

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 principales regiones cafetaleras del mundo, afectando el rendimiento y la calidad de dicho cultivo. Este estudio analizó el impacto del cambio climático en la extensión y distribución altitudinal de las superficies aptas para la producción de *Coffea arabica* en Chiapas, México. 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 (Max Planck Institute Earth System Model version 1.2 High Resolution) bajo 4 trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585) 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 SSP126, las áreas óptimas podrían aumentar hasta un 12% en el año 2100. Sin embargo, para el mismo horizonte de tiempo, con el escenario SSP585, las superficies óptimas podrían reducirse hasta un 60%. Por el contrario, las zonas clasificadas como inadecuadas podrían incrementarse entre un 68% y un 361%, dependiendo del escenario. Además, se proyectó un desplazamiento altitudinal de las zonas óptimas hacia áreas por encima de los 1,500 metros, mientras que las regiones más bajas reducirán la extensión de las superficies con grado óptimo y moderado, incrementándose simultáneamente las zonas inadecuadas. Este cambio impactaría negativamente en la cantidad de parcelas y la superficie cosechada en áreas óptimas para producir café de alta calidad. Estos hallazgos destacan la necesidad de implementar estrategias de manejo y políticas públicas orientadas en la mitigación y adaptación frente a los efectos del cambio climático para preservar la productividad del sector cafetalero.

Palabras clave: Análisis multicriterio, aptitud agrícola, modelo de cambio climático MPI-ESM1-2-HR, variables bioclimáticas.

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*

40 evolucionó como un cultivo de sotobosque en las tierras altas de África tropical, por lo cual,
41 es sensible a las temperaturas extremas y a los cambios rápidos de temperatura.

42 Estudios previos han reportado que los aumentos de temperatura y los cambios en los
43 patrones de precipitación podrían disminuir el rendimiento, reducir la calidad y aumentar la
44 presión de plagas y enfermedades (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015 y Avelino *et al.*, 2015). Estas
45 condiciones amenazan con desplazar las zonas aptas para la producción de café a nivel global
46 (Grüter *et al.*, 2022; Ranjitkar *et al.*, 2016 y Baca *et al.*, 2014), provocando que los
47 agricultores realicen mayores inversiones en el manejo del cultivo y, en consecuencia,
48 compromete la sostenibilidad de su producción (Birthwright y Mighty, 2023; Fain *et al.*,
49 2018; Läderach *et al.*, 2017; Chemura *et al.* 2015 y Schroth *et al.*, 2009).

50 Debido a que las plantaciones de café tienen una larga vida útil, de entre 30 a 50 años, los
51 efectos del cambio climático resultan más preocupantes (Ranjitkar *et al.*, 2016 y Bunn *et al.*,
52 2015a). En especial porque se queda en el campo durante todo el año, experimentando el
53 ciclo completo de variaciones climáticas estacionales y requiere un período óptimo
54 relativamente largo para la producción (Chemura *et al.*, 2015). Además, de Sousa *et al.*
55 (2019) señalan que, debido a la naturaleza de este tipo de cultivos, los agricultores enfrentan
56 largos periodos de espera antes de beneficiarse de las decisiones de manejo implementadas.

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

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

79 Particularmente en la Sierra Madre de Chiapas, Schroth *et al.* (2009) resaltan que el cultivo
80 de café bajo sombra tiene una gran importancia ecológica y cultural, por lo que comprender

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

Aunque se han realizado numerosos estudios sobre los efectos del cambio climático en la producción de café a nivel global, existe una notable escasez de investigaciones específicas y detalladas a escala local. Este trabajo aborda cómo el aumento global de las temperaturas y los cambios en los patrones de precipitación, vinculados al cambio climático, podrían transformar las áreas óptimas para la producción de café en el estado de Chiapas. En particular, se analiza la reducción de estas zonas y su desplazamiento hacia altitudes más elevadas. Para ello, se plantearon tres objetivos principales: (1) identificar las áreas actuales de aptitud para el cultivo de *Coffea arabica*; (2) estimar el impacto del cambio climático en las zonas aptas utilizando diferentes escenarios climáticos, basados en el modelo del sistema terrestre del Instituto Max Planck (MPI-ESM1-2-HR); y (3) evaluar cómo los cambios en los niveles de aptitud de las tierras afectarían la distribución y cantidad de parcelas en cada categoría de aptitud.

3.0. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

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

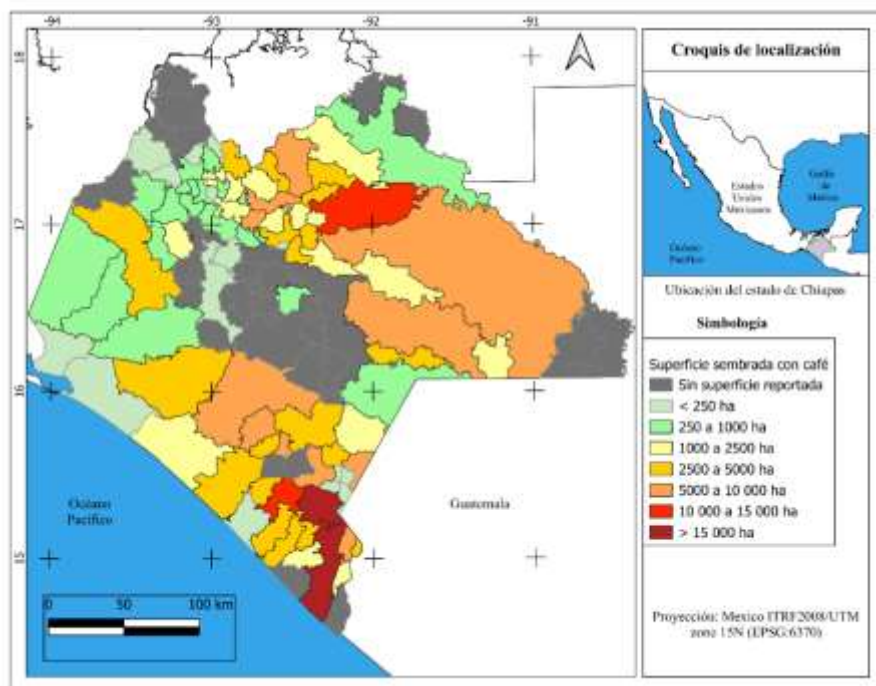


Figura 1. Ubicación del área de estudio y rangos de superficie sembrada en cada municipio.

3.2. Datos edafoclimáticos

Para la zonificación actual del cultivo se utilizó el pH, la textura, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la temperatura media, la temperatura mínima del mes más frío y la precipitación total anual. Los rangos óptimos de las variables para el cultivo de café, se investigaron a través de la literatura especializada y se clasificaron en cuatro niveles de aptitud: óptimo, moderado, bajo e inadecuado (Cuadro 1).

Cuadro 1. Rangos de las variables utilizadas para determinar la aptitud de las tierras para el cultivo de café.

Variable	Grado de aptitud				Fuente
	1	2	3	No apto	
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)

Se asumió que las propiedades del suelo (pH, CIC y textura) permanecieron constantes en los diferentes escenarios y horizontes de tiempo. Por otro lado, para las variables climáticas (temperatura promedio, temperatura mínima del mes más frío y precipitación anual) se utilizó la información generada por el modelo climático MPI-ESM1-2-HR (Max Planck Institute Earth System Model, versión 1.2, alta resolución). Se utilizaron las proyecciones de cuatro horizontes de tiempo (2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100) bajo las trayectorias socioeconómicas compartidas SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585 (Shared Socioeconomic Pathways, SSP por sus siglas en inglés). Dichos escenarios consideran diferentes niveles de forzamiento radiativo, y describen posibles trayectorias que la sociedad, la economía y el medio ambiente podrían seguir hasta finales del siglo XXI. En el Cuadro 2 se presentan las fuentes de información utilizadas.

La información se procesó en formato ráster, utilizando un tamaño de pixel mínimo acorde con la capa de mayor resolución (0.25 km). Cada variable se reclasificó en función de los rangos de aptitud definidos (Cuadro 1), asignando valores del 1 al 4 (1: óptimo, 2: moderado, 3: bajo y 4: inadecuado). De esta forma, se generó un mapa de aptitud individual para cada variable. Siguiendo a Chemura *et al.* (2015) se definió a la aptitud como la capacidad de una superficie para completar el ciclo de producción del café desde el establecimiento hasta la cosecha.

Para generar el mapa de aptitud actual y los correspondientes a cada horizonte de tiempo, se aplicó la técnica de suma lineal ponderada, una de las metodologías más sencillas y ampliamente utilizada en la evaluación multicriterio. Esta técnica ha sido reconocida por su flexibilidad y simplicidad en la integración de múltiples variables para la toma de decisiones espaciales (Delgado y Sendra, 2004). En este trabajo, se utilizó la forma más simple de esta técnica, asignando el mismo peso a todas las variables consideradas (Manzano, 2019). Con la suma de las capas de las variables individuales se obtuvo un ráster con valores de 6 a 24 que se reclasificaron de la siguiente manera: a los pixeles con valores de 6 y 7 se les asignó el grado óptimo; 8 y 9 el moderado; 10, 11 y 12 el bajo; y a los mayores de 12 se les clasificó como zonas inadecuadas.

Para cada mapa de aptitud se excluyeron los cuerpos de agua, las zonas urbanas, los polígonos de comunidades rurales y los distritos de riego. Sin embargo, las áreas naturales protegidas no se excluyeron para identificar las zonas que podrían experimentar algún tipo de presión social ante el cambio climático (Birthwright y Mighty, 2023). Como resultado, se obtuvo un mapa de aptitud actual y 16 mapas de aptitud proyectados para escenarios futuros.

