



Environment
Canada

Environnement
Canada

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE EVALUACIÓN
Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio
de las personas
y las naciones

Impacto potencial del cambio climático sobre los suelos de México ante un aumento de la temperatura media global de 1.5°C

INFORME FINAL

2017

Documento generado a
partir de los resultados
de la consultoría
realizada por:

Jesús David Gómez Díaz

Serie

2

Evaluación y mapeo de la vulnerabilidad
y los riesgos climáticos

Derechos Reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Colonia Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CP.11000, Ciudad de México.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CP. 14210, Ciudad de México.

Todos los derechos están reservados. Ni esta publicación ni partes de ella pueden ser reproducidas, almacenadas mediante cualquier sistema o transmitidas, en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, de fotocopiado, de grabado o de otro tipo, sin el permiso previo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

El análisis y las conclusiones aquí expresadas no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados Miembros, o del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Documento generado a partir de los resultados de la consultoría realizada por: Jesús David Gómez Díaz.

Citar como:

PNUD México-INECC. 2017. *Impacto potencial sobre los suelos de México ante un aumento de la temperatura media global de 1.5°C*. Proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”. 105 pp. Jesús David Gómez Díaz. México.

Esta publicación fue desarrollada en el marco del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México” del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Agradecimiento:

Al gobierno de Canadá a través de Environment Canada por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto 86487 “Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México”, durante 2014-2018. Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático por el apoyo prestado para el buen desarrollo.

CONTENIDO

1. Resumen Ejecutivo	10
2. Introducción	12
3. Objetivos	13
4. Antecedentes de los impactos potenciales del Cambio Climático ante un aumento de temperatura media global de 1.5°C a nivel mundial	14
4.1 Impacto Potencial en la Precipitación	15
4.2 Impacto Potencial en el ciclo del agua	15
4.3 Impacto potencial en los rendimientos de los cultivos	15
5. Antecedentes de evaluaciones de impactos potenciales del cambio climático en los suelos de México	17
5.1 Evapotranspiración Potencial (ETP)	17
5.2 Régimen y Balance De Humedad Del Suelo	21
5.2.1 Régimen de Humedad	21
5.2.2 Balance de Humedad	25
5.3 Régimen de temperatura del suelo	27
5.4 Evaluación de la degradación del suelo	30
5.4.1 Erosión Hídrica	32
5.5 Carbono orgánico de los suelos agrícolas	33
5.6 Potencial productivo de los suelos agrícolas	35
6. Metodología	41
6.1 Determinación de las variables climáticas	41
6.2 Determinación del régimen de humedad del suelo	41
6.3 Determinación del régimen térmico del suelo	41
6.4 Determinación de la evapotranspiración potencial	44
6.5 Determinación del Índice de aridez	47
7. Resultados obtenidos ante un aumento de la temperatura media global de 1.5°C	49
7.1 Régimen de Humedad del Suelo	49
7.1.1 Régimen de humedad del suelo bajo condiciones actuales	49

7.1.2 Régimen de Humedad del Suelo al Considerar un Incremento en la temperatura media global de 1.5°C	51
7.2 Régimen de temperatura del suelo	61
7.2.1 Régimen de temperatura del suelo bajo condiciones actuales	61
7.2.2 Régimen de temperatura del suelo al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C	62
7.3 Evapotranspiración Potencial	72
7.3.1 Evapotranspiración Potencial Bajo Condiciones Actuales	72
7.3.2 Evapotranspiración potencial al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C	74
7.4 Índice de aridez	83
7.4.1 Índice de aridez bajo condiciones actuales	83
7.4.2 Índice de aridez al considerar un Incremento en la temperatura media global de 1.5°C	85
8. Análisis de resultados	94
8.1 Régimen de humedad del suelo	94
8.2 Régimen de Temperatura del Suelo	95
8.3 Evapotranspiración Potencial	95
8.4 Índice de Aridez	96
9. Literatura Citada	98
10. Glosario de Términos	102

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie Y Porcentaje Del Rango En Días Del Periodo De Crecimiento En Las Tierras Agrícolas Del País Para Las Condiciones Actuales.	26
Cuadro 2. Superficie Y Porcentaje De Desertificación Integrada En México Para Las Condiciones Climáticas Actuales Y Bajo Escenarios De Cambio Climático Estimados Para El 2050 Y Escenario Socioeconómico A2 Con Los Modelos Gfdl Y Modelo Hadgem.	31
Cuadro 3. Erosión Hídrica Bajo Escenarios De Cambio Climático Para Los Escenarios A Corto Y Mediano Plazo Para El Rcp 4.5 Y 8.5.	32
Cuadro 4. Superficie Y Porcentaje De Los Grados De Erosión Hídrica De Los Suelos Agrícolas De México En El Escenario A Mediano Plazo (2045-2069) Con Los Diferentes Modelos Utilizados En El Rcp8.5 Watts M ⁻² .	33
Cuadro 5. Superficie Y Porcentaje Del Carbono Orgánico Del Suelo (Cos) En Las Áreas Agrícolas De México.	34
Cuadro 6. Estimación De La Duración De Las Etapas Siembra-Floración Y Floración-Madurez Fisiológica Del Trigo Bajo Diferentes Fechas De Siembra Con Cambio Climático.	38
Cuadro 7. Factores De Ajuste A La Temperatura Media Del Aire Para Estimar La Temperatura Media Del Suelo En Climas Con Tipo De Lluvia De Invierno (Elaborada Por Gómez, 2016).	42
Cuadro 8. Factores De Ajuste A La Temperatura Media Del Aire Para Estimar La Temperatura Media Del Suelo En Climas Con Tipo De Lluvia Intermedia O De Verano (Elaborada Por Gómez, 2016).	43
Cuadro 9. Tipos Climáticos Definidos Por El Índice De Aridez De Acuerdo A Los Criterios De La Cnuld.	48
Cuadro 10. Superficie Y Porcentaje Del Régimen De Humedad Del Suelo Bajo Condiciones Actuales En La República Mexicana.	49
Cuadro 11. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Del Régimen De Humedad Del Suelo Actual Y Bajo Los Escenarios De Cambio Climático Con Un Rcp 4.5 Y Un Aumento De Temperatura Media Global De 1.5°C.	52
Cuadro 12. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Del Régimen De Humedad Actual Del Suelo Y Bajo Los Escenarios De Cambio Climático Con Un Rcp 8.5 Y Un Aumento De Temperatura Media Global De 1.5°C.	56
Cuadro 13. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje De Los Actuales Regímenes De Temperatura Del Suelo De México.	61
Cuadro 14. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje De Los Regímenes De Temperatura Del Suelo En El Escenario Base Y Con Los Modelos Gfdel, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 4.5 Watts M ⁻² .	63

Cuadro 15. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje De Los Regímenes De Temperatura En El Escenario Base Y Con Los Modelos Gfdel, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 8.5 Watts M-2.	67
Cuadro 16. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje De Los Rangos De Evapotranspiración Potencial (Etp) En La República Mexicana.	72
Cuadro 17. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Por Rangos De Etp (Mm) En La República Mexicana Al Considerar Un Incremento En La Temperatura Media Global De 1.5°C Con El Escenario Base Y Los Modelos Gfdl, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 4.5 Watts M-2.	75
Cuadro 18. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Por Rangos De Etp (Mm) En La República Mexicana Al Considerar Un Incremento En La Temperatura Media Global De 1.5°C Con El Escenario Base Y Los Modelos Gfdl, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 8.5 Watts M-2.	79
Cuadro 19. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Del Índice De Aridez En La República Mexicana Bajo Las Condiciones Actuales.	84
Cuadro 20. Índice De Aridez En La República Mexicana Al Cosiderar Un Incremento En La Temperatura Media Global De 1.5°C Con El Escenario Base Y Los Modelos Gfdl, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 4.5 Watts M-2.	86
Cuadro 21. Superficie (Miles De Ha) Y Porcentaje Del Índice De Aridez En La República Mexicana Al Considerar Un Incremento En La Temperatura Media Global De 1.5°C Con El Escenario Base Y Los Modelos Gfdl, Hadgem Y Mpi Para El Rcp 8.5 Watts M-2.	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura media global para los escenarios de emisiones evaluados por el IPCC y el PNUMA. Probabilidad de mantener el calentamiento por debajo de 2 °C durante todo el siglo XXI y por debajo de 1.5 ° C para 2100 (lo que permite el rebasamiento en cualquier momento antes de 2100, si la probabilidad es al menos del 50%). Fuente: Schleussner et al., 2016.	14
Figura 2. Cambio en los cultivos de maíz, trigo, arroz y soya para las zonas agrícolas tropicales con aumentos de 1.5°C y 2°C. Fuente: Schleussner et al., 2016.	16
Figura 3. Distribución de la Evapotranspiración Actual (mm) en México. Fuente: PNUD-INECC, 2016	18
Figura 4. Superficie en porcentaje de la Evapotranspiración Potencial en México bajo el escenario RCP 4.5 para el periodo 2015-2039. Fuente: PNUD-INECC, 2016.	19
Figura 5. Superficie en porcentaje de la Evapotranspiración Potencial en México bajo el escenario RCP 8.5 para el periodo 2045-2069. Fuente: PNUD-INECC, 2016.	19
Figura 6. Variación diaria de la evapotranspiración (ETc) del distrito de riego 075 en Sinaloa, México, para un año agrícola típico en cuatro escenarios de tiempo con cambio climático. Fuente: Bustamante et al., (2011).	20

Figura 7. Regímenes de humedad de los suelos de México para la condición actual. Fuente: PNUD-INECC, 2016. 21

Figura 8. Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio: a) Actual; b) simbología; c) CNRM; d) GFDL; e) HADGEM y f) MPI. Fuente: PNUD-INECC, 2016. 22

Figura 9. Distribución gráfica del Régimen de Humedad actual en las zonas agrícolas de México. Fuente: INECC-UACH, 2016. 24

Figura 10. Porcentaje de la superficie por rangos de días de periodo húmedo en los periodos de tiempo a corto y mediano plazo utilizando cinco modelos para el RCP 8.5 Watts m⁻² en las zonas agrícolas de México. Fuente: INECC-UACH, 2016. 25

Figura 11. Porcentaje de la superficie por rangos de días de periodo de crecimiento en los horizontes de tiempo a corto y mediano plazo y los cinco modelos propuestos para el RCP 8.5 Watts m⁻² en las zonas agrícolas de México. Fuente: INECC-UACH, 2016. 27

Figura 12. Regímenes de temperatura del suelo actual en México. Fuente: PNUD-INECC, 2016. 28

Figura 13. Superficie de los Regímenes de Temperatura de los suelos de México bajo el RCP 4.5 para el periodo 2045-2069 en miles de hectáreas. Fuente: PNUD-INECC, 2016. 29

Figura 14. Superficie de los Regímenes de temperatura de los suelos de México bajo el RCP 8.5 para el periodo 2045-2069, en miles de ha. Fuente: PNUD-INECC, 2016. 30

Figura 15. Porcentaje de la superficie de los Rangos de Carbono orgánico de los suelos agrícolas de México en Mg ha⁻¹ en los horizontes a corto y mediano plazo y los cinco modelos propuestos para el RCP 8.5 watts m². Fuente: INECC-UACH, 2016. 34

