas ubicadas en tierras
336 óptimas para la producción de café de alta calidad es relativamente baja (12.3%). Mientras
337 que en zonas de aptitud moderada se encuentra más del 50% de las unidades de producción,
338 lo que se podría relacionar con un alto potencial para incrementar la cantidad de parcelas con
339 la capacidad de producir café de alta calidad. Esto pone de manifiesto la necesidad de
340 implementar estrategias que optimicen el uso del suelo y fortalezcan la sostenibilidad en las
341 áreas más productivas. Asimismo, las áreas de exclusión (no consideradas en los grados de
342 aptitud agrícola) comprenden el 11.9 % de las parcelas. Esto resulta relevante, ya que estas
343 zonas podrían desaparecer debido a un incremento en el tamaño de los asentamientos
344 humanos urbanos.

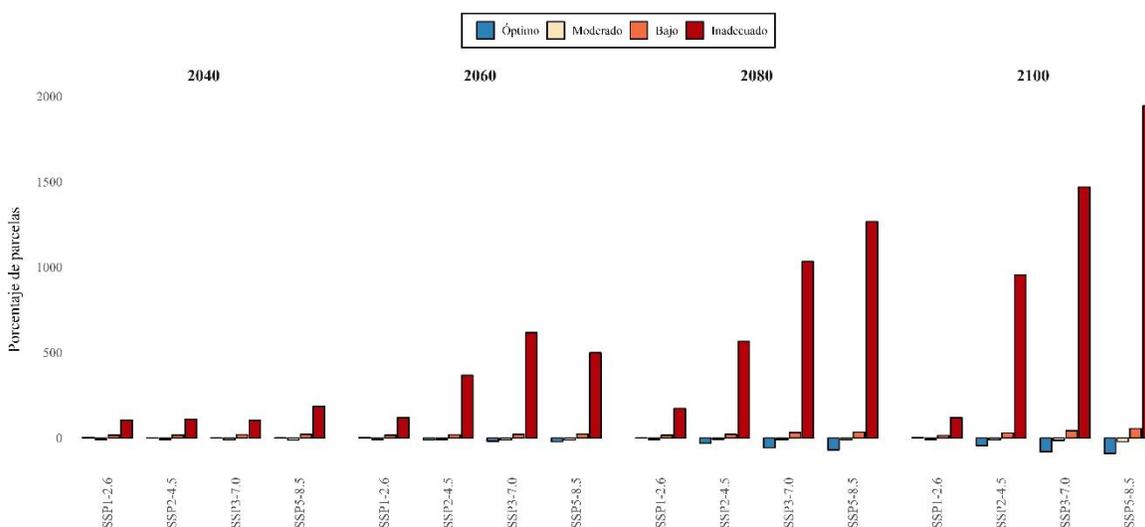
345 La evaluación del cambio en el porcentaje de parcelas distribuidas en cada grado de aptitud,
346 comparando el escenario actual con los escenarios futuros (Figura 8), destacan que, para el
347 año 2040 se observa un ligero incremento en la proporción de parcelas ubicadas en tierras
348 con grado óptimo, acompañado de una disminución en el porcentaje de parcelas ubicadas en
349 áreas con grado de aptitud moderado. A partir de 2060, la tendencia general evidencia una
350 disminución progresiva en el porcentaje de parcelas en zonas de aptitud óptima y moderada.
351 Por otro lado, en todos los escenarios considerados se observa un incremento en el porcentaje
352 de parcelas ubicadas en zonas de aptitud baja e inadecuado, porcentaje que es más elevado
353 en los SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