Cuadro 2. Variables utilizadas en la determinación de la aptitud actual y futura de las tierras 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	la capacidad de intercambio catiónico (CIC),
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)

3.3. Análisis de la información de los mapas de aptitud

La información generada en este estudio se estructuró en cuatro etapas principales:

1. Análisis de las variables climáticas: Se evaluó el grado de aptitud de seis variables bajo el escenario actual, junto con el porcentaje de cambio en su aptitud en diferentes horizontes temporales y trayectorias socioeconómicas compartidas. Estos cambios se compararon con los valores de aptitud actuales.
2. Comparación de superficies aptas: Se compararon las áreas correspondientes a cada grado de aptitud bajo el escenario actual con las proyectadas en los mapas de aptitud futura.
3. Dinámica de la aptitud futura: Se examinó cómo la aptitud futura se relaciona con las condiciones actuales, categorizándola en cinco rangos altitudinales (<500 m, 500-1000 m, 1000-1500 m, 1500-2000 m, y >2000 m). Este análisis permitió inferir un posible desplazamiento de las zonas aptas hacia regiones de mayor altitud.
4. Distribución de parcelas: Se analizó la distribución de 324,768 parcelas según su grado de aptitud actual y futura. La información de las parcelas fue obtenida a través del portal Geoweb Chiapas 3.0 (<https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>).

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

4.0. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Aptitud de las variables de manera individual

4.1.1. aptitud de las variables en el escenario actual

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), la precipitación total anual (PP) y la temperatura media (Tmed) mostraron una baja contribución al grado de aptitud óptimo, con el 15, 16 y 23% de la superficie del estado, respectivamente. Esto indica que estas variables representan una mayor limitación para que las tierras del estado de Chiapas alcancen el grado de aptitud óptimo. En contraste, variables como la textura del suelo, el pH y la temperatura mínima del mes más frío (Tmin) presentaron una contribución significativamente mayor, con porcentajes del 57, 80 y 84%, respectivamente (Figura 1). Por lo tanto, estas variables son menos limitantes para el grado óptimo de las tierras en el estado para el cultivo de café.

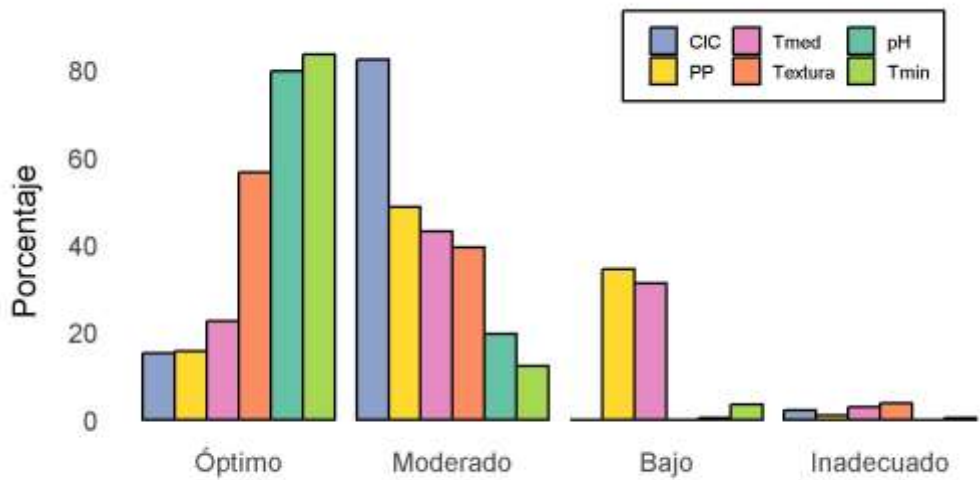


Figura 2. Distribución porcentual de la superficie según el grado de aptitud para el cultivo de *C. arabica*.

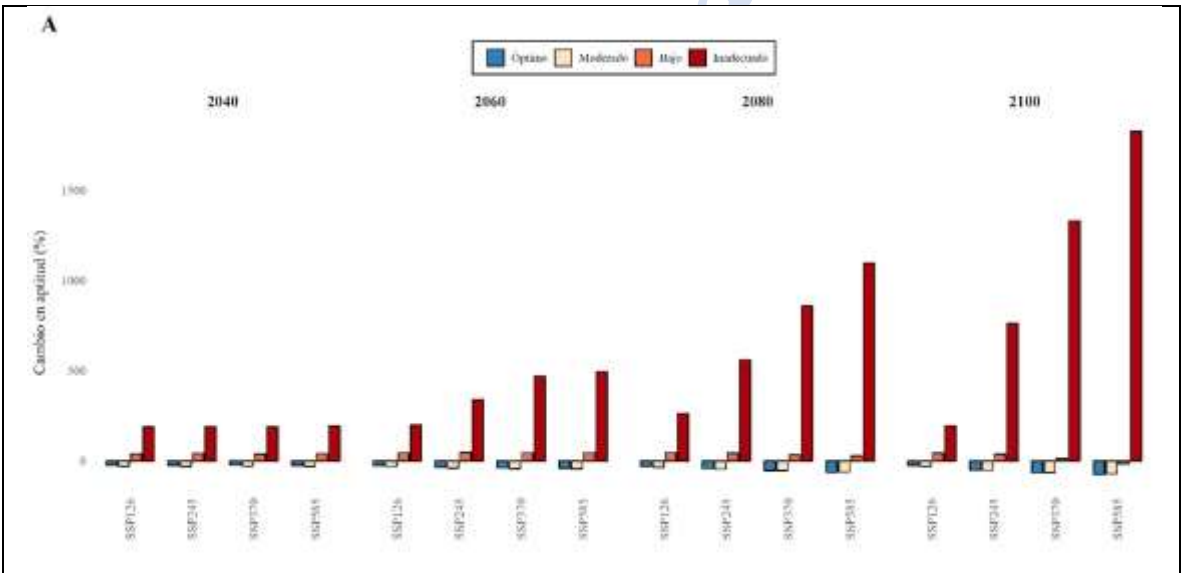
En las variables que tiene una menor contribución al grado de aptitud óptimo, como la CIC, PP y Tmed, es necesario prestar mayor atención para implementar medidas que contribuyan a mantener o incrementar el grado de aptitud. En contraste, la textura, pH y Tmin se mantienen como factores clave en la delimitación de las áreas más productivas. Asimismo, las variables con menor incidencia en el grado óptimo representan una oportunidad para desarrollar intervenciones que incrementen la sostenibilidad y el rendimiento en suelos marginales.

4.1.2. Cambio del grado de aptitud de las variables en función del cambio climático

En la Figura 3A se observa que la superficie apta, de acuerdo a la dinámica de la Tmed, presenta una disminución en las tierras clasificadas como grado de aptitud óptimo y moderado. Por el contrario, se muestra un incremento en las tierras clasificadas como grado de aptitud bajo e inadecuado, siendo este incremento más pronunciado en los escenarios SSP370 y SSP585, especialmente hacia el año 2100.

En cuanto a la Tmin (Figura 3B), se observa una disminución de las superficies clasificadas como grado óptimo e inadecuado, mientras que las zonas de aptitud moderada y baja muestran un incremento. Esta reducción en las áreas óptimas es más significativa en los escenarios con alto forzamiento radiativo, especialmente hacia finales del siglo XXI.

Respecto a la PP (Figura 3C), se observa una tendencia general al incremento de las áreas clasificadas en el grado de aptitud óptimo y moderado. Sin embargo, en el horizonte temporal para 2040, bajo escenarios de alto forzamiento radiativo (SSP370 y SSP585), estas áreas presentan una reducción. No obstante, las áreas clasificadas como inadecuadas por precipitación se reducirían en estos escenarios, lo que podría estar relacionado con un balance hídrico más favorable en ciertas regiones.