Figura 16. Áreas potenciales para maíz con escenarios de cambio climático 2051-2060, a) en la región valles altos; b) región tropical. Fuente: Ruiz et al., 2011. 37

Figura 17. Rendimiento de los cultivos con escenarios de cambio climático para a) Maíz, b) Frijol variedad de altura, c) Frijol variedad tropical, d) Sorgo, e) Cebada, f) Trigo. Fuente: INECC-UACH, 2016. 40

Figura 18. Distribución gráfica del Régimen de humedad del suelo bajo condiciones actuales en la República mexicana. 50

Figura 19. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de Humedad del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5. 53

Figura 20. Distribución gráfica de los Regímenes de humedad del suelo: a) escenario base; b) modelos GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² 54

Figura 21. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de Humedad del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8. 57

Figura 22. Distribución gráfica de los Regímenes de humedad: a) escenario base; b) modelos GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² 58

Figura 23. Comparación de la superficie en porcentaje de los Regímenes de humedad del suelo bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C. 60

Figura 24. Régimen de temperatura del suelo bajo condiciones actuales en la República Mexicana. 62

Figura 25. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de temperatura en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5. 64

Figura 26. Distribución gráfica de los Regímenes de temperatura del suelo: a) escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² 65

Figura 27. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de temperatura del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5. 68

Figura 28. Distribución gráfica de los Regímenes de temperatura del suelo: a) escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² 69

Figura 29. Comparación de la superficie en porcentaje de los Regímenes de temperatura del suelo bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C. 71

Figura 30. Distribución gráfica de los rangos de Evapotranspiración Potencial (ETP mm) actual en la República Mexicana. 73

Figura 31. Porcentaje de la superficie por rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² en la República Mexicana. 76

Figura 32. Distribución de los rangos de ETP (mm) en la República Mexicana para el RCP 4.5 Watts m⁻² con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI. 77

Figura 33. Porcentaje de la superficie por rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² en la República Mexicana. 80

Figura 34. Distribución de los rangos de ETP (mm) en la República Mexicana para el RCP 8.5 Watts m⁻² con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI. 81

Figura 35. Comparación de la superficie en porcentaje de los Rangos de ETP (mm) bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C. 82

Figura 36. Distribución gráfica del Índice de Aridez de la República Mexicana bajo condiciones actuales. 84

Figura 37. Porcentaje de la superficie del índice de aridez en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² en la República Mexicana 87

Figura 38. Distribución de los Índices de Aridez en la República Mexicana para el RCP 4.5 Watts m⁻² con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI 88

Figura 39. Porcentaje de la superficie del índice de aridez en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² en la República Mexicana 91

Figura 40. Distribución de los Índices de Aridez en la República Mexicana para el RCP 8.5 Watts m⁻² con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI. 92

Figura 41. Comparación de la superficie en porcentaje de los Rangos de ETP (mm) bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C. 93

1. Resumen Ejecutivo

El objetivo de este trabajo fue evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre los suelos de México, a partir del análisis del régimen esperado de humedad del suelo y temperatura del suelo, evapotranspiración potencial, así como el índice de aridez, considerando un incremento en la temperatura media global de 1.5°C utilizando los escenarios HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 Watts m⁻² y el RCP 8.5 Watts m⁻² para el horizonte de tiempo 2041. Atendiendo la necesidad del Acuerdo de París.

El régimen de humedad del suelo se estimó con la aplicación del Modelo Newhall propuesto por el Soil Survey Staff (1975) y actualizado por Van Wambeke (2000). Los resultados obtenidos en el Régimen de humedad del suelo bajo la condición actual muestran que el 41.53% del territorio nacional presenta el régimen Árido lo que significa que 81.58 millones de ha presentan suelos secos durante todo el año. Ante un aumento de la temperatura de 1.5°C utilizando el RCP 4.5 watts m⁻² hay un desplazamiento de la superficie a regímenes más secos en todos los modelos, principalmente con los modelos HADGEM y MPI en donde el Régimen Árido aumenta a 45.58% (89.53 millones de ha) y 45.39% (89.15 millones de ha) del total de la superficie nacional respectivamente. Este mismo comportamiento sucede utilizando el RCP 8.5 watts m⁻² con los modelos MPI y GFDL en donde los suelos secos durante todo el año incrementan a 45.72% (89.81 millones de ha) y 42.82% (84.09 millones de ha) respectivamente; mientras que con el modelo HADGEM se observa una disminución del Régimen Árido a 38.12% (74.87 millones de ha) y un aumento del Sub-régimen Tropústico típico (19.96%) y Tempústico típico (8.88%)

El régimen térmico del suelo se determinó mediante el clima, pendiente, cobertura vegetal y aplicando los principios del USDA (1964), con el objetivo de estimar la temperatura media mensual del suelo a partir de la temperatura media del aire. Bajo condiciones actuales se tiene que el 92% de la superficie nacional tiene regímenes de temperatura del suelo con temperaturas medias anuales iguales o superiores a 15°C. En donde el Régimen Térmico se concentra en el 44.37% (87.16 millones de ha) del territorio nacional seguido del Régimen Hipertérmico con el 40.52% (49.59 millones de ha). Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 4.5 Watts m⁻² el régimen Térmico disminuyó su superficie con todos los modelos en un rango de -14.24% a -11.16% de la superficie nacional siendo el modelo GFDL el que presenta el cambio más drástico disminuyendo a 30.13% (59.18 millones de ha) mientras que el Régimen Hipertérmico aumenta en todos los modelos a una razón de cambio de +14.35% a +16.63% del total de la superficie del país, donde el aumento más drástico es con el modelo HADGEM alcanzando el 57.15% del territorio nacional (112.25 millones de ha). Bajo el RCP 8.5 watts m⁻² el Régimen Térmico disminuye a una razón de cambio de -15.88% a -11.16% de la superficie nacional siendo el modelo HADGEM el que presenta el cambio más drástico disminuyendo a 28.49% (55.97 millones de ha) mientras que el Régimen Hipertérmico aumentó a una razón de cambio de +15.57% a +23.22% del total de la superficie del país, donde el aumento más drástico se dio nuevamente con el modelo HADGEM obteniendo el 63.74% de la superficie nacional (125.21 millones de ha). Tanto en el RCP 4.5 como en el RCP

8.5 se observó un desplazamiento de la superficie del país en general a regímenes de temperatura más cálidos, y también se observa que tienden a modificarse en mayor medida los regímenes de temperatura con oscilaciones térmicas extremas.

La evapotranspiración potencial se obtuvo utilizando la metodología descrita por Penman modificado por Monteith (Sys et al, 1993). Los resultados obtenidos sobre la condición actual arrojaron que el 42% de la superficie de México (82.29 millones de ha) cuenta con una ETP de 1401-1600 mm, seguido del rango de 1201-1400 mm 28.5% (55.94 millones de ha), el 3.61% (7.08 millones de ha) presenta los rangos con mayor ETP (1801-2200), mientras que el 1.86% del territorio nacional (3.64 millones de ha) presenta los menores rangos de ETP (380-1000). Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 4.5 Watts m⁻² se tiene que el rango de 1401-1600 tiene un decremento en superficie con todos los modelos (-2.26% a 11.86%) llegando a 30.04% del total de la superficie del país (59.01 millones de ha) utilizando el modelo GFDL, mientras que el rango de 1601-1800 mm aumenta considerablemente en los tres modelos estudiados a una razón de cambio que va de +13.47 a +24.12 teniendo el porcentaje más alto con el modelo GFDL (37.57% del territorio nacional); los rangos con menor ETP (380-1000) disminuyen en todos los modelos alcanzando tan solo el 0.15% del territorio nacional (0.30 millones de ha) con el modelo GFDL. Mientras que los rangos con mayor ETP (1801-2200) tienden a aumentar alcanzando 13.58% (26.66 millones de ha) con el modelo HADGEM; de manera general se tiene que el modelo que mostró mayores cambios en superficie fue GFDL, seguido de HADGEM. Bajo el RCP 8.5 Watts m⁻² se encontró que el rango de 1401-1600 nuevamente tiene un decremento en superficie con todos los modelos (-10.09% a 14.73%) llegando a 27.17% del total de la superficie del país (53.36 millones de ha) utilizando el modelo HADGEM, mientras que el rango de 1601-1800 mm aumenta considerablemente en los tres modelos estudiados a una razón de cambio que va de +22.07% a +24.22% teniendo el porcentaje más alto con el modelo HADGEM (37.67% del territorio nacional); los rangos con menor ETP (380-1000) disminuyen en todos los modelos alcanzando tan solo el 0.08% del territorio nacional (164.7 ha) con el modelo HADGEM. Mientras que los rangos con mayor ETP (1801-2200) tienden a aumentar alcanzando 17.64% (34.65 millones de ha) con el mismo modelo. En este caso el modelo que tuvo mayores cambios en superficie fue HADGEM. Tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 aparece un nuevo rango que va de 2201-2400 mm alcanzando 0.28% y 0.33% respectivamente con los modelos HADGEM y GFDL.

El Índice de Aridez (IA) se calculó a partir de la relación P/ETP. Los valores en la clasificación del Índice de Aridez se determinaron mediante el criterio de la Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNUCLD, 1994). Bajo el escenario actual se tiene que el 64.88% del territorio nacional (127.44 millones de ha) cuenta con tierras secas mientras que el 35.12% (68.99 millones de ha) cuenta con tierras no secas. El índice que tiene mayor superficie nacional clasificado dentro de las tierras secas es el Semiárido ocupando el 34.01% (66.79 millones de ha). Dentro de las tierras no secas el índice con mayor superficie es el Húmedo con el 18.05% (35.46 millones de ha). Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 4.5 Watts m⁻² se observa que las Tierras Secas aumentarán en los tres

modelos a una razón de cambio de +3.45% a +8.19%, alcanzando el 73.07% (143.53 millones de ha) de la superficie nacional con el modelo HADGEM. Los índices de las tierras no secas disminuirán en los tres modelos evaluados a una razón de cambio de -3.45% a -8.19%, obteniendo la mayor disminución con el modelo HADGEM (26.93% del total de la superficie). En el RCP 8.5 se aprecia que nuevamente la categoría de Tierras Secas aumenta en los tres modelos en +3.42% a +10.21% del porcentaje de la superficie del país, teniendo un mayor incremento con el modelo HADGEM alcanzando el 75.09% del territorio nacional. En cuanto a la categoría de Tierras no secas se tiene que disminuye al igual que con el RCP 4.5 Watts m⁻² en -3.42% a -10.21%, obteniendo una mayor disminución con el modelo HADGEM representando tan solo el 24.91% del territorio nacional. Tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 se tiene que HADGEM fue el modelo que presentó mayores cambios en superficie en la mayoría de los índices.

2. Introducción

La realización de este trabajo atiende la necesidad del Acuerdo de París en donde se establece mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2 °C de los valores estimados en los niveles preindustriales y siguiendo los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C. Alentando a la comunidad científica a abordar las deficiencias de información y de investigación, incluyendo escenarios que limiten el calentamiento a menos de 1.5 °C en relación con los niveles preindustriales para 2100, así como los impactos potenciales en las escalas regionales y locales asociadas con dichos escenarios.