354

355

356 Tabla 5. Distribución del número de parcelas y superficie en los diferentes grados de aptitud.

Grado de aptitud	Parcelas		Superficie		Resumen estadístico de la superficie (ha)			
	Cantidad	%	Hectáreas	%	Promedio	Primer cuartil	Mediana	Tercer cuartil
Óptimo	39 879	12.3	26 707	11.7	0.67	0.20	0.35	0.51
Moderado	166 165	51.2	114 382	50.0	0.69	0.25	0.40	0.60
Bajo	78 612	24.2	85 671	37.5	1.09	0.33	0.47	0.94
Inadecuado	1354	0.4	1949	0.9	1.44	0.45	0.81	1.54
Exclusión	38 758	11.9	18 067	7.9	0.47	0.18	0.30	0.45
Total	324 768	100.0	228 709	100.0	0.76	0.25	0.40	0.66



357
358 Figura 8. Proporción de parcelas por nivel de aptitud en función de los horizontes de tiempo
359 y escenarios socioeconómicos compartidos.

360 El incremento de parcelas ubicadas en zonas no aptas para el cultivo hacia finales del siglo
361 resalta un riesgo significativo para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en regiones
362 vulnerables como Chiapas. Los cambios proyectados en las tierras óptimas para el cultivo,
363 reflejan una alta exposición de los productores de café a los efectos del cambio, de manera
364 similar a lo señalado por Baca *et al.* (2014). Esta situación podría tener graves implicaciones
365 para la seguridad alimentaria, al reducir la superficie adecuada para la producción agrícola y
366 al aumentar la presión sobre las áreas con condiciones marginales. Esto, a su vez, puede
367 intensificar el uso insostenible del suelo, favorecer la degradación ambiental y contribuir a la
368 pérdida de biodiversidad (Webb *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2024). Si bien no se consideran
369 medidas de adaptación para reducir el efecto del cambio climático, es importante notar que,
370 dada la magnitud e inestabilidad de los ingresos de los productores, sus posibilidades de
371 adaptación son muy escasas.

372 5.0. CONCLUSIONES

373 Este estudio aporta evidencia clara de que el cambio climático provocará cambios
374 significativos en la distribución de las zonas aptas para la producción de *Coffea arabica* en
375 Chiapas, México. Los resultados demuestran que el aumento global de las temperaturas y las
376 alteraciones en los patrones de precipitación modificarán las zonas óptimas para el cultivo,
377 disminuyendo su extensión y desplazándolas hacia altitudes superiores a los 1500 m. Esto
378 indica que las áreas de menor altitud perderán progresivamente su capacidad productiva
379 óptima.

380 Los resultados muestran que, en las condiciones actuales, las tierras clasificadas con grado
381 de aptitud óptimo representan la superficie más limitada (4.5%), mientras que las de aptitud
382 moderada y baja abarcan la mayor proporción del estado. Este análisis proporciona una base
383 sólida para comprender las restricciones edafoclimáticas que enfrenta actualmente la
384 cafecultura en Chiapas, particularmente ante el objetivo del gobierno federal de aumentar
385 la producción de café en el país de forma sustentable, y sin cambio de uso de suelo e impactos
386 ambientales negativos.

387 El análisis realizado bajo los diferentes escenarios de cambio climático revela que, para los
388 escenarios de mayor forzamiento radiativo (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), las zonas óptimas podrían
389 reducirse drásticamente, con pérdidas de hasta el 60% hacia el año 2100. En contraste, en el
390 escenario SSP1-2.6, se proyecta un ligero incremento en la superficie clasificada como
391 óptima en los cuatro horizontes de tiempo. En cambio, las áreas no aptas podrían aumentar
392 entre un 68% y un 361%, dependiendo del escenario y horizonte de tiempo.

393 Además, se identificó que las parcelas actualmente ubicadas en zonas con grado de aptitud
394 óptimo y moderado se reducirán progresivamente, mientras que aquellas en condiciones de
395 aptitud baja e inadecuada se incrementarán. Este desplazamiento generará implicaciones
396 económicas y sociales significativas para la actividad cafetalera, particularmente para
397 pequeños productores que dependen de esta actividad para su sustento y que por lo regular
398 tienen menos opciones de adaptación o enfrentan más barreras para alcanzarla.