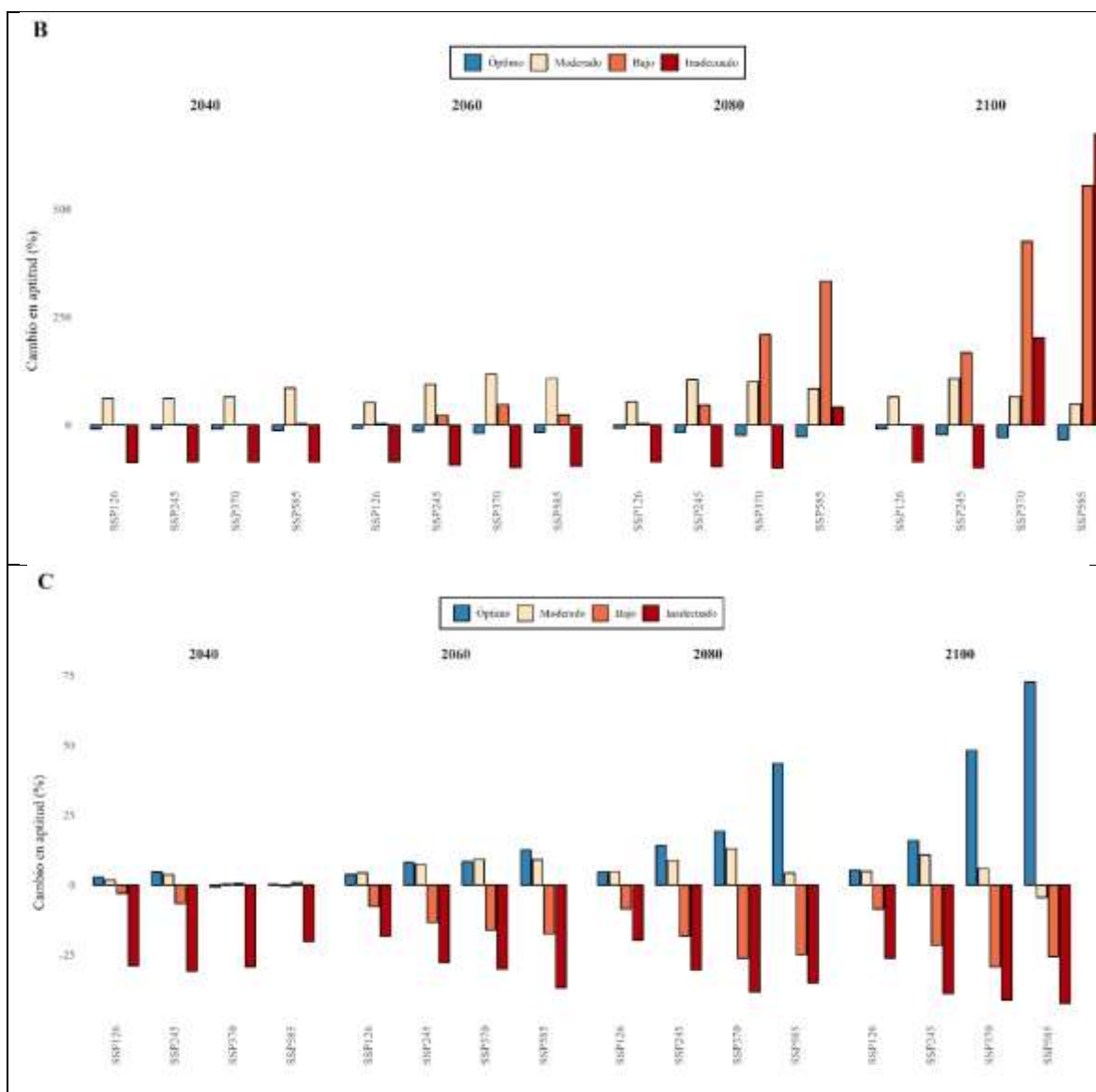


Figura 3. Dinámica del grado de aptitud de la temperatura media (A), temperatura mínima del mes más frío (B) y precipitación total (C) en los diferentes horizontes de tiempo y trayectorias socioeconómicas compartidas.

Estos resultados resaltan la relevancia de integrar las proyecciones climáticas en la planificación de las estrategias de manejo y uso de suelo en regiones agrícolas. El aumento de las temperaturas, especialmente en escenarios de alto forzamiento radiativo, podría provocar un desplazamiento de las zonas aptas en la actualidad hacia áreas de mayor altitud, comprometiendo la sostenibilidad del cultivo de café. Por otro lado, aunque el incremento en las precipitaciones podría ampliar las áreas aptas, también plantea riesgos relacionados con la variabilidad climática, incluyendo lluvias intensas y períodos prolongados de sequía.

4.2. Aptitud de las tierras en los escenarios actual y futuro

En el mapa de aptitud actual (Figura 4), la superficie evaluada cubre un total de 6 762 440 ha. Las tierras clasificadas con grado de aptitud óptimo, que representa las condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo, abarcan 302 203 ha, equivalentes al 4.5% del total. El grado de aptitud moderado, que es adecuado, pero con algunas limitaciones menores, comprende 2 279 988 ha (33.7% de la superficie total), destacándose como una de las categorías más relevantes en términos de extensión. Por otro lado, el grado de aptitud bajo ocupa la mayor proporción con 3 672 965 ha (54.3% del área). Finalmente, las tierras clasificadas como inadecuadas suman 507 283 ha, lo que corresponde al 7.5% de la superficie total.

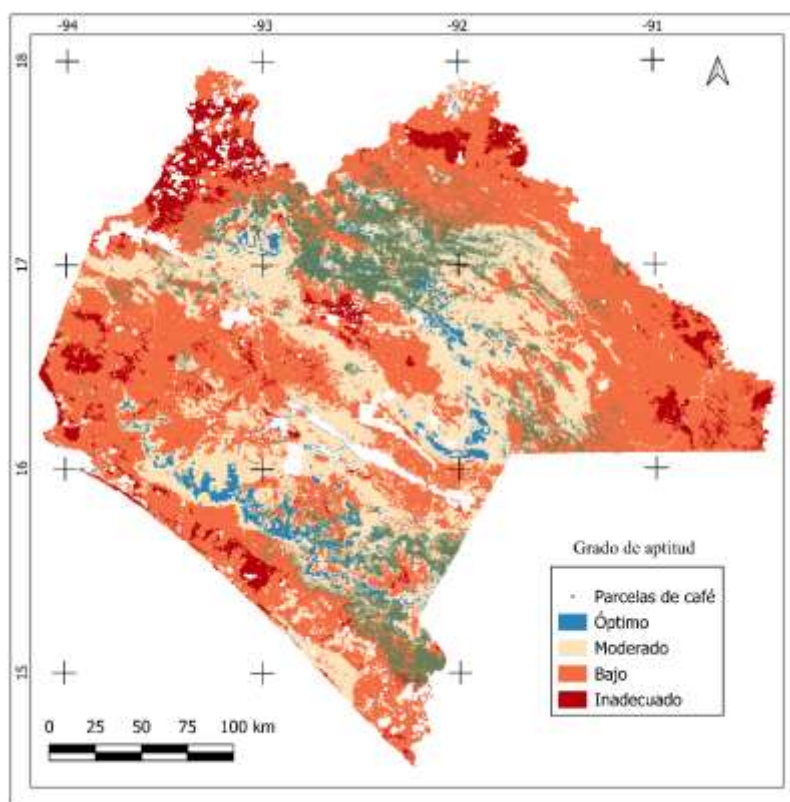
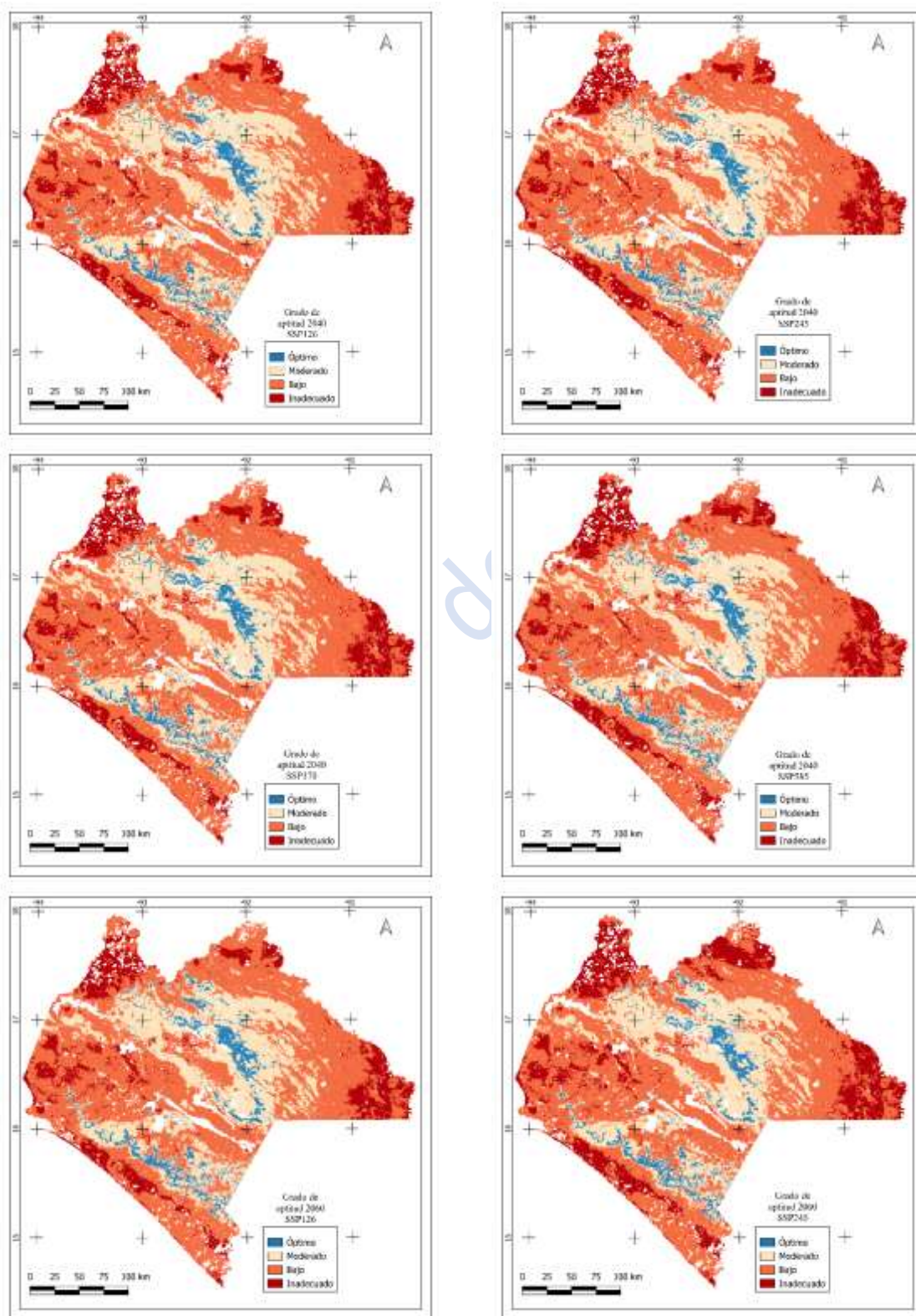
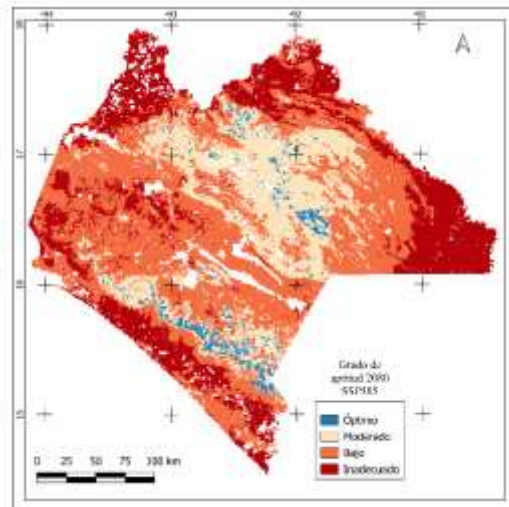
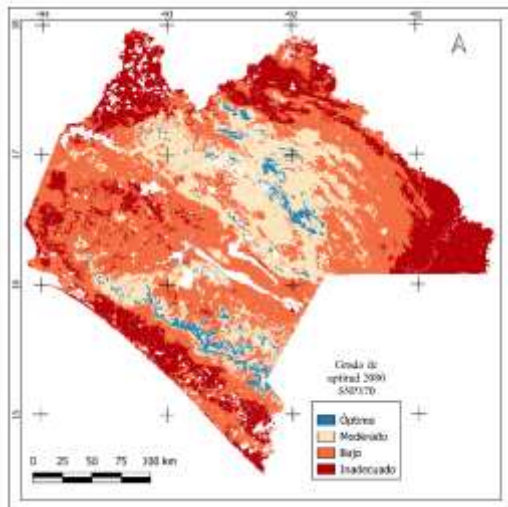
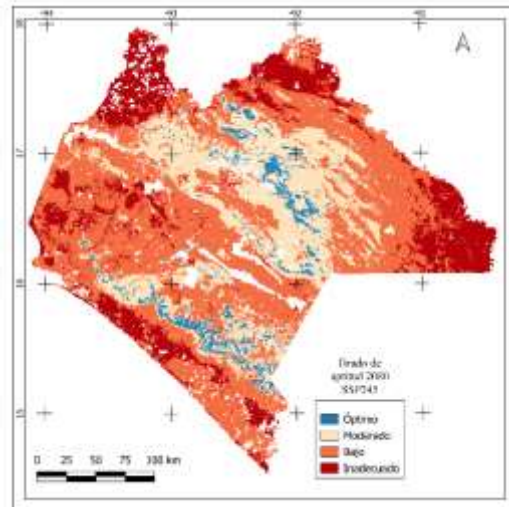
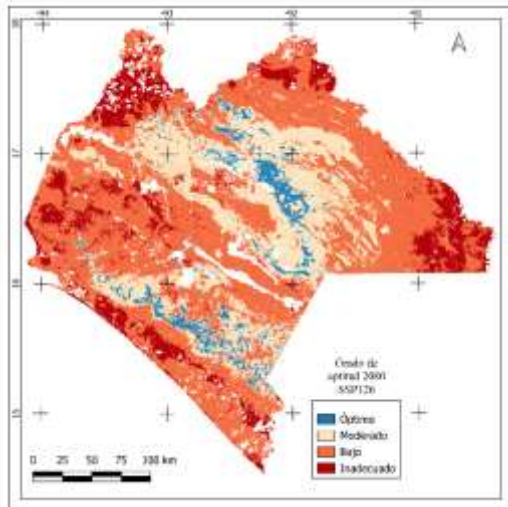
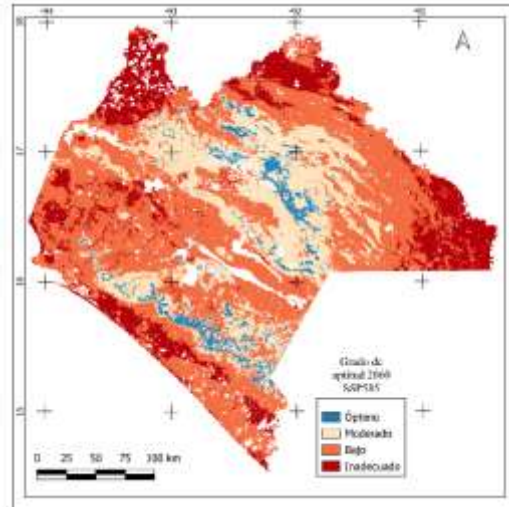
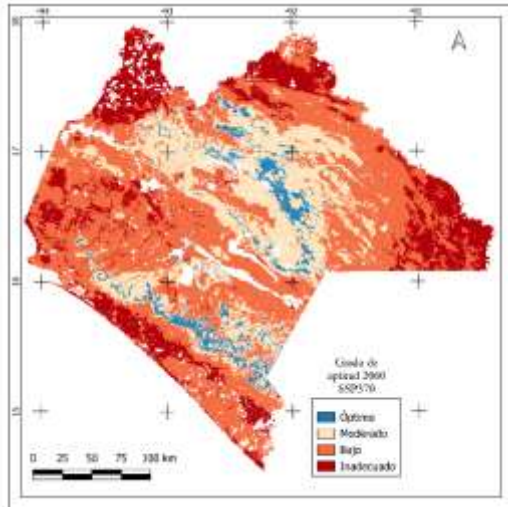