Tomando en cuenta lo anterior, la Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México desea profundizar los conocimientos sobre los posibles impactos potenciales y las oportunidades que surgirán para la agricultura nacional y los diferentes sistemas naturales y manejados, en condiciones de cambio climático, considerando el estado que guardan los suelos ante un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre los suelos de México, a partir del análisis del régimen esperado de humedad del suelo y temperatura del suelo, evapotranspiración potencial, así como el índice de aridez, considerando un incremento en la temperatura media global de 1.5°C utilizando los escenarios HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5 para el horizonte de tiempo 2041, los escenarios fueron otorgados por la Consultoría: SDC-89-2016 como producto de la Sexta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

3. Objetivos

- Analizar el impacto potencial del cambio climático sobre el Régimen esperado de Humedad de los suelos de México, al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C.
- Analizar el impacto potencial del cambio climático sobre el Régimen esperado de Temperatura de los suelos de México, al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C.
- Analizar el impacto potencial del cambio climático sobre la Evapotranspiración potencial de México, al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C.
- Analizar el impacto potencial del cambio climático sobre el Índice de aridez de México, al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C.

4. Antecedentes de los impactos potenciales del Cambio Climático ante un aumento de temperatura media global de 1.5°C a nivel mundial

En la actualidad existe un importante vacío con respecto a investigaciones que han abordado los impactos potenciales climáticos en el suelo ante un aumento de la temperatura media global de 1.5 °C ya que todos los estudios que se han realizado han evaluado los impactos potenciales con escenarios AR5 del IPCC que superan al menos temporalmente el límite de 1.5 °C antes de 2100 (Fig. 1, Schleussner et al., (2016)); sin embargo ante la solicitud de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y atendiendo el Acuerdo de París de mantener el aumento de la temperatura media mundial a niveles inferiores a los 2 °C y de seguir esforzándose por limitarlo a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales, algunos investigadores han hecho el esfuerzo de proporcionar información general de los impactos potenciales climáticos que se tendrán bajo esas circunstancias, por lo que en este apartado se presenta un breve resumen de dichas investigaciones.

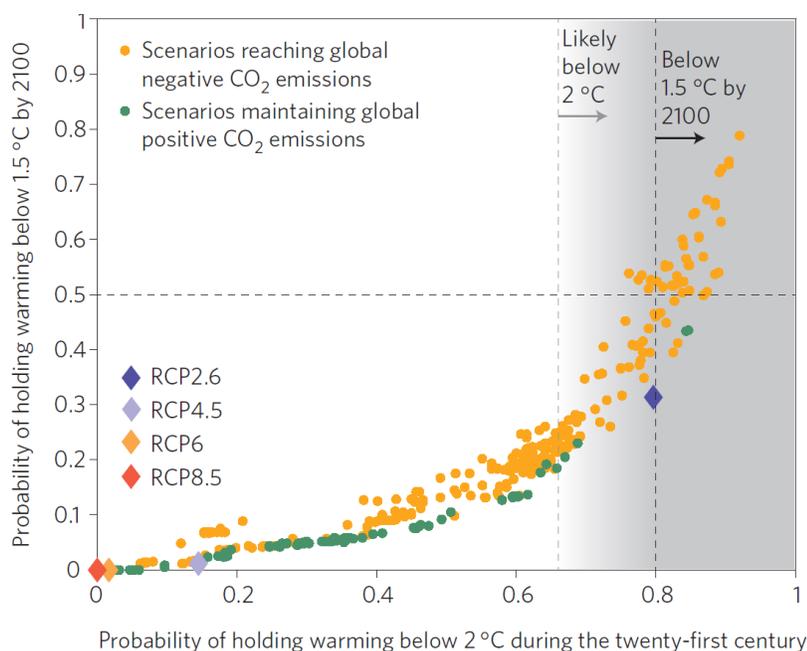


Figura 1. Temperatura media global para los escenarios de emisiones evaluados por el IPCC y el PNUMA. Probabilidad de mantener el calentamiento por debajo de 2 °C durante todo el siglo XXI y por debajo de 1.5 °C para 2100 (lo que permite el rebasamiento en cualquier momento antes de 2100, si la probabilidad es al menos del 50%). **Fuente:** Schleussner et al., 2016.

4.1 Impacto Potencial en la Precipitación

Schleussner et al., (2016) realizaron una investigación evaluando los posibles impactos potenciales climáticos que habrá ante un aumento de temperatura media global de 1.5 °C y 2 °C por encima de los niveles preindustriales, tomando estudios realizados en el periodo de 1986-2005 considerando un calentamiento de 0.9 °C – 1.4 °C por encima del pasado reciente, basado en los escenarios disponibles en la literatura actual. Encontrando que los eventos de precipitación extrema debido al calentamiento antropogénico son evidentes a partir del registro observacional, y la intensidad de dichos eventos tendrá una tendencia de aumento si existe un calentamiento de 1.5 °C y 2 °C. De igual manera, se estima que la probabilidad de ocurrencia global de un evento de precipitación extrema de 1-en-1000 días aumentará en un 45% a 1.5 °C en comparación con los niveles preindustriales y 65% a 2 °C (Fischer, 2015).

4.2 Impacto Potencial en el ciclo del agua

Los cambios en el ciclo del agua pueden afectar a la mitad de la población mundial a un calentamiento de 2 °C (Sedláček y Knutti, 2014). Contrariamente a la afectación a un aumento casi global en las precipitaciones fuertes, sólo se prevé que aproximadamente el 25% de la superficie terrestre experimentará cambios sustanciales de la sequía a 2 °C. Los cambios proyectados son más pronunciados para las regiones subtropicales, en particular para el Mediterráneo. Los patrones de cambio en la disponibilidad de agua son similares a los cambios en los extremos del ciclo del agua. Al mismo tiempo, se prevé una disminución de la disponibilidad de agua en las regiones subtropicales (Schleussner et al., 2016).

4.3 Impacto potencial en los rendimientos de los cultivos

Debido a la diversidad de métodos que existen para calcular los rendimientos futuros de los cultivos y a la cantidad de factores que afectan las proyecciones, hacen difícil una diferenciación entre los impactos potenciales climáticos en los rendimientos de los cultivos entre 1.5 °C y 2°C, sin embargo, Schleussner et al., (2016) encontraron que se proyectan reducciones del rendimiento del cultivo local de trigo y maíz sobre el área de tierra tropical (30 ° S-30 ° N) a 1.5 °C, con reducciones más significativas proyectadas a 2 °C. La vulnerabilidad de la producción de trigo y maíz en las regiones tropicales también es evidente a partir de un meta-análisis de las proyecciones de rendimiento de los cultivos. Utilizando proyecciones de conjuntos de modelos múltiples que se asemejan a los rendimientos observados, se estima que la producción mundial de trigo disminuirá en aproximadamente 6% por 1 °C de calentamiento (Asseng et al., 2015).

A 1.5 °C y 2 °C de calentamiento, el arroz local y los rendimientos de soya se prevé que aumenten en los trópicos en comparación con los rendimientos actuales, ya que el efecto positivo de la fertilización de CO₂ contrapesa los efectos perjudiciales del cambio climático en las proyecciones del modelo. Sin embargo, las ganancias adicionales para el calentamiento por

encima de 1.5 °C son limitadas y las reducciones son evidentes para todos los tipos de cultivos para las proyecciones que excluyen los efectos de la fertilización con CO₂ (Schleussner et al., 2016). En la Figura 2 se muestran los cambios que habrá en los cultivos de maíz, trigo, arroz y soya para las zonas agrícolas tropicales actuales (por debajo de 30 ° N / S) ante un incremento de la temperatura media global de 1.5°C y 2 °C.

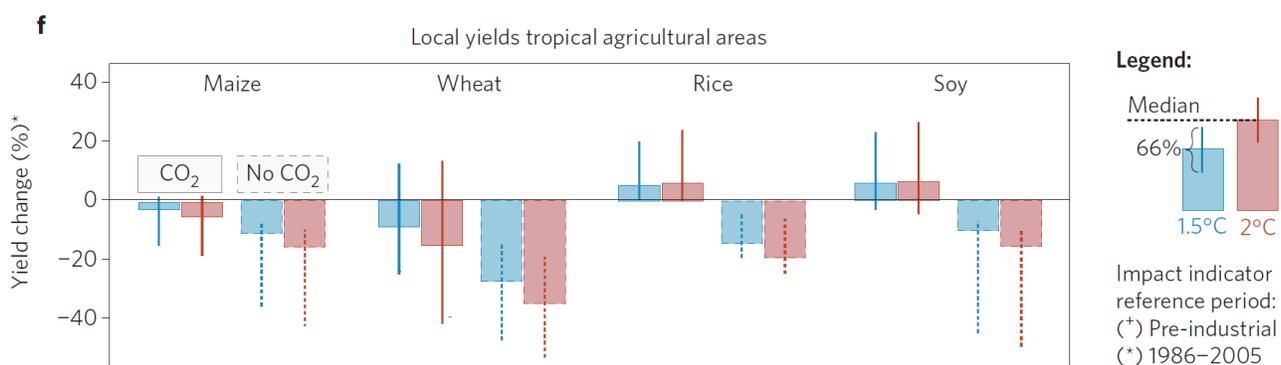


Figura 2. Cambio en los cultivos de maíz, trigo, arroz y soya para las zonas agrícolas tropicales con aumentos de 1.5°C y 2°C. **Fuente:** Schleussner et al., 2016.

5. Antecedentes de evaluaciones de impactos potenciales del cambio climático en los suelos de México

Como ya se mencionó anteriormente, en la actualidad no se han explorado los impactos potenciales del cambio climático del suelo ante un aumento global de la temperatura de 1.5 °C, por lo que el siguiente análisis se basa en los escenarios disponibles en la literatura actual tomando en consideración solo los escenarios a corto y mediano plazo que es hasta donde probablemente se tenga el límite establecido de 1.5 °C, ya que a largo plazo es más probable que se rebase el límite impuesto.

5.1 Evapotranspiración Potencial (ETP)

Debido al impacto potencial del cambio climático la modificación de los componentes del ciclo hidrológico, principalmente la evapotranspiración y la precipitación, tendrá un efecto radical en las demandas de riego de los cultivos, por lo que es fundamental determinar la evapotranspiración con cambio climático (Bustamante et al., 2011).

Existen diversos trabajos que han calculado la evapotranspiración potencial del país utilizando el método de Penman modificado por Monteith (Monterroso y Gómez, 2003; PNUD INECC-, 2015; PNUD-INECC, 2016) que consiste en estimar la evapotranspiración potencial diaria sobre la superficie de agua libre y poco profunda en milímetros.