399 En síntesis, los efectos del cambio climático sobre la aptitud del cultivo de café en Chiapas
400 plantean la necesidad de implementar acciones inmediatas para garantizar la sostenibilidad
401 del sector a largo plazo. Las estrategias de adaptación, basadas en el uso eficiente de recursos
402 y la innovación en cadenas de valor agrícola, serán clave para enfrentar los desafíos y
403 asegurar la continuidad de la cafecultura en la región. Estos resultados ofrecen una
404 herramienta valiosa para la toma de decisiones y para promover una cafecultura resiliente
405 en Chiapas.

406

407

408 6.0. LITERATURA CITADA

409

- 410 Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach,
411 P., Anzueto, F., Hruska, A. J., & Morales, C. (2015). The coffee rust crises in
412 Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed
413 solutions. *Food Security*, 7(2), 303–321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- 414 Baca, M., Läderach, P., Hagggar, J., Schroth, G., & Ovalle, O. (2014). An integrated
415 framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation
416 strategies for coffee growing families in Mesoamerica. *PLoS ONE*, 9(2), e88463.
417 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088463>
- 418 Bakri, S., Setiawan, A., & Nurhaida, I. (2018). Coffee bean physical quality: The effect of
419 climate change adaptation behavior of shifting up cultivation area to a higher
420 elevation. *Biodiversitas*, 19, 413–420. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190208>.
- 421 Birthwright, A.-T., & Mighty, M. (2023). Risky business: Modeling the future of Jamaica’s
422 coffee production in a changing climate. *Climate*, 11(6), 122.
423 <https://doi.org/10.3390/cli11060122>
- 424 Bracken, P., Burgess, P., & Girkin, N. (2023). Opportunities for enhancing the climate
425 resilience of coffee production through improved crop, soil and water management.
426 *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47, 1125 - 1157.
427 <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2225438>.
- 428 Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., & Kirschke, D. (2015a). A bitter cup: Climate
429 change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*,
430 129(1–2), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>
- 431 Chemura, A., Kutuywayo, D., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2016). Bioclimatic modelling of
432 current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in
433 Zimbabwe. *Regional Environmental Change*, 16(2), 473–485.
434 <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0762-9>
- 435 Chemura, A., Mudereri, B. T., Yalew, A. W., & Gornott, C. (2021). Climate change and
436 specialty coffee potential in Ethiopia. *Scientific Reports*, 11(1), 87647.
437 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87647-4>
- 438 Davidson, S. (2004). Shade coffee agro-ecosystems in Mexico. *Journal of Sustainable*
439 *Forestry*, 21(1), 81–95. https://doi.org/10.1300/J091v21n01_05
- 440 De Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The
441 future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*,
442 9(1), 45491. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>
- 443 Delgado, M. G., & Sendra, J. B. (2004). Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-
444 making: A review. *Human and Ecological Risk Assessment: An International*
445 *Journal*, 10(6), 1173–1187. <https://doi.org/10.1080/10807030490887221>

- 446 Fain, S. J., Quiñones, M., Álvarez-Berriós, N. L., Parés-Ramos, I. K., & Gould, W. A. (2018).
447 Climate change and coffee: Assessing vulnerability by modeling future climate
448 suitability in the Caribbean island of Puerto Rico. *Climatic Change*, 146(1–2), 175–
449 186. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1949-5>
- 450 Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate
451 surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–
452 4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- 453 Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate
454 change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico.
455 *Climatic Change* 79: 259–288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>
- 456 Grüter, R., Trachsel, T., Laube, P., & Jaisli, I. (2022). Expected global suitability of coffee,
457 cashew and avocado due to climate change. *PLoS ONE*, 17(1), e0261976.
458 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261976>
- 459 Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M.,
460 Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B.,
461 Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B.,
462 Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids 250m: Global
463 gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748.
464 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- 465 Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high
466 resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal*
467 *of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- 468 Holt-Giménez, E. (2002). Measuring farmers’ agroecological resistance after Hurricane
469 Mitch in Nicaragua: a case study in participatory, sustainable land management
470 impact monitoring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 87–105.
471 [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00006-3)
- 472 Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). Textura: Edafología 2006
473 (Serie II). Recuperado de <https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>
- 474 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The
475 physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment
476 Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University*
477 *Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- 478 Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., Etienne, H.,
479 Turreira-García, N., Rigal, C., Vaast, P., Ramalho, J. C., Marraccini, P., & Ræbild,
480 A. (2022). Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under
481 climate change? A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 877476.
482 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>