Figura 4. Mapa de aptitud actual y ubicación de las parcelas del estado de Chiapas.

Estos resultados resaltan que, aunque una proporción significativa del área estudiada posee algún grado de aptitud, las tierras con las condiciones óptimas son limitadas. Esto resalta la importancia de implementar estrategias de manejo sostenible para aprovechar y conservar las tierras más productivas.

250 En la Figura 5 se presentan los 16 mapas de aptitud de las tierras generados, se observa una
 251 reducción en las zonas clasificadas como óptimas, particularmente en 2100 para el SSP 585.





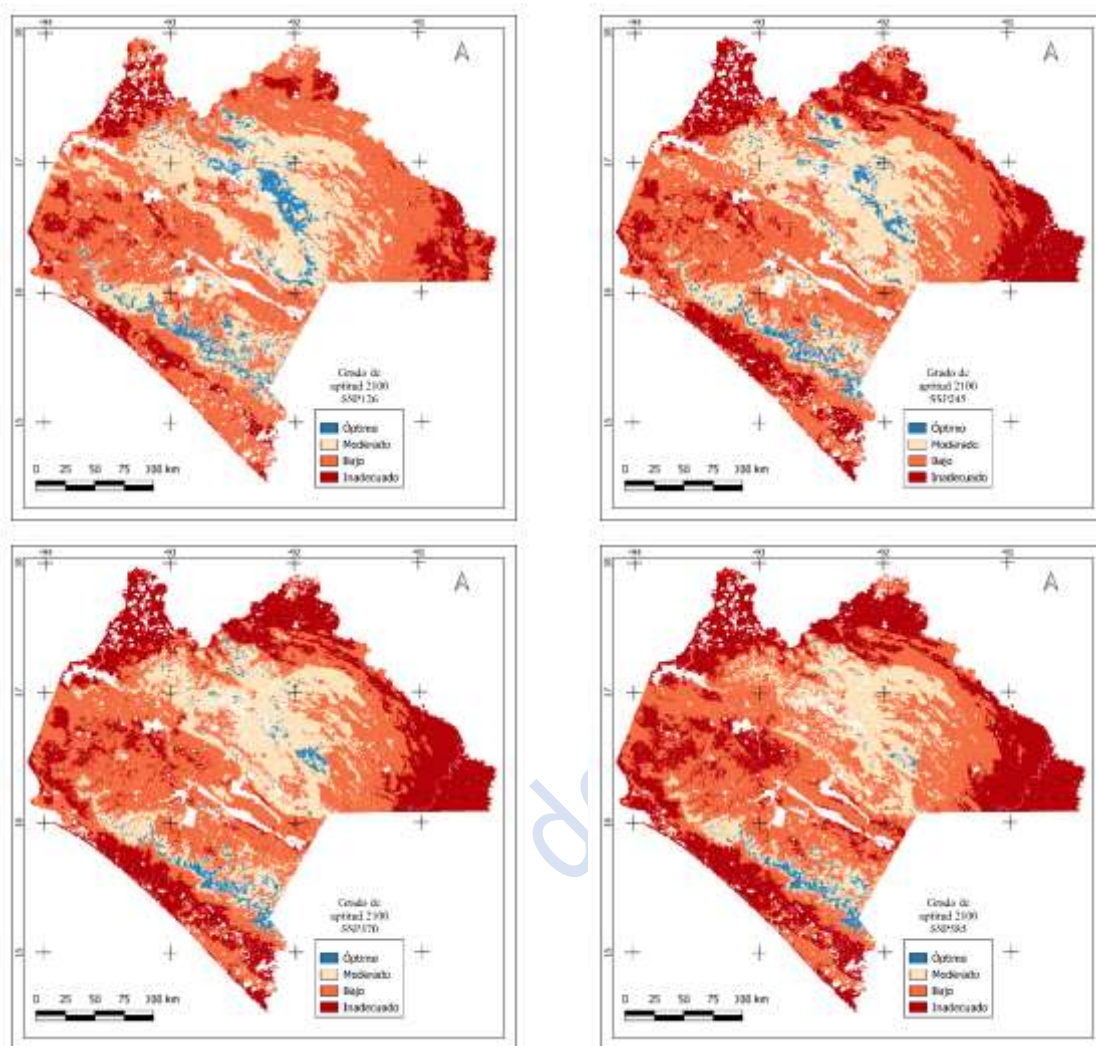


Figura 5. Mapas de aptitud de las tierras del estado de Chiapas, considerando los diferentes horizontes de tiempo y trayectorias socioeconómicas compartidas.

No obstante, debido a que la interpretación visual de estos mapas puede resultar compleja, se realizó una comparación cuantitativa entre la superficie actual de los grados de aptitud y los valores proyectados para diferentes escenarios y horizontes de tiempo. Los porcentajes de cambio en la superficie correspondiente a cada grado de aptitud permiten identificar patrones claros en la evolución futura de las zonas aptas para el cultivo (Figura 6).