PNUD-INECC (2016) encontraron que la Evapotranspiración que se presenta actualmente en el país va de los 400 a los 2,200 mm; solo el 3.79% del territorio presenta una evapotranspiración mayor a 1 800 mm; el 4.09% tiene una evapotranspiración menor de 1,000 mm anuales y el 92.12% restante está entre los rangos de 1 000-1 800 teniendo en cuenta que el rango de 1 400-1 600 se presenta en el 40.24% de la superficie del país (Figura 3). Entre las regiones con mayor ETP se encuentran las planicies costeras del norte de Sinaloa y sur de Sonora y el Delta del Río Colorado. Mientras que las regiones con menor evapotranspiración se concentran en las zonas con grandes montañas y volcanes como en los límites entre Puebla y Veracruz.

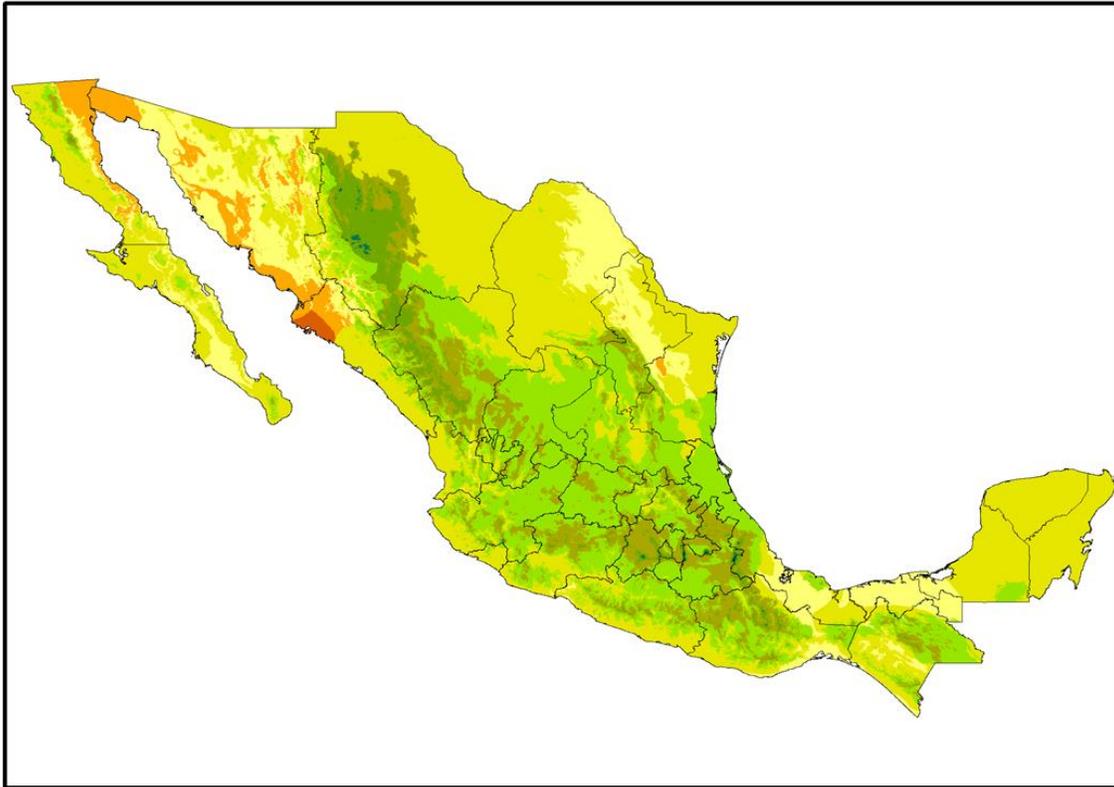


Figura 3. Distribución de la Evapotranspiración Actual (mm) en México. **Fuente:** PNUD-INECC, 2016

Así mismo PNUD-INECC (2016) determinaron los impactos potenciales del cambio climático que habrá en la evapotranspiración potencial bajo escenario a corto (2015-2039) y mediano plazo (2045-2069) utilizando los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI con RCP 4.5 y RCP 8.5; encontrando que en el periodo a corto plazo existe una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a 1 400 mm tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5. Sin embargo, la superficie que presenta ETP entre 600-1300 mm disminuye notablemente. A su vez se observa de manera incipiente la aparición del rango 2 200-2 400 mm en todos los escenarios (Fig. 4).

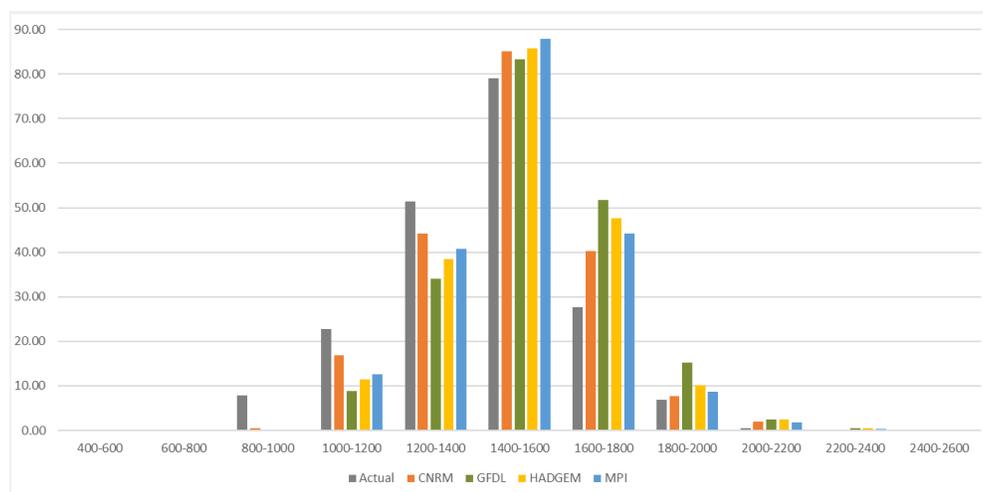


Figura 4. Superficie en porcentaje de la Evapotranspiración Potencial en México bajo el escenario RCP 4.5 para el periodo 2015-2039. **Fuente:** PNUD-INECC, 2016.

En cuanto al periodo a mediano plazo (2045-2069) se determinó que sigue existiendo una tendencia de aumento en la superficie con ETP mayor a los 1 400 mm en todos los modelos. Por lo que el rango de aumento para el RCP 4.5 es de +12.14 a +14.27% y para el RCP 8.5 es de +12.60 a +15.23%. Cabe mencionar que para este periodo de tiempo se consolida la aparición del rango 2 200-2 400 mm (Fig. 5). De manera espacial los aumentos se concentran en la zona de Sinaloa, Sonora, Nuevo León y Tamaulipas.

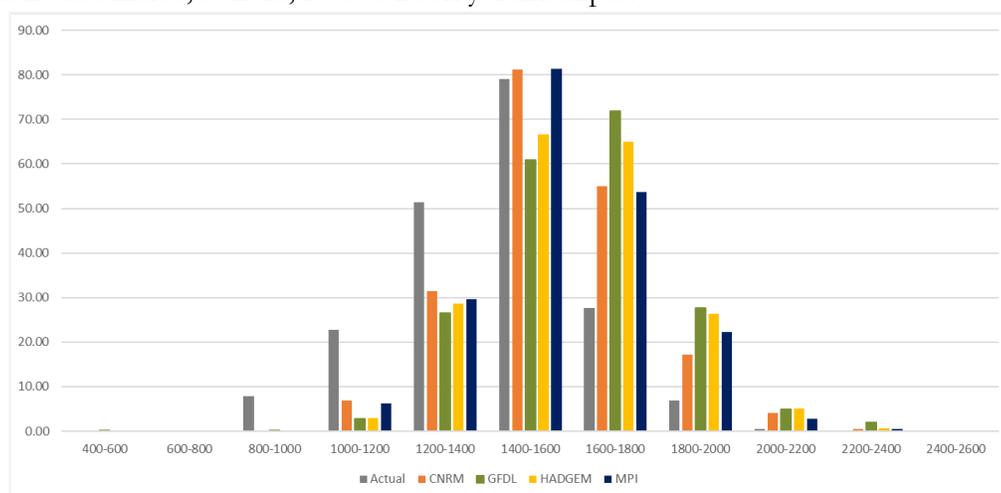


Figura 4. Superficie en porcentaje de la Evapotranspiración Potencial en México bajo el escenario RCP 8.5 para el periodo 2045-2069. **Fuente:** PNUD-INECC, 2016.

En un estudio realizado por Bustamante et al., (2011) se analizó el impacto potencial esperado del cambio climático en las demandas hídricas y en el desarrollo de los cultivos usando proyecciones de cambio climático para el escenario de emisiones medio moderado (A1B), para las condiciones del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. Se calculó un valor anual acumulado de la ETP de 1554 mm para el periodo base P0. Al introducir las proyecciones en los valores de las variables meteorológicas para el escenario de emisiones A1B, con respecto a P0 se estimó un incremento en la ETo anual del 3, 6 y 10 % en los periodos P1, P2, y P3 (Fig. 6).

La demanda hídrica de los cultivos se reducirá 13 % para el ciclo otoño-invierno, 6 % para el ciclo primavera-verano e incrementará 7 % en el ciclo de perennes para fines de siglo. Lo anterior se atribuye a que a pesar de que la evapotranspiración de referencia se incrementará, el mayor impacto potencial por incremento de la temperatura será en la reducción del ciclo fenológico de los cultivos anuales.

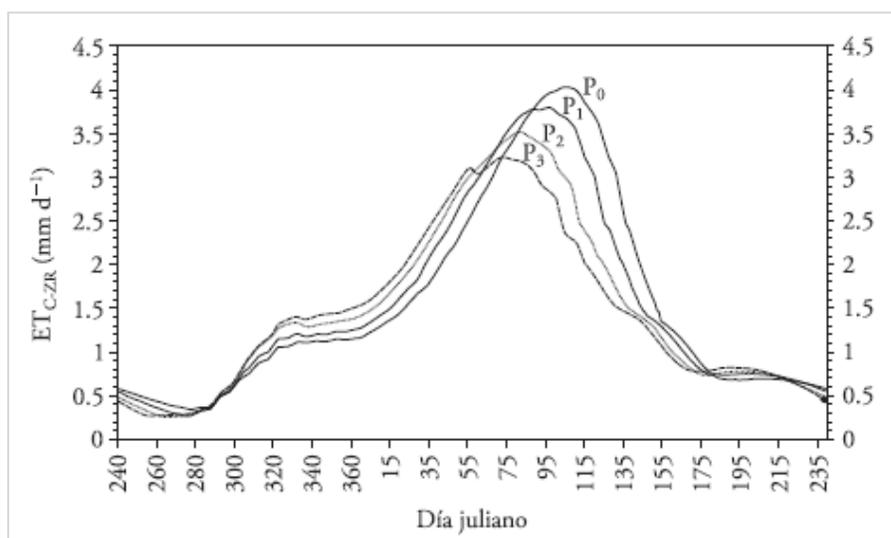


Figura 6. Variación diaria de la evapotranspiración (ET_c) del distrito de riego 075 en Sinaloa, México, para un año agrícola típico en cuatro escenarios de tiempo con cambio climático. **Fuente:** Bustamante et al., (2011).