- 483 Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martínez-Valle, A., &
484 Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time.
485 *Climatic Change*, 141(1), 47–62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>
- 486 Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2008). Synergies between agricultural
487 intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops.
488 *BioScience* 58(9): 847-854. <https://doi.org/10.1641/B580911>
- 489 López-Carmona, D., Gallegos, A., Palma-López, D. J., Martín-Morales, G., Barragán-
490 Maravilla, M., Hernández-Vallecillo, G., & Bautista, F. (2021). Selección de tierras
491 para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio
492 y conocimiento local. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8, e2419.
493 <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2419>
- 494 Manzano, S. L. R., Pineda, N. B., & Gómez-Albores, M. A. (2019). Método de evaluación
495 multicriterio. En Buzai, G. D. & Santana, M. V. (Eds.), *Métodos cuantitativos en*
496 *geografía humana* (pp. 193–208). Impresiones Buenos Aires Editorial.
- 497 Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015). Projected
498 shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to
499 climate change. *PLoS ONE*, 10(4), e0124155.
500 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>
- 501 Ranjitkar, S., Sujakhu, N. M., Merz, J., Kindt, R., Xu, J., Matin, M. A., Ali, M., & Zomer,
502 R. J. (2016). Suitability analysis and projected climate change impact on banana and
503 coffee production zones in Nepal. *PLoS ONE*, 11(9), e0163916.
504 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163916>
- 505 Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., & Ramirez-
506 Villegas, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee
507 communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and*
508 *Adaptation Strategies for Global Change*, 14(7), 605–625.
509 <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>
- 510 Shinbrot, X., Jones, K., Rivera-Castañeda, A., López-Báez, W., & Ojima, D. (2019).
511 Smallholder farmer adoption of climate-related adaptation strategies: The importance
512 of vulnerability context, livelihood assets, and climate perceptions. *Environmental*
513 *Management*, 63, 583–595. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01152-z>
- 514 SIAP. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción*
515 *agrícola por estado*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México.
516 Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- 517 Sys, C., van Ranst, E., Debaveye, J., & Beernaert, F. (1993). Crop requirements. En *Land*
518 *Evaluation Part 3* (Agricultural Publications No. 7).

- 519 Tavares, P., Giarolla, A., Chou, S., Silva, A., & Lyra, A. (2018). Climate change impact on
520 the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. *Regional Environmental*
521 *Change*, 18, 873-883. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1236-z>.
- 522 Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J., Guyot, B., & Génard, M. (2006). Fruit thinning and shade
523 improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under
524 optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86(2), 197–
525 204. 10.1002/jsfa.2338
- 526 WorldClim Global Climate Data. (2024). Recuperado de <http://www.worldclim.org/bioclim>
- 527 Webb, N., Marshall, N., Stringer, L., Reed, M., Chappell, A., & Herrick, J. (2017). Land
528 degradation and climate change: Building climate resilience in agriculture. *Frontiers*
529 *in Ecology and the Environment*, 15, 450–459. <https://doi.org/10.1002/FEE.1530>
- 530 Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C., Zhu, Y., Burney, J., D'Odorico, P.,
531 Fantke, P., Fargione, J., Finlay, J. C., Rulli, M. C., Sloat, L., Groenigen, K. J., West,
532 P. C., Ziska, L., Michalak, A. M., & Lobell, D. (2024). Climate change exacerbates
533 the environmental impacts of agriculture. *Science*, 385.
534 <https://doi.org/10.1126/science.adn3747>