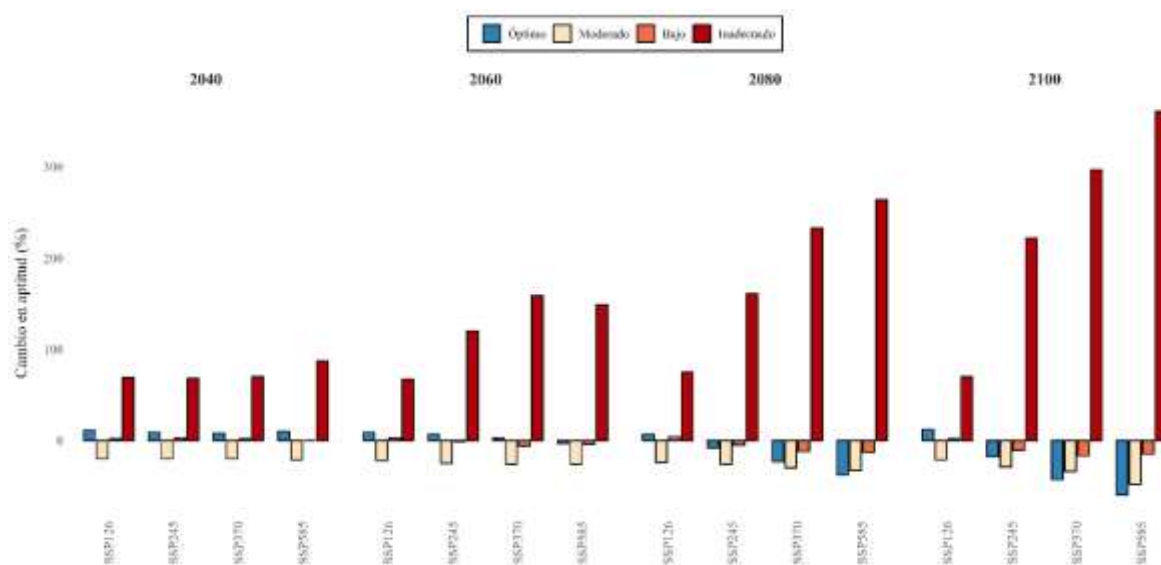


Figura 6. Comparación del porcentaje del grado de aptitud de las tierras del escenario actual en comparación con los proyectados.

Para el grado de aptitud óptimo, el escenario SSP126 muestra un incremento consistente en los cuatro horizontes de tiempo. En contraste, los escenarios SSP245 y SSP370 muestran un aumento en la superficie con este grado de aptitud para 2040 y 2060, pero experimenta una disminución hacia 2080 y 2100, lo que sugiere que los impactos negativos se intensifican con el tiempo. Por otro lado, el escenario SSP585 refleja un incremento en 2040 seguido de una reducción en los horizontes posteriores, lo que evidencia una mayor vulnerabilidad de estas áreas ante escenarios más adversos.

En relación con el grado de aptitud moderado, se observa una tendencia general de reducción en todos los escenarios y horizontes de tiempo, lo que sugiere un desplazamiento de estas áreas hacia categorías menos favorables debido a las condiciones climáticas proyectadas. De manera similar, las zonas clasificadas como grado de aptitud bajo también presentan una disminución, la cual se intensifica conforme avanza el horizonte de tiempo.

Por último, las zonas clasificadas como inadecuadas presentan un incremento constante, independientemente de la trayectoria socioeconómica o el horizonte de tiempo. Este resultado indica que, bajo las proyecciones de cambio climático, una proporción cada vez mayor de las tierras evaluadas podría volverse inadecuada para el cultivo. Esto subraya la necesidad de desarrollar e implementar estrategias de adaptación que mitiguen estos impactos y fomenten el uso eficiente de las tierras que conservarán su aptitud en el futuro.

Discusión sobre la reducción de las superficies aptas

En este trabajo se identificó una disminución en las zonas con grado de aptitud óptimo y moderado bajo los SSP370 y SSP585, especialmente en los horizontes de tiempo más lejanos (2061-2080 y 2081-2100). Esta disminución es más acentuada en el norte del estado, lo cual concuerda con lo reportado por Baca *et al.* (2014).

De manera similar, Birthwright y Mighty (2023) reportaron que en Jamaica se espera una disminución en la idoneidad para la producción de café en las diferentes trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP126, SSP245 y SSP585) y períodos de tiempo considerados (2021–2040, 2041–2060 y 2081–2100). Por su parte, Grüter *et al.* (2022) reportaron que, para el año 2050 bajo un panorama de bajas emisiones RCP2.6 (Representative Concentration Pathway), se espera una disminución del 54.4 % en el área muy apta para el cultivo de café. Asimismo, para un RCP 4.5, la reducción esperada es del 53.7 %, mientras que para un RCP 8.5, se estima una disminución del 59.0 % a nivel mundial. Además, según sus estimaciones, bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5, incluso las zonas marginales experimentarán una disminución de un 5 % y un 13 %, respectivamente, mientras que las áreas no aptas para el cultivo se incrementarán en todos los escenarios.

Resultados similares se han documentado en otras regiones del mundo. Por ejemplo, Ranjitkar *et al.* (2016) señalan que en Nepal se espera una reducción de hasta el 72 % en las áreas adecuadas para la producción de café para el año 2050. De igual manera, Läderach *et al.* (2017) encontraron que en Nicaragua se espera reducción en la superficie apta en más del 90% de las áreas de cultivo.

En el caso de la Sierra Madre de Chiapas, Schroth *et al.* (2009) estimaron que, dentro de un área de 2.36 millones de ha, la superficie de mayor aptitud para el café arábico podría disminuir de las 265 400 ha actuales a solo 6000 ha para 2050. Por otro lado, en las zonas de baja aptitud encontraron un incremento de las 1.57 millones de ha actuales a 2.04 millones de ha en 2050. Este panorama sugiere que la Sierra Madre de Chiapas podría dejar de ser una región productora de café de especialidad.

4.3. Aptitud de las tierras en función de la altitud

En el Cuadro 3 se presenta la distribución de la superficie del estado de Chiapas en función de los cinco rangos de altitud seleccionados (<500, 500-1000, 1000-1500, 1500-2000 y >2000). De acuerdo a esta información, el 34.9 % de la superficie se encuentra por debajo de los 500 m, mientras que un 35.0 % se localiza entre los 500 y 1000 m. En las altitudes intermedias, entre los 1000 y 1500 m, se concentra el 16.7 % de la superficie, en tanto que, el 8.8 % de la superficie se encuentra entre 1500 y 2000 m, y el 4.6 % por encima de 2000 m.

Cuadro 3. Distribución altitudinal de la superficie del estado de Chiapas y superficie ocupada por grado de aptitud.

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	27923	122978	132804	8861
Moderado	220700	895765	739889	372782	49571
Bajo	1737379	1366108	261385	90384	218065
Inadecuado	393471	77392	3598	619	31911
Total	2358986	2367187	1127849	596589	308408

Al analizar la distribución del grado de aptitud óptimo en función de los rangos altitudinales, se observa que estas se concentran entre los 1500 y 2000 m, con 132 804 ha, seguido por el rango de 1000 a 1500 m, que abarca 122 978 ha. En altitudes más bajas, el grado de aptitud óptimo disminuye significativamente, con 27 923 ha entre 500 y 1000 m, y tan solo 7 436 ha por debajo de los 500 m. Por último, en altitudes superiores a los 2000 m, se identifican únicamente 8 861 ha con grado de aptitud óptimo.

Estos resultados demuestran que las áreas más aptas para el cultivo se concentran principalmente en altitudes medias y altas, lo que se atribuye a las condiciones climáticas y edáficas más favorables para el desarrollo del cultivo que predominan en estos intervalos de altitud. En contraste, las zonas de baja altitud presentan una menor proporción de áreas aptas, posiblemente relacionadas con temperaturas más elevadas y una mayor susceptibilidad a condiciones climáticas adversas.

Para evaluar el grado de aptitud en relación con la altitud, se analizaron los intervalos mostrados en el Cuadro 3 y se comparó la superficie correspondiente a cada nivel de aptitud dentro de estos rangos altitudinales, considerando tanto el escenario actual como los horizontes futuros. Los porcentajes de cambio de los niveles de aptitud en los escenarios futuros se presentan en la Figura 7.

En las superficies ubicadas por debajo de los 500 msnm (Figura 7A), se registra una disminución de los tres grados de aptitud y un incremento de las zonas inadecuadas. En el rango altitudinal de 500 a 1000 msnm (Figura 7B), se identifica una disminución en las superficies con grado de aptitud óptimo y moderado, mientras que las áreas con grado de aptitud bajo e inadecuado muestran un incremento. Este patrón se repite en el intervalo de 1000 a 1500 msnm (Figura 7C), lo que podría estar relacionado con un aumento de las temperaturas y cambios en los patrones de precipitación. Estos factores desplazan las condiciones óptimas para el cultivo hacia altitudes más elevadas, limitando el desarrollo del café en regiones de baja altitud.