5.2 Régimen y Balance De Humedad Del Suelo

5.2.1 Régimen de Humedad

PNUD-INECC, (2016) determinaron el régimen de humedad de los suelos de México utilizando el modelo de simulación climática del suelo Newhall para la condición actual y bajo escenarios de cambio climático utilizando los modelos HADGEM, GFDL, MPI, CNRM. Encontrando que para el régimen de humedad actual la condición Arídica ocupa la mayor superficie nacional con el 35.61%; el sub régimen de humedad con mayor superficie es el Arídico Típico. En la Figura 7 se observa la distribución gráfica de los regímenes de humedad de los suelos de México para la condición actual.

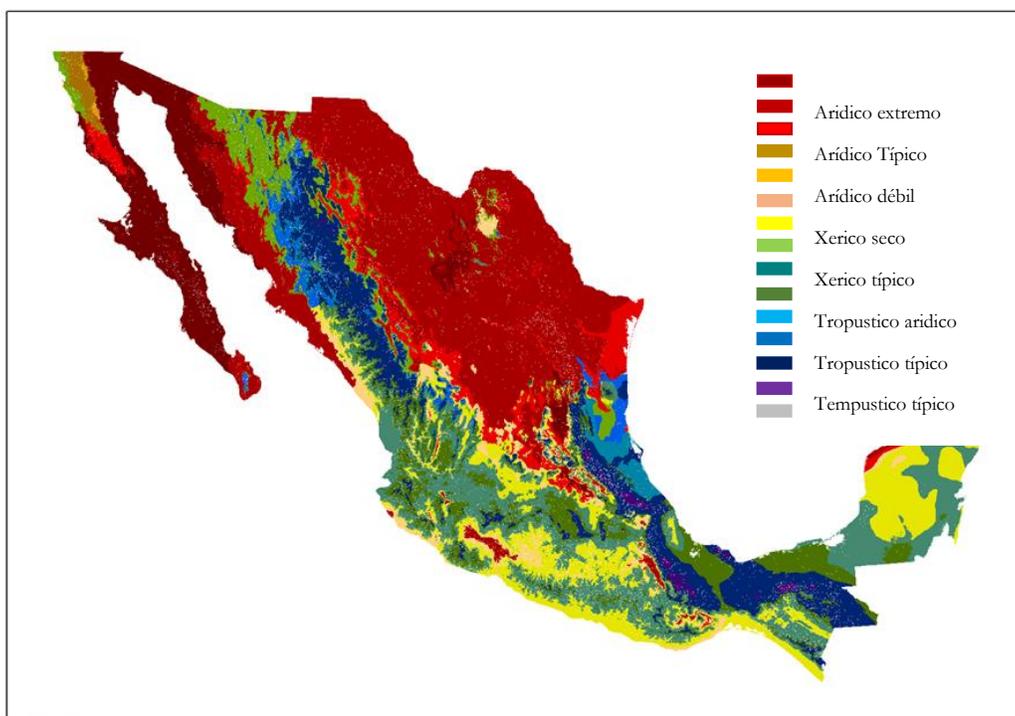


Figura 7. Regímenes de humedad de los suelos de México para la condición actual.

Fuente: PNUD-INECC, 2016.

Bajo el escenario a mediano plazo utilizando el RCP 4.5 se tiene que el régimen Perúdic tiene una disminución considerable en todos los escenarios, el rango de disminución va de -0.42% a -0.44% del total de la superficie del país. El Régimen Údico tanto en HADGEM como en MPI los rangos de disminución van de -8.03% a -5.13% mientras que con los modelos GFDL y CNRM los aumentos son ligeros (+1.59% a +1.62%), aunque dentro del régimen Údico, los subtipos Tropústico Seco disminuye su superficie, sin embargo, el Tempústico Seco y el Údico Típico aumenta ligeramente en dos de los cuatro escenarios.

Para el régimen Ústico el rango de aumento va de +0.51% a +3.11% en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (CNRM, GFDL y MPI), en el escenario HADGEM se presenta una disminución de -1.96%. Dentro de los subtipos, el Tropústico Údico es el único que disminuye considerablemente, el resto de todos los subtipos aumenta ligeramente su área. En el Arídico todos los escenarios muestran aumentos considerables, los rangos de aumento van de +5.76% a +9.85%, sin embargo, el subtipo Arídico Extremo presenta una gran disminución, mientras que el Arídico Típico y el Arídico Débil aumentan considerablemente. En el régimen Xérico el rango de disminución va de -0.17% a -0.27% teniendo que en ambos subtipos (Xérico Seco y Xérico Típico) disminuyen ligeramente (Fig. 8).

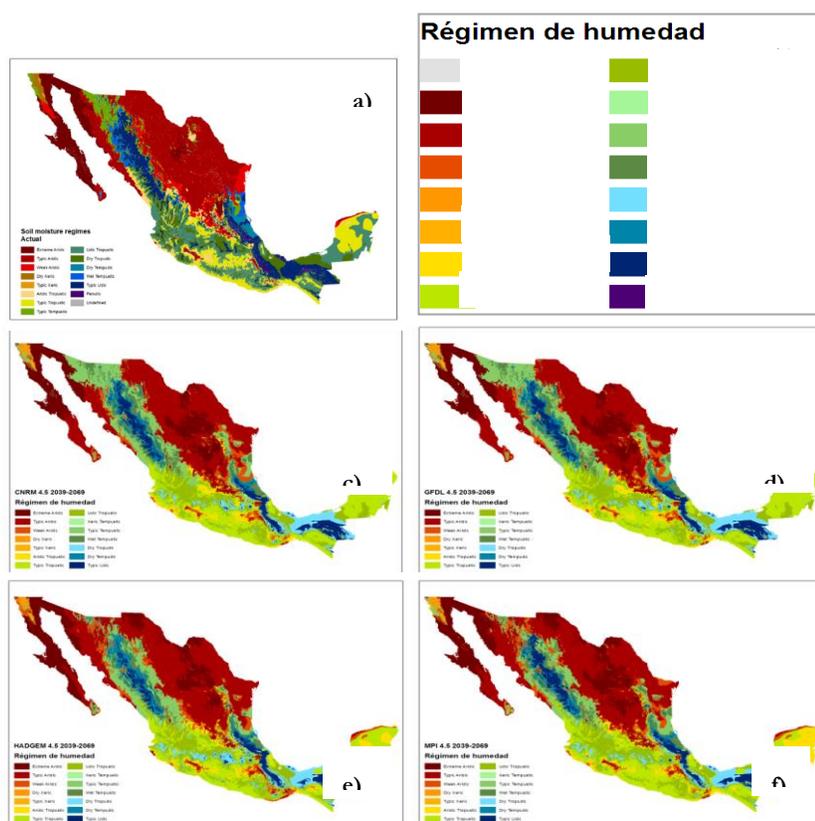


Figura 8. Regímenes de humedad bajo el escenario RCP 4.5 periodo 2039-2069 para la condición actual y los modelos de cambio climático considerados en el estudio: a) Actual; b) simbología; c) CNRM; d) GFDL; e) HADGEM y f) MPI. **Fuente:** PNUD-INECC, 2016.

Bajo el RCP 8.5 a mediano plazo se observa que en el régimen Perúdicico tiene una disminución considerable en todos los escenarios, el rango de disminución va de -0.42% a -0.44% del total de la superficie del país. El Régimen Údicico sigue teniendo los rangos de disminución de -7.73% a -10.38%, aunque dentro del régimen Údicico, los subtipos Tropúdicico Seco y el Údicico Típico disminuyen considerablemente la superficie, sin embargo, el Tempúdicico Seco aumenta ligeramente en todos los escenarios. Para el régimen Ústicico el rango de aumento va de +0.21% a +2.53% en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (CNRM, GFDL y MPI), en el escenario HADGEM se presenta una disminución de -2.11%. Dentro de los subtipos, el Tropúdicico Údicico es el único que disminuye considerablemente, el resto de todos los subtipos aumenta ligeramente su área. En el Arídico todos los escenarios muestran aumentos considerables, los rangos de aumento van de +8.82% a +12.49%. Sin embargo, el subtipo Arídico Extremo presenta una gran disminución, mientras que el Arídico Típico y el Arídico Débil aumentan considerablemente. Para el régimen Xéricico, todos los escenarios muestran disminuciones importantes, el rango de disminución va de -0.16% a -0.30%, para ambos subtipos.

En un estudio realizado por INECC-UACH, (2016) se determinó el régimen de humedad de los suelos agrícolas de México en la condición actual, así como con cambio climático para los RCP 4.5 y 8.5 utilizando los modelos HADGEM, MPI, GFDL, CNRM y REA en los periodos de tiempo a corto, mediano y largo plazo. En esta revisión solo se mencionarán los periodos de tiempo a corto y mediano plazo ya que son los que probablemente estén en el rango establecido de 1.5°C de temperatura media global.

El régimen de humedad se calculó mediante la determinación del periodo húmedo utilizando la metodología establecida por FAO (1978). Los resultados del escenario base arrojaron que el rango de 91-180 días es el de mayor superficie ya que ocupa el 42.3% del total de la superficie agrícola (13.8 millones de hectáreas), seguido en menor grado por el rango de 0 días con el 39.9% de la superficie (13 millones de hectáreas) (Fig. 9).

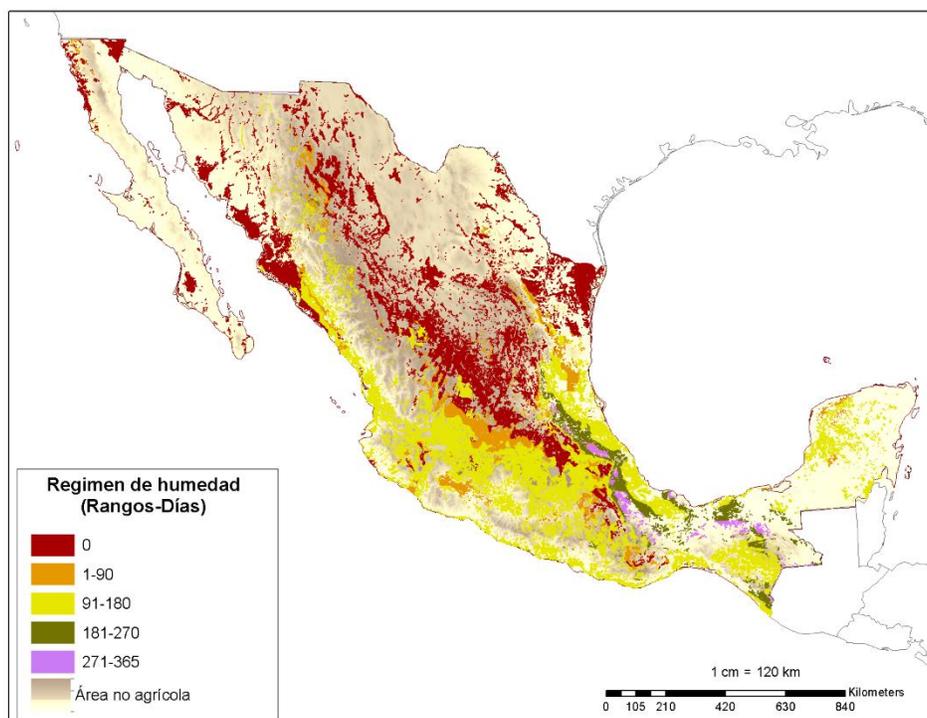


Figura 9. Distribución gráfica del Régimen de Humedad actual en las zonas agrícolas de México. **Fuente:** INECC-UACH, 2016.

El modelo que tuvo mayor impacto potencial en el horizonte medio fue GFDL RCP 8.5 que determinó que el periodo húmedo de 0 días aumentará a 48.9 % del total de la superficie alcanzando una superficie de 15.9 millones de hectáreas; el rango de 91-180 días disminuirá a 19.0 % (6.2 millones de hectáreas). En la Figura 10 se hace la comparación del porcentaje de los rangos de periodo húmedo en días del escenario actual con los periodos de tiempo a corto y mediano plazo y los cinco modelos. Los modelos que muestran un impacto potencial constante más drástico a través del tiempo son GFDL y HADGEM, el modelo que presenta menor cambio a través del tiempo es CNRM.

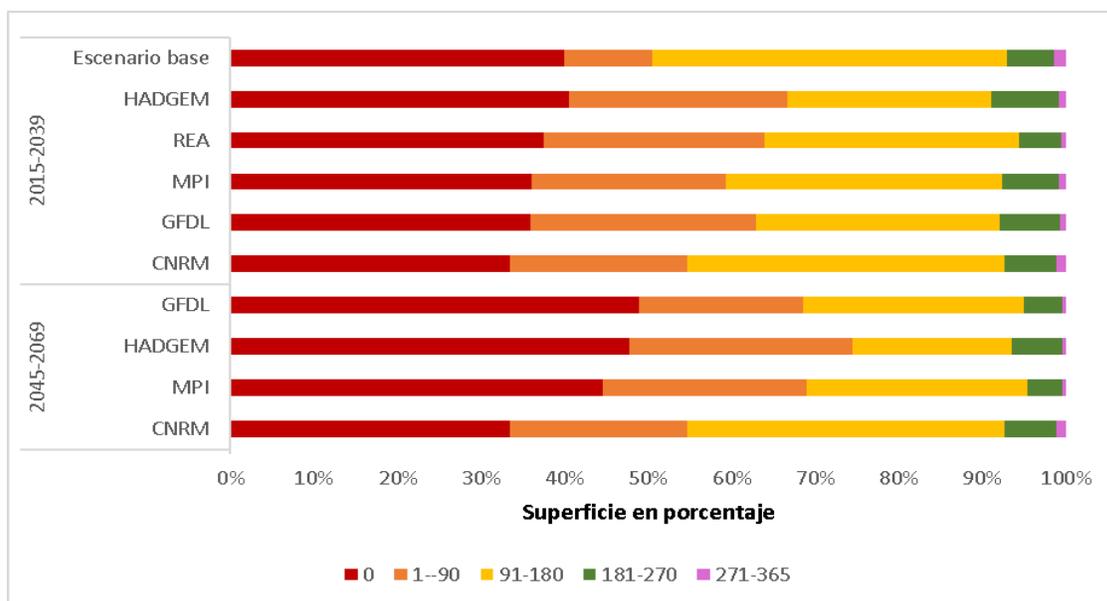


Figura 10. Porcentaje de la superficie por rangos de días de periodo húmedo en los periodos de tiempo a corto y mediano plazo utilizando cinco modelos para el RCP 8.5 Watts m-2 en las zonas agrícolas de México. **Fuente:** INECC-UACH, 2016.

5.2.2 Balance de Humedad

En el estudio realizado por INECC-UACH, (2016) se determinó el balance de humedad de los suelos agrícolas de México en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático de acuerdo al criterio de periodo de crecimiento por condiciones de humedad disponible para el desarrollo de los cultivos, establecido por la FAO (1978), en donde se observó que en el escenario actual el periodo de crecimiento más representativo que corresponde al rango de 181-270 días ocupa 11.4 millones de hectáreas (35.2 %) del total de las zonas agrícolas del país, mientras que el periodo de 1-90 días solo representa al 9.2% del total de la superficie (3 millones de hectáreas) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Superficie y porcentaje del Rango en días del Periodo de Crecimiento en las tierras agrícolas del país para las condiciones actuales.

Periodo de Crecimiento (Rango en días)	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
0	4,593.91	14.1
1-90	3,006.57	9.2
91-180	10,651.66	32.7
181-270	11,464.84	35.2
271-365	2,879.82	8.8
Total general	32,596.79	100

Fuente: INECC-UACH, 2016.

Bajo el escenario de cambio climático a largo plazo con el modelo GFDL RCP 8.5 se tiene que el rango de periodo de crecimiento de 181-270 días solo representará al 18.3% de la superficie de las áreas agrícolas de México (5.9 millones de hectáreas) y el periodo de crecimiento con mayores restricciones, pero mayor de cero, que corresponden al rango de 1-90 días presenta un aumento en la superficie de 9.4 millones de hectáreas (28.8 % del total de la superficie) utilizando el modelo CNRM. En la Figura 11 se expone la superficie por rangos de días de periodo de crecimiento de los periodos a corto y mediano plazo con los cinco modelos trabajados con el RCP 8.5, comparados con el porcentaje de la superficie actual, en donde se aprecia que los modelos que muestran un impacto potencial constante más drástico a través del tiempo son GFDL y HADGEM; el modelo que obtuvo menor cambio a través del tiempo fue CNRM.

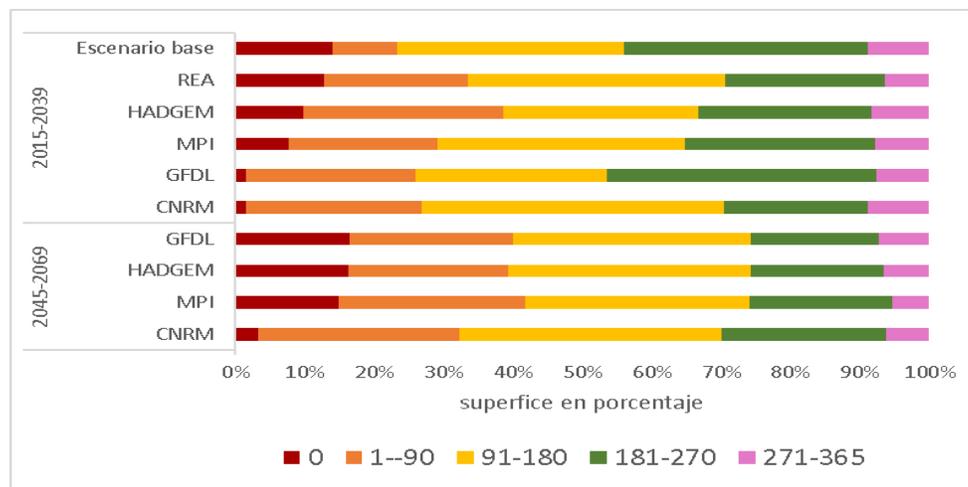


Figura 11. Porcentaje de la superficie por rangos de días de periodo de crecimiento en los horizontes de tiempo a corto y mediano plazo y los cinco modelos propuestos para

5.3 Régimen de temperatura del suelo

En un estudio realizado por PNUD-INECC, (2016) se determinó el Régimen térmico de los suelos en México en condiciones actuales y bajo escenarios de cambio climático utilizando los modelos CNRM, GFDL, HADGEM y MPI para los RCP 4.5 y 8.5; encontrando que bajo las condiciones actuales el 44.37% de la superficie del país tiene un régimen de temperatura Térmico, seguido del Hipertérmico con un 40.52% de la superficie nacional, mientras que el Isotérmico (3.35%) y el Isohipertérmico (3.95%) se ubican en las regiones de menor latitud y húmedas. Los regímenes de temperatura más fríos tienen superficies menores y la mayoría se concentra en las montañas más altas y/o se encuentran en latitudes altas donde la luz del sol llega con menor intensidad evitando aumentar la temperatura del suelo. El régimen Mésico (6.47%) rodea estas regiones frías con una mayor superficie en la Sierra Madre Occidental, las otras regiones que presentan ese régimen son la Sierra de San Pedro Mártir, la parte más al norte del Eje Neovolcánico Transversal y las montañas más altas de la Sierra Madre Oriental. El Isomésico (1.27%) está en la mayor parte del Eje Neovolcánico Transversal y una pequeña porción en la Sierra Madre de Chiapas y el sistema de los Altos de Chiapas (Fig. 12).

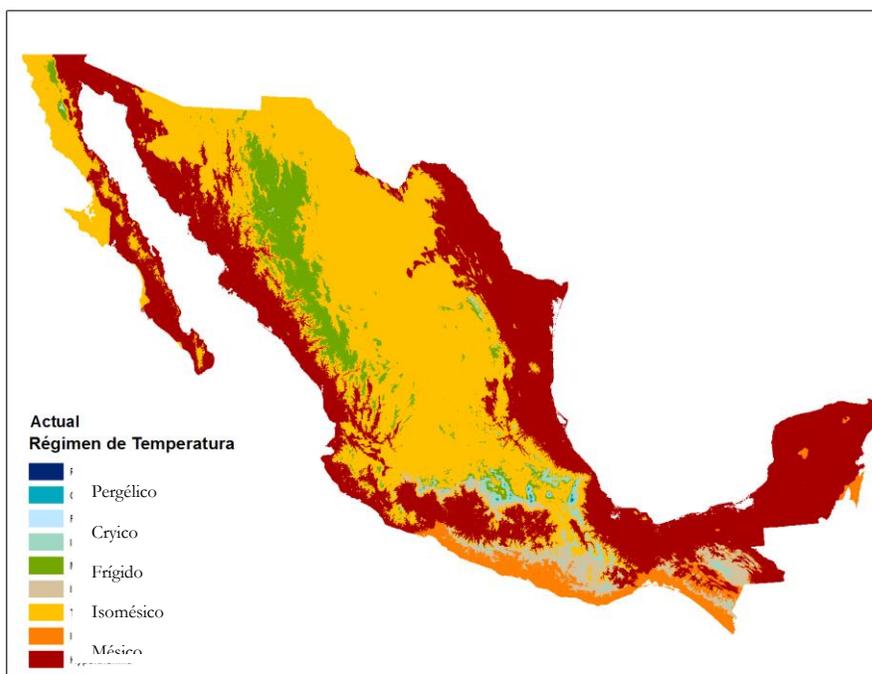


Figura 12. Regímenes de temperatura del suelo actual en México.

Fuente: PNUD-INECC, 2016.

Se estima que a corto plazo el régimen de temperatura Pergélico tienda a desaparecer en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (CNRM, GFDL y HADGEM), el rango de pérdida de superficie va de -1,818.56 ha a -2,033.43 ha. MPI fue el único modelo donde no tienen variación. El régimen Cryico también disminuyó su superficie de -2,870.55 ha a -27,259.9 ha en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (GFDL, HADGEM y MPI). El único modelo que tiene un aumento fue el CNRM con 12,763.5 ha. Para el régimen Frígido en todos los modelos hay disminuciones y para el escenario HADGEM desaparece. En los otros escenarios la disminución va de -9,907.98 ha a -46,037.02 ha. En todos los escenarios disminuye la superficie del régimen Mésico, los rangos van de -1.6% a -0.19%, el escenario que presenta la mayor disminución es el modelo CNRM; del mismo modo para el régimen Isomésico todos los escenarios muestran disminuciones, los rangos de cambio van de -0.68% a -0.05%, siendo HADGEM el modelo que mostró mayores cambios.