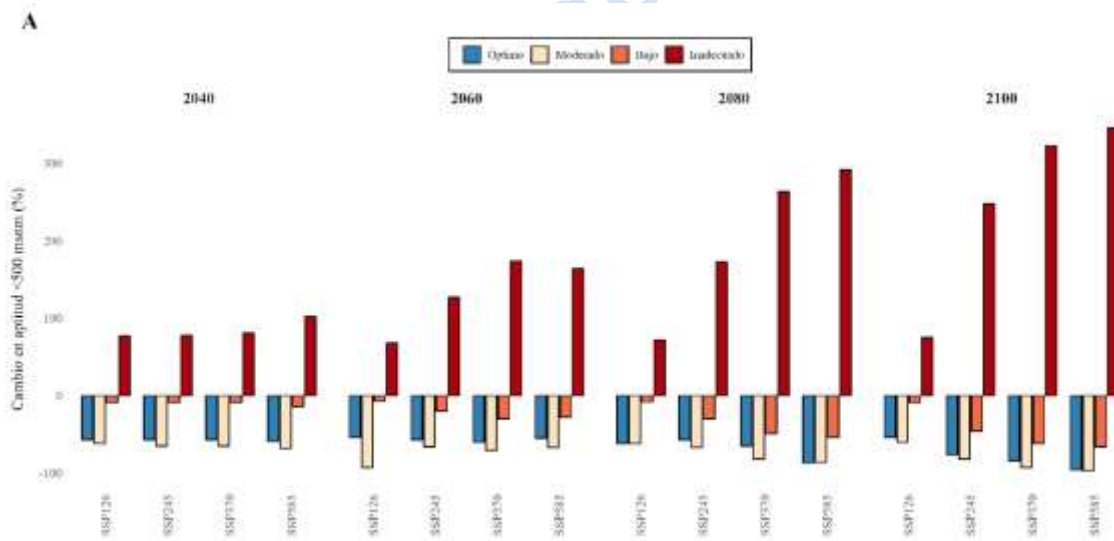
Por otro lado, en el rango altitudinal de 1500 a 2000 m (Figura 7D), se observan tendencias más diversas para los grados de aptitud. En los horizontes de 2040 y 2060, se registra un incremento en las zonas óptimas, lo que indica que estas áreas podrían beneficiarse de condiciones más favorables, como temperaturas más cálidas que favorecen el desarrollo del

café. No obstante, hacia 2080 y 2100, bajo los escenarios SSP370 y SSP585, estas áreas muestran una reducción significativa en el grado de aptitud.

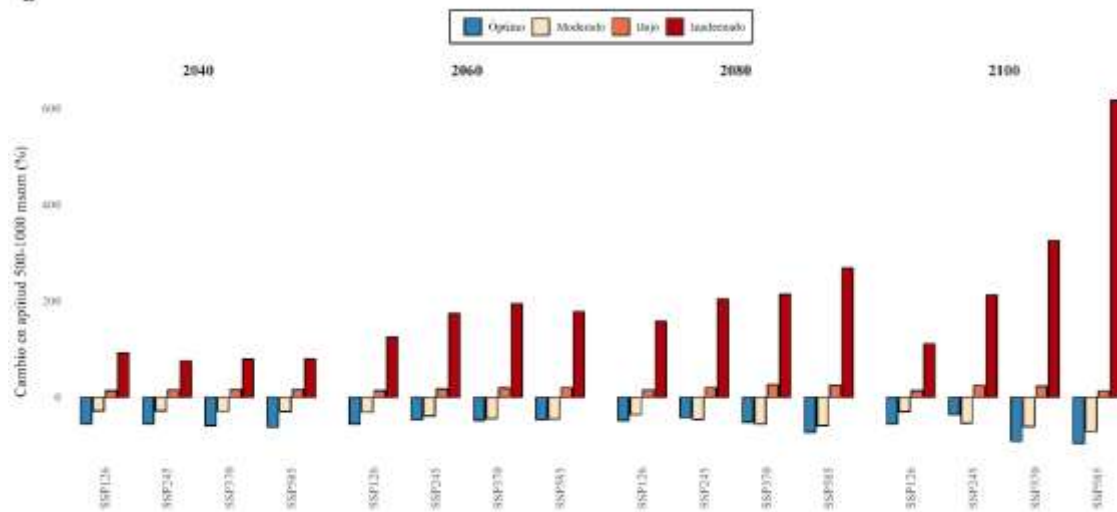
Por último, en altitudes superiores a los 2000 m (Figura 7E), se registra un incremento en las zonas con grados de aptitud óptimo y moderado, acompañado de una disminución en los grados de aptitud bajo y en las áreas clasificadas como inadecuadas. Esto sugiere que las temperaturas más altas en altitudes elevadas podrían generar condiciones climáticas más favorables para el cultivo de café.

Estos resultados resaltan cómo el cambio climático podría redefinir los límites de aptitud agrícola en función de la altitud. Mientras que las áreas de baja altitud se vuelven progresivamente menos aptas, las zonas de altitudes medias y altas muestran una mejora en su aptitud.

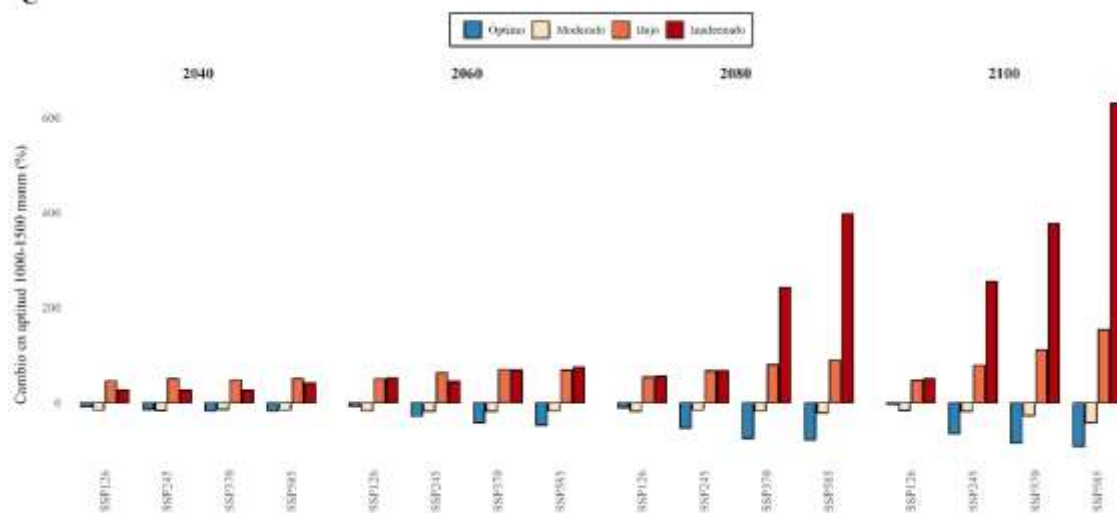
Este fenómeno enfatiza la necesidad de implementar estrategias adaptativas para mitigar los impactos negativos en las zonas actualmente productivas. Asimismo, plantea la importancia de abordar los posibles problemas sociales derivados de la migración de la aptitud de las tierras hacia zonas de mayor altitud, donde regularmente predominan las zonas de conservación o áreas naturales protegidas.



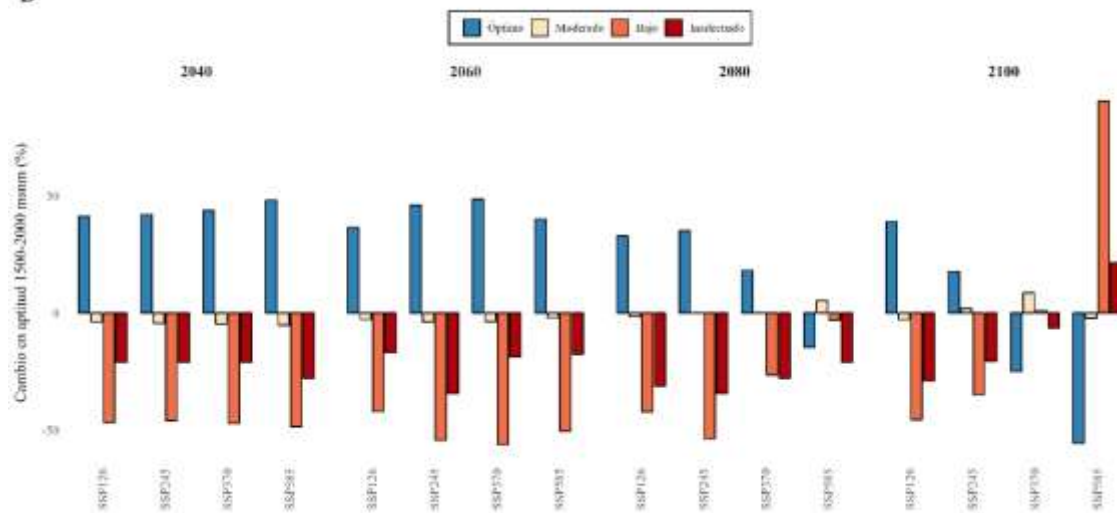
B



C



D



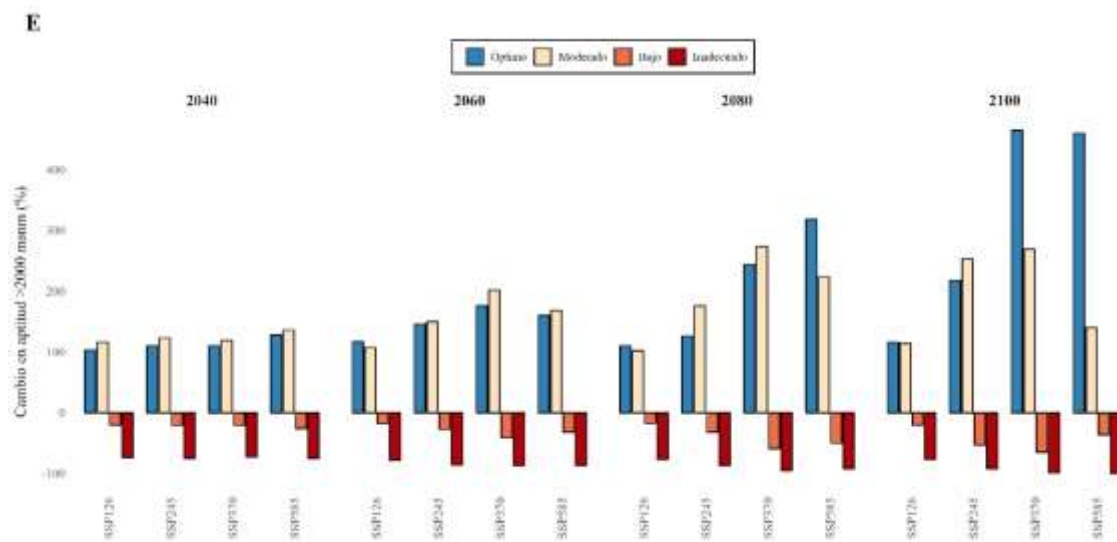


Figura 7. Distribución de los grados de aptitud en función de la altitud y escenarios climáticos futuros.