En cuanto al régimen Térmico se tiene que dos de los cuatro modelos muestran un aumento en la superficie, los cambios van de +1.03% a -0.08%, siendo CNRM el modelo donde más cambio hubo. Para el régimen Isotérmico se encontró que en tres de los cuatro modelos hay un aumento que va de +0.06% a +0.05%. El régimen Hipertérmico muestra un aumento en tres de los cuatro modelos (CNRM, GFDL y MPI) el rango de aumento va de +0.94% a +0.3%. Para el régimen Isohipertérmico dos de los cuatro modelos (HADGEM y CNRM)

tienen una mayor superficie, que va en un rango de +3.93% a +0.09%, los modelos GFDL y MPI mostraron disminuciones en su superficie -0.05% a -0.08%.

A mediano plazo el régimen de temperatura Pergélico mantiene en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (CNRM, GFDL y MPI) una disminución de la superficie que va de +0.52 ha a -80.08 ha. El régimen Cryico también disminuyó su superficie de -5,190.94 ha a -52,384.72 ha en todos los escenarios de cambio climático. Para el régimen Frígido en dos de los cuatro modelos hay disminuciones considerables, el modelo MPI aumenta ligeramente la superficie (+7,381.35 Ha.) y para el escenario HADGEM desaparece. En el régimen Mésico la superficie disminuye a rangos que va de -3.84% a -0.43%; del mismo modo para el régimen Isomésico tres de los cuatro escenarios muestran disminuciones en rangos de cambio que van de -0.81% a -0.16%. En el régimen Térmico todos los escenarios muestran una disminución en la superficie, los cambios van de -7.52% a -0.06%. Para el régimen Isotérmico en tres de los cuatro modelos existen disminuciones que van de -0.77% a +0.05%. En el régimen Hipertérmico se presenta un aumento en la superficie (CNRM, GFDL y HADGEM) con tasas que van de +7.60% a +2.64%; en cuanto al régimen Isohipertérmico en tres de los cuatro modelos (HADGEM, CNRM y MPI) se presenta una mayor superficie, que va en un rango de +4.45% a +6.70% (Fig. 13).

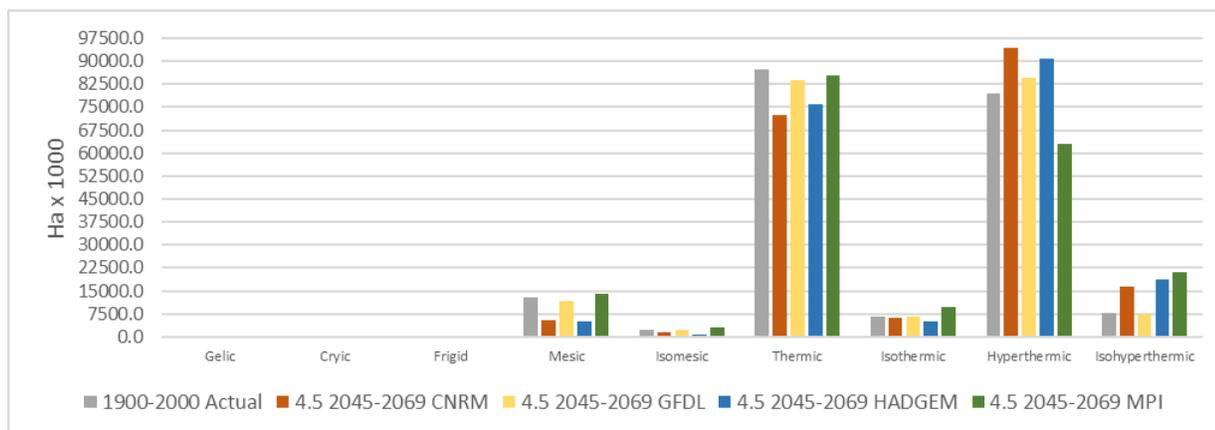


Figura 13. Superficie de los Regímenes de Temperatura de los suelos de México bajo el RCP 4.5 para el periodo 2045-2069 en miles de hectáreas. Fuente: PNUD-INECC, 2016.

En el RCP 8.5 a mediano plazo el régimen de temperatura Pergélico no muestra cambios considerables en tres de los cuatro escenarios de cambio climático (CNRM, GFDL y MPI), HADGEM fue el único modelo donde desaparece este régimen. Para el régimen Cryico la superficie disminuye en todos los modelos especialmente en HADGEM, la superficie promedio de disminución es de -6,420.14 ha a -63,932.34 ha. Para el régimen Frígido en todos los modelos hay disminuciones que van de -13,917.02 Ha. a -15,998.52 Ha. En el régimen Mésico existen decrementos en tres de los cuatro modelos con rangos va de -6.02% a -0.21%,

el escenario que presenta la mayor disminución es el modelo HADGEM; del mismo modo para el régimen Isomésico todos los modelos muestran disminuciones con rangos de cambio que van de -0.97% a -0.10%. De igual forma en el régimen Térmico tres de los cuatro modelos muestran una disminución ligera en la superficie, los cambios van de -19.26% a -0.06%, siendo HADGEM el modelo donde la mayor disminución se estimó. Para el régimen Isotérmico dos de los cuatro escenarios muestran un aumento en la superficie (CNRM y GFDL), cuyas tasas de cambio van de +0.04% al +0.02, mientras que el modelo HADGEM presenta una disminución de -1.41% y el MPI disminuye -0.05%. El régimen Hipertérmico muestra un aumento en la superficie en todos los modelos con rangos de aumento que van de +22.36% a +0.58%, siendo el modelo HADGEM el que presenta mayor aumento. Para el régimen Isohipertérmico tres de los cuatro modelos (GFDL, MPI y CNRM) tienen una menor superficie, en un rango de -0.27% a -0.08%, el modelo HADGEM mostró aumentos en su superficie (+5.36%) (Fig. 14).

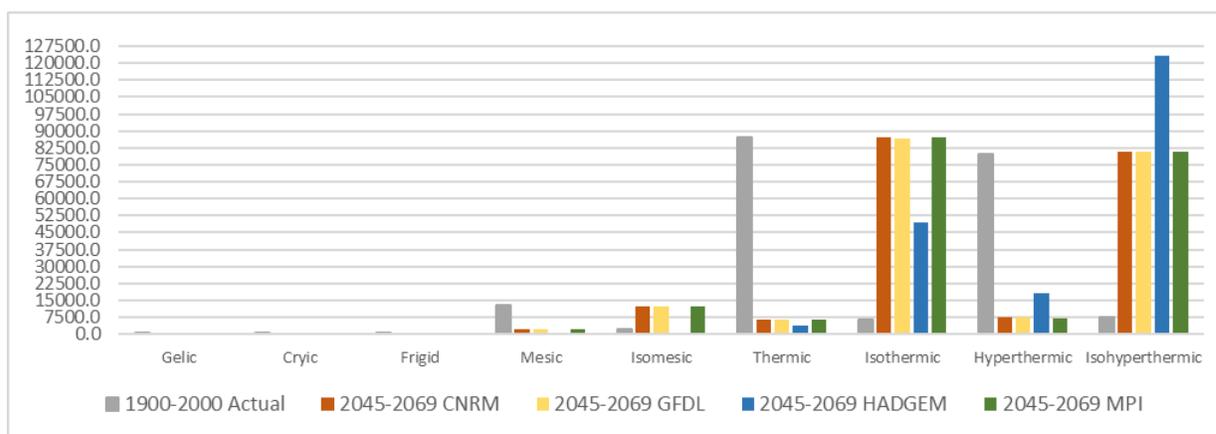


Figura 14. Superficie de los Regímenes de temperatura de los suelos de México bajo el RCP 8.5 para el periodo 2045-2069, en miles de ha. **Fuente:** PNUD-INECC, 2016.

5.4 Evaluación de la degradación del suelo

De acuerdo a los resultados obtenidos con base a la cartografía elaborada por SEMARNAT-CP (2002) México presenta suelos degradados por la acción humana en 45.1% de su territorio. El principal proceso degradativo es químico (18.3%), seguido de la erosión hídrica (11.4 %) y la erosión eólica (9.4%) y la menor proporción corresponde a la degradación física (5.9 %). Las actividades agrícolas y el sobrepastoreo son los principales factores causativos de la degradación de los suelos, en 38.8 % y 38.4% de la superficie afectada, respectivamente. A la

deforestación, le corresponde el tercer lugar (16.5%), le sigue la urbanización (3.5%); la sobreexplotación de la vegetación para consumo (2.4%) y actividades industriales (0.5%).

Según la línea base nacional de Degradación de tierras y Desertificación realizada por la CONAFOR-UACH, (2013) se tiene que el 54% del territorio nacional presenta degradación de la cubierta vegetal con grados que van de ligeros a extremos. Así mismo se encontró que el 63.02% del territorio nacional presenta degradación en los recursos edáficos considerando erosión hídrica, erosión eólica, degradación física expresada principalmente por la compactación y la degradación química expresada fundamentalmente por la declinación de la fertilidad. La degradación de los recursos hídricos cubre el 64.77% de la superficie del país. El indicador integrado de degradación de tierras que incluyó la intersección de los indicadores parciales de recursos bióticos, recursos edáficos y recursos hídricos en todos los ecosistemas del país indica que el 90.7% de la superficie nacional presenta algún tipo de degradación de tierras por causas naturales y antrópicas. Los indicadores anteriores condujeron a determinar la situación actual de la Desertificación la cual está presente en el 59.2% de la superficie del país. Bajo los escenarios de cambio climático al 2050 con el modelo GFDL el 55.7% de la superficie del país estará afectada por la desertificación. Para el modelo HADGEM y al mismo escenario de tiempo, la afectación se estima que será del 61.9% (Cuadro 2).

Cuadro 2. Superficie y porcentaje de Desertificación integrada en México para las condiciones climáticas actuales y bajo escenarios de cambio climático estimados para el 2050 y escenario socioeconómico A2 con los modelos GFDL y modelo HADGEM.

Tipo de Desertificación dominante	Escenario base		Escenario al 2050 Modelo GFDL-A2		Escenario al 2050 Modelo HADGEM-A2	
	Superficie	Porcentaje	Superficie	Porcentaje	Superficie	Porcentaje
	(miles de ha)		(miles de ha)		(miles de ha)	
Sin Desertificación aparente	9,581.6	4.9	6,468.7	3.3	10,515.3	5.4
Desertificación ligera	25,922.7	13.2	23,628.0	12.1	27,529.7	14.1
Desertificación moderada	27,231.9	13.9	26,301.7	13.4	28,160.1	14.4
Desertificación severa	50,277.4	25.7	46,950.4	24.0	52,491.1	26.8
Desertificación extrema	12,462.6	6.4	12,217.5	6.2	12,993.6	6.6
Cuerpos de agua	850.2	0.4	834.0	0.4	877.9	0.4
Tierras húmedas	69,598.4	35.5	79,524.6	40.6	63,357.1	32.3
Total	195,924.8	100.0	195,924.8	100.0	195,924.8	100.0

Fuente: CONAFOR-UACH, 2013.

5.4.1 Erosión Hídrica

PNUD-INECC, (2015) determinaron la erosión hídrica en condiciones actuales utilizando el método RUSLE encontrando que el 33.12 % del territorio nacional está afectado por algún grado de erosión hídrica; así mismo obtuvieron la erosión hídrica bajo escenarios de cambio climático para los escenarios a corto y mediano plazo con diferentes modelos para el RCP 4.5 y 8.5 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Erosión hídrica bajo escenarios de cambio climático para los escenarios a corto y mediano plazo para el RCP 4.5 y 8.5.

RCP Watts/m ²	Escenario climático ⁱ	Cambio en la media nacional
4.5	2015 – 2039	-1.81% a -1.813%
	2039 – 2069	-2.42% a -3.92%
8.5	2015 – 2039	-0.61% a -5.14%
	2039 – 2069	-3.32% a -14.80%

Fuente: INECC-PNUD, 2015.

Según INECC-UACH, (2016) en la actualidad el 23.9% de la superficie de los suelos agrícolas se encuentra afectada por algún grado de erosión hídrica, siendo la erosión moderada la de mayor importancia que representa el 11.3% del total de la superficie (3.6 millones de hectáreas). Bajo condiciones de cambio climático con los escenarios a corto y mediano plazo utilizando los modelos CNRM, GFDL, HADGEM, MPI y REA para el RCP4.5 y RCP 8.5 watts m² se tiene que los grados de erosión moderada y ligera disminuirán a tasas de 1.1%-1.3% y 1.9%-2.4% mientras que los grados de erosión extrema y severa aumentarán bajo los escenarios de cambio climático a tasas de 0.4% y 1.5%-1.8% respectivamente. El modelo que presenta mayor aumento en el grado de erosión Severa tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 es el GFDL (6.2% de la superficie) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Superficie y porcentaje de los grados de erosión hídrica de los suelos agrícolas de México en el escenario a mediano plazo (2045-2069) con los diferentes modelos utilizados en el RCP8.5 watts m⁻².

Grados de erosión hídrica	Superficie (miles de hectáreas)				
	Porcentaje de la superficie				
	Escenario base	CNRM	GFDL	HADGEM	MPI
Extrema	638.41	773.53	769.44	771.74	790.44
	2.0	2.4	2.4	2.4	2.4
Severa	1,428.61	1,996.60	2,015.87	1,975.28	1,971.20
	4.4	6.1	6.2	6.1	6.0
Moderada	3,676.32	3,331.46	3,300.02	3,365.71	3,402.85
	11.3	10.2	10.1	10.3	10.4
Ligera	2,014.18	1,374.71	1,367.77	1,367.30	1,377.08
	6.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Sin erosión	24,839.27	25,120.49	25,143.69	25,116.76	25,055.23
	76.2	77.1	77.1	77.1	76.9
Total general	32,596.79	32,596.79	32,596.79	32,596.79	32,596.79
	100	100	100	100	100

Fuente: INECC-UACH, 2016.

5.5 Carbono orgánico de los suelos agrícolas

En el estudio realizado por el INECC-UACH, (2016) se determinó el carbono orgánico de los suelos agrícolas de México (COS) en Mg ha⁻¹ bajo el escenario base mediante los datos reportados por la Serie II de INEGI; la superficie que tiene menos de 50 Mg ha⁻¹ de COS ocupa el 33.9% de la superficie que equivale a 11 millones de hectáreas. El rango de contenido de carbono que va de 150-200 Mg ha⁻¹ se encuentra en el segundo lugar de importancia con el 22% de la superficie (7.1 millones de hectáreas) seguido de los rangos de 50-100 y 100-150 Mg ha⁻¹ ambos con el 15.2% de la superficie y en menor proporción los rangos con mayor contenido de carbono (Cuadro 5).

Cuadro 5. Superficie y porcentaje del Carbono Orgánico del suelo (COS) en las áreas agrícolas de México.

COS (Mg ha ⁻¹)	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
0-50	11,040.79	33.9
50-100	4,969.54	15.2
100-150	4,944.97	15.2
150-200	7,162.79	22.0
200-250	1,764.64	5.4
250-300	914.26	2.8
>300	1,799.80	5.5
Total general	32,596.79	100.0

Fuente: INECC-UACH, 2016.

La superficie con COS menor a 50 Mg ha⁻¹ aumentará a 80.4 % (26.2 millones de hectáreas) en el escenario a mediano plazo utilizando el modelo GFDL RCP 8.5, mientras que el rango de 150-200 Mg ha⁻¹ solo alcanzará el 1.8 % del total de la superficie con el mismo modelo y RCP. En la Figura 15 se muestra la comparación del escenario base del contenido de carbono de los suelos agrícolas con los horizontes a corto y mediano plazo y los cinco modelos evaluados utilizando el RCP 8.5, en donde se observa que los modelos GFDL y MPI son los que tendrán mayor impacto potencial a través del tiempo.

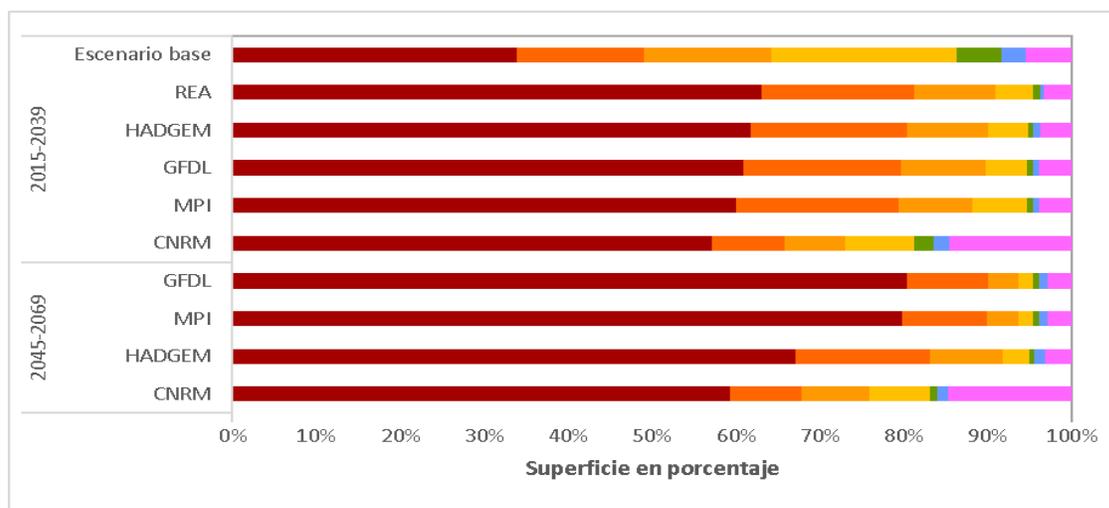


Figura 15. Porcentaje de la superficie de los Rangos de Carbono orgánico de los suelos agrícolas de México en Mg ha⁻¹ en los horizontes a corto y mediano plazo y los cinco modelos propuestos para el

En los escenarios a corto y mediano plazo se observó de manera general que la superficie y porcentaje del contenido de carbono en los suelos agrícolas del país se reducirá en todos los escenarios y modelos evaluados en ambos RCP, sin embargo, la velocidad de mineralización difiere, ya que es más rápida en el escenario a corto plazo al descomponerse la fracción con productos más fáciles de aprovechar por los microorganismos del suelo, pasado el tiempo prevalecen las fracciones más resistentes a la descomposición, lo que hace que disminuya más lentamente el contenido de COS y esto se tiene a plazos mayores como son el escenario a mediano y largo plazo. La disminución o aumento de la precipitación también afecta directamente en la producción de biomasa; un decremento de la precipitación conlleva a menor biomasa por lo tanto se tiene menor contenido de carbono y menor productividad del mismo; mayor precipitación generará mayor lixiviación y pérdida de nutrientes afectando directamente en la producción agrícola, aunque favorecerá mayor producción al tener también mayor temperatura (Rounsevell *et al.*, 1999). Así mismo la disminución del contenido de carbono en la parte sur del país se pueden deber a la disminución de captura de carbono durante el decremento de la humedad del suelo causada por el aumento de las temperaturas (Berthelot *et al.*, 2002).

5.6 Potencial productivo de los suelos agrícolas

La agricultura mexicana es particularmente vulnerable al cambio climático. Las predicciones no son optimistas para los grandes productores de trigo y maíz de Sonora y Sinaloa, ni para los millones de pequeños campesinos y su milpa. (Conde *et al.* 2006; Eaking 2000; INE 2010). La amenaza del cambio climático a la seguridad y soberanía alimentaria es inmensa.

Dado que la mayor parte de la producción de maíz en México es de temporal y que está cultivado en el conjunto del territorio, este cultivo será el más afectado por el cambio climático, particularmente durante la temporada Primavera-Verano P/V. Según datos del INE y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), entre 2020 y 2025, las lluvias estivales disminuirán, con consecuencias negativas para toda la agricultura de temporal, y, sobre todo, el maíz (INE 2010).

En las décadas posteriores al 2025, se pronostica un incremento de la escasez de agua para la producción de cultivos, no solamente debido a la sequía sino también a la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos, generando serias amenazas para los cultivos de riego. La irrigación dejará de ser económicamente rentable debido a los crecientes costos del bombeo de agua. Aunque los impactos potenciales serán seguramente más severos en el norte y noroeste del país, habrá una presión creciente sobre los recursos de agua en todo el país. El resultado será una reducción de la superficie cultivada de maíz, particularmente en Sonora (Banco Mundial 2009; INE 2010). Los escenarios para 2020 y 2050 indican, dependiendo de la región, un incremento de las temperaturas de entre 1 y 3 grados, una reducción de precipitaciones de entre el 5 y el 10 por ciento y un incremento concomitante de entre el 5 y el 15 por ciento de la evapotranspiración. Un trabajo de Conde, (2008) estima que la reducción

del área disponible para el cultivo de maíz será para el 2020 del 10 al 25 por ciento y para el 2040 del 40 por ciento. Se estima que en 2050 se podrían perder por el cambio climático entre 13 y 27 % de la superficie de maíz sembrada (Delgado, 2010). Las implicaciones de tal reducción para la seguridad alimentaria deberían de ser claras para todos.

Otro estudio relacionado a los impactos potenciales del cambio climático en la productividad agrícola (López- Feldman, 2013) estima que los cambios en el clima afectaran la productividad agrícola y por lo tanto los ingresos que reciben los agricultores; para ello analiza la relación entre el ingreso agrícola y las variables climáticas para después calcular los impactos potenciales en el ingreso total de los hogares.

En un estudio realizado por Tinoco et al., (2011) se realizó una zonificación agroecológica para simular la distribución potencial del maíz en el estado de Jalisco en el periodo primavera-verano, para ello se analizó la