Discusión sobre la migración de la aptitud hacia zonas de mayor altitud

Läderach *et al.* (2017) encontraron que, en Nicaragua, la mayor aptitud para el cultivo de café se localizó entre los 800 y 1200 msnm, en el escenario actual. En comparación, nuestros resultados indican que la mayor cantidad de superficie óptima para el cultivo se ubica en el rango de 1500 a 2000 msnm. Sin embargo, coincidimos con Läderach *et al.* (2017) en que las zonas ubicadas por debajo de los 1500 msnm tendrán las mayores pérdidas de aptitud (Figura 7).

A nivel mundial, estudios como el de Grüter *et al.* (2022) indican que las regiones ubicadas a mayores altitudes y latitudes podrían volverse más aptas para la producción de café debido al cambio climático. En línea con nuestros resultados, Chemura *et al.* (2015) encontraron que la aptitud de las tierras migrará a zonas de mayor elevación y se reducirá en aquellas ubicadas a menor altitud. Asimismo, Läderach *et al.* (2017) reportaron una reducción del 25 % al 50 % de la superficie apta para la producción de café en zonas ubicadas entre los 500 y 800 msnm, incluso en el escenario más optimista. Según estos autores, esta disminución de la aptitud en zonas bajas afecta directamente atributos como la acidez y el sabor, factores críticos para la calidad del café.

Estudios como los Birthwright y Mighty (2023), Läderach *et al.* (2017), Bunn *et al.* (2015a), Ovalle-Rivera *et al.* (2015), Baca *et al.* (2014) y Schroth *et al.* (2009) coinciden en una reducción significativa de la aptitud de las tierras para la producción de café en las zonas de baja altitud, acompañada de una migración hacia zonas más elevadas. Este desplazamiento con respecto a las condiciones actuales sugiere que, a medida que las condiciones climáticas

se tornen insostenibles para el cultivo en altitudes bajas, las tierras aptas migrarán a mayores altitudes (Birthwright y Mighty, 2023), donde actualmente la producción enfrenta limitaciones por las bajas temperaturas (Schroth *et al.*, 2009). Según Läderach *et al.* (2017), esta condición obliga a plantear medidas de adaptación al cambio climático que consideren las condiciones altitudinales de las zonas de producción.

Schroth *et al.* (2009) identificaron que, en la Sierra Madre de Chiapas, se proyecta una disminución de la aptitud en las tierras ubicadas por debajo de los 1700 m, siendo más drástica entre los 1100 y 1200 m. Considerando este panorama, es importante destacar que la migración de las zonas aptas para la producción de café presenta múltiples limitaciones tanto físicas como sociales. Entre estas se incluyen restricciones en el acceso a tierras de mayor altitud, conflictos en el uso del suelo y la necesidad de ajustar las prácticas agrícolas a nuevas condiciones climáticas y topográficas (Birthwright y Mighty, 2023; Bunn *et al.*, 2015b; Chemura *et al.*, 2015 y Schroth *et al.*, 2009).

4.4. Distribución de las parcelas en los grados de aptitud actuales y futuros

La información presentada en el Cuadro 5 muestra la distribución del número de parcelas y la superficie por grado de aptitud a nivel estatal. Las parcelas ubicadas en el grado de aptitud óptimo constituyen el 12.3 % del total, abarcando el 11.7 % de la superficie. En contraste, el grado de aptitud moderado representa la mayor proporción, con el 51.2 % de las parcelas y el 50 % de la superficie. Por otro lado, las parcelas clasificadas con grado de aptitud bajo son la segunda categoría más representativa, con el 24.2 % de las parcelas y el 37.5 % de la superficie.

Por último, la cantidad de parcelas en tierras inadecuadas representando apenas el 0.4 % de las parcelas y el 0.9 % de la superficie cultivada. Asimismo, las áreas de exclusión (no consideradas en los grados de aptitud agrícola) comprenden el 11.9 % de las parcelas y el 7.9 % de la superficie. Esto resulta relevante, ya que estas zonas podrían desaparecer debido a un incremento en el tamaño de los asentamientos humanos urbanos.

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

Grado de aptitud	Parcelas		Superficie	
	Cantidad	%	Ha	%
Óptimo	39879	12.3	26707	11.7
Moderado	166165	51.2	114382	50.0
Bajo	78612	24.2	85671	37.5
Inadecuado	1354	0.4	1949	0.9
Exclusión	38758	11.9	18067	7.9
Total	324768	100.0	228709	100.0

En general, se concluye que, aunque la mayoría de las parcelas y la superficie se concentran en los grados de aptitud moderado y bajo, la proporción de parcelas ubicadas en áreas óptimas es significativamente baja, lo que pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias que optimicen el uso del suelo en zonas menos aptas y fortalezcan la sostenibilidad en las áreas más productivas.

La mayoría de las 324,768 parcelas cultivadas son de tamaño pequeño, como lo evidencia el análisis de los cuartiles, que muestra una marcada asimetría. El 25 % de las parcelas tienen una superficie menor a 0.25 ha, mientras que el 50 % no supera las 0.4 ha. Solo el 25 % de las parcelas excede las 0.66 ha. En el extremo superior, el 1% de las parcelas más grandes superan las 4.89 ha, y únicamente 1,558 productores cultivan parcelas mayores a 7 ha.

La alta fragmentación de la tierra agrícola tiene importantes implicaciones para la seguridad alimentaria de los productores. Según Avelino *et al.* (2015), aquellos con menos de 7 ha enfrentan serias dificultades para garantizar su seguridad alimentaria y generar excedentes comercializables. En este contexto, la gran mayoría de los productores de café en Chiapas se encuentran en riesgo de vulnerabilidad económica y alimentaria. Esta situación se ve agravada por el cambio climático, que se proyecta reducirá la productividad agrícola debido al aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos, así como a la mayor variabilidad climática (IPCC, 2021).

Además, el reducido tamaño promedio de las parcelas limita la capacidad de implementar prácticas agrícolas tecnificadas o la diversificación de cultivos, aumentando la dependencia de un modelo de subsistencia. Este panorama exige políticas públicas orientadas a fortalecer la tenencia de la tierra, mejorar la productividad en parcelas pequeñas y fomentar estrategias de adaptación al cambio climático. Entre estas estrategias destacan los sistemas agroforestales y las prácticas de manejo sostenible del suelo, que pueden mitigar estos riesgos y promover la resiliencia de los pequeños productores.

La evaluación del cambio en el porcentaje de parcelas distribuidas en cada grado de aptitud agrícola, considerando tanto el escenario actual (Cuadro 5) como los mapas de aptitud proyectados bajo diferentes horizontes de tiempo y trayectorias socioeconómicas compartidas, revela tendencias claras que destacan la influencia del cambio climático en la aptitud agrícola (Figura 8).

De acuerdo con la Figura 8, para el año 2040 se observa un ligero incremento en la proporción de parcelas ubicadas en tierras con grado de aptitud óptimo, acompañado de una disminución en el porcentaje de parcelas ubicadas en áreas con grado de aptitud moderado. A partir de 2060 y hacia los años 2080 y 2100, la tendencia general evidencia una disminución progresiva en el porcentaje de parcelas en zonas con grado de aptitud óptimo y moderado, mientras aumenta la proporción de parcelas ubicadas en grado de aptitud bajo e inadecuado. Este comportamiento es consistente con escenarios de mayor forzamiento radiativo (SSP370 y SSP585), donde las temperaturas más altas podrían limitar la capacidad productiva de las parcelas agrícolas, incluso en zonas que actualmente son óptimas para el cultivo.

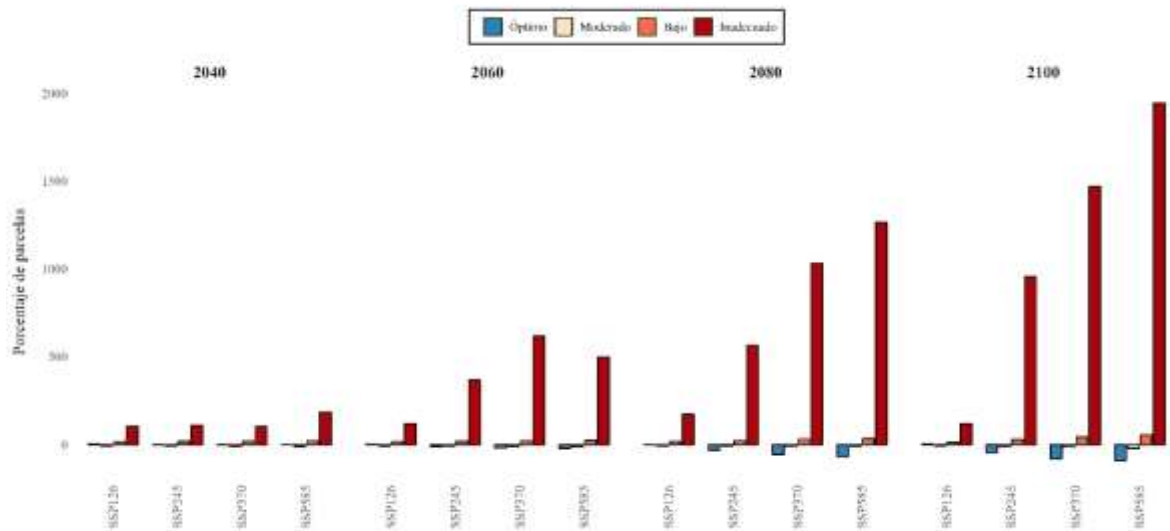


Figura 8. Proporción de parcelas clasificadas en cada nivel de aptitud agrícola en diferentes horizontes de tiempo y escenarios socioeconómicos compartidos.

El incremento de parcelas ubicadas en zonas no aptas para el cultivo hacia finales del siglo resalta un riesgo significativo para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en regiones vulnerables como Chiapas. Los cambios proyectados en las tierras óptimas para el cultivo, reflejan una alta exposición de los productores de café a los efectos del cambio, de manera similar a lo señalado por Baca *et al.* (2014). Esta situación podría tener graves implicaciones para la seguridad alimentaria, al reducir la superficie adecuada para la producción agrícola y al aumentar la presión sobre las áreas con condiciones marginales. Esto, a su vez, puede intensificar el uso insostenible del suelo, favorecer la degradación ambiental y contribuir a la pérdida de biodiversidad (Webb *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2024).

5.0. CONCLUSIONES

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

Los resultados muestran que, en las condiciones actuales, las tierras clasificadas con grado de aptitud óptimo representan la superficie más limitada (4.5%), mientras que las de aptitud moderada y baja abarcan la mayor proporción del estado. Este análisis proporciona una base sólida para comprender las restricciones edafoclimáticas que enfrenta actualmente la cafecultura en Chiapas.

El análisis realizado bajo los diferentes escenarios de cambio climático revela que, para los escenarios de mayor forzamiento radiativo (SSP370 y SSP585), las zonas óptimas podrían

reducirse drásticamente, con pérdidas de hasta el 60% hacia el año 2100. En contraste, en el escenario SSP126, se proyecta un ligero incremento en la superficie clasificada como óptima en los cuatro horizontes de tiempo. En cambio, las áreas no aptas podrían aumentar entre un 68% y un 361%, dependiendo del escenario y horizonte de tiempo.

Además, se identificó que las parcelas actualmente ubicadas en zonas con grado de aptitud óptimo y moderado se reducirán progresivamente, mientras que aquellas en condiciones de aptitud baja e inadecuada se incrementarán. Este desplazamiento generará implicaciones económicas y sociales significativas para los pequeños productores que dependen de esta actividad para su sustento.

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

6.0. AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de un esfuerzo técnico y científico, realizado por el Colegio de Postgraduados, con el apoyo del CONAHCYT a través del FORDECYT-PRONACES mediante el financiamiento al proyecto 319069 “Resiliencia y estabilidad socioecológica de la cafecultura mexicana bajo sombra: hacia nuevos paradigmas”.

7.0. LITERATURA CITADA

Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A. J., & Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), 303–321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>

Baca, M., Läderach, P., Haggard, J., Schroth, G., & Ovalle, O. (2014). An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. *PLoS ONE*, 9(2), e88463. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088463>

Bakri, S., Setiawan, A., & Nurhaida, I. (2018). Coffee bean physical quality: The effect of climate change adaptation behavior of shifting up cultivation area to a higher elevation. *Biodiversitas*, 19, 413–420. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190208>

529 Birthwright, A.-T., & Mighty, M. (2023). Risky business: Modeling the future of Jamaica's
530 coffee production in a changing climate. *Climate*, 11(6), 122.
531 <https://doi.org/10.3390/cli11060122>

532 Bracken, P., Burgess, P., & Girkin, N. (2023). Opportunities for enhancing the climate
533 resilience of coffee production through improved crop, soil and water management.
534 *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47, 1125 - 1157.
535 <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2225438>.

536 Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O., & Kirschke, D. (2015a). A bitter cup: Climate
537 change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*,
538 129(1–2), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>

539 Bunn, C., Läderach, P., Pérez Jiménez, J. G., Montagnon, C., & Schilling, T. (2015b).
540 Multiclass classification of agro-ecological zones for Arabica coffee: An improved
541 understanding of the impacts of climate change. *PLoS ONE*, 10(10), e0140490.
542 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140490>

543 Chemura, A., Kutwayo, D., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2015). Bioclimatic modelling of
544 current and projected climatic suitability of coffee (*Coffea arabica*) production in
545 Zimbabwe. *Regional Environmental Change*, 16(2), 473–485.
546 <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0762-9>

547 Chemura, A., Mudereri, B. T., Yalew, A. W., & Gornott, C. (2021). Climate change and
548 specialty coffee potential in Ethiopia. *Scientific Reports*, 11(1), 87647.
549 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87647-4>

550 Davidson, S. (2004). Shade coffee agro-ecosystems in Mexico. *Journal of Sustainable*
551 *Forestry*, 21(1), 81–95. https://doi.org/10.1300/J091v21n01_05

552 De Sousa, K., van Zonneveld, M., Holmgren, M., Kindt, R., & Ordoñez, J. C. (2019). The
553 future of coffee and cocoa agroforestry in a warmer Mesoamerica. *Scientific Reports*,
554 9(1), 45491. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45491-7>

555 Delgado, M. G., & Sendra, J. B. (2004). Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-
556 making: A review. *Human and Ecological Risk Assessment: An International*
557 *Journal*, 10(6), 1173–1187. <https://doi.org/10.1080/10807030490887221>

558 Fain, S. J., Quiñones, M., Álvarez-Berrios, N. L., Parés-Ramos, I. K., & Gould, W. A. (2018).
559 Climate change and coffee: Assessing vulnerability by modeling future climate
560 suitability in the Caribbean island of Puerto Rico. *Climatic Change*, 146(1–2), 175–
561 186. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1949-5>

562 Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate
563 surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–
564 4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

565 Grüter, R., Trachsel, T., Laube, P., & Jaisli, I. (2022). Expected global suitability of coffee,
 566 cashew and avocado due to climate change. *PLoS ONE*, 17(1), e0261976.
 567 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261976>

568 Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M.,
 569 Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B.,
 570 Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B.,
 571 Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids 250m: Global
 572 gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE*, 12(2), e0169748.
 573 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>

574 Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high
 575 resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal*
 576 *of Climatology*, 25(15), 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>

577 Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). Textura: Edafología 2006
 578 (Serie II). Recuperado de <https://map.ceieg.chiapas.gob.mx/geoweb/>

579 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The
 580 physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment
 581 Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University*
 582 *Press*. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

583 Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., Etienne, H.,
 584 Turreira-García, N., Rigal, C., Vaast, P., Ramalho, J. C., Marraccini, P., & Ræbild,
 585 A. (2022). Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under
 586 climate change? A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 877476.
 587 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>

588 Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Navarro-Racines, C., Zelaya, C., Martínez-Valle, A., &
 589 Jarvis, A. (2017). Climate change adaptation of coffee production in space and time.
 590 *Climatic Change*, 141(1), 47–62. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1788-9>

591 López-Carmona, D., Gallegos, A., Palma-López, D. J., Martín-Morales, G., Barragán-
 592 Maravilla, M., Hernández-Vallecillo, G., & Bautista, F. (2021). Selección de tierras
 593 para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio
 594 y conocimiento local. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8, e2419.
 595 <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2419>

596 Manzano, S. L. R., Pineda, N. B., & Gómez-Albores, M. A. (2019). Método de evaluación
 597 multicriterio. En Buzai, G. D. & Santana, M. V. (Eds.), *Métodos cuantitativos en*
 598 *geografía humana* (pp. 193–208). Impresiones Buenos Aires Editorial.

599 Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015). Projected
 600 shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to
 601 climate change. *PLoS ONE*, 10(4), e0124155.
 602 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>

- Ranjitkar, S., Sujakhu, N. M., Merz, J., Kindt, R., Xu, J., Matin, M. A., Ali, M., & Zomer, R. J. (2016). Suitability analysis and projected climate change impact on banana and coffee production zones in Nepal. *PLoS ONE*, 11(9), e0163916. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163916>
- Schroth, G., Läderach, P., Dempewolf, J., Philpott, S., Hagggar, J., Eakin, H., & Ramirez-Villegas, J. (2009). Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14(7), 605–625. <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9186-5>
- Shinbrot, X., Jones, K., Rivera-Castañeda, A., López-Báez, W., & Ojima, D. (2019). Smallholder farmer adoption of climate-related adaptation strategies: The importance of vulnerability context, livelihood assets, and climate perceptions. *Environmental Management*, 63, 583–595. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01152-z>
- SIAP. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola por estado*. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Sys, C., van Ranst, E., Debaveye, J., & Beernaert, F. (1993). Crop requirements. En *Land Evaluation Part 3* (Agricultural Publications No. 7).
- Tavares, P., Giarolla, A., Chou, S., Silva, A., & Lyra, A. (2018). Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. *Regional Environmental Change*, 18, 873–883. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1236-z>.
- WorldClim Global Climate Data. (2024). Recuperado de <http://www.worldclim.org/bioclim>
- Webb, N., Marshall, N., Stringer, L., Reed, M., Chappell, A., & Herrick, J. (2017). Land degradation and climate change: Building climate resilience in agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15, 450–459. <https://doi.org/10.1002/FEE.1530>
- Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C., Zhu, Y., Burney, J., D'Odorico, P., Fantke, P., Fargione, J., Finlay, J. C., Rulli, M. C., Sloat, L., Groenigen, K. J., West, P. C., Ziska, L., Michalak, A. M., & Lobell, D. (2024). Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. *Science*, 385. <https://doi.org/10.1126/science.adn3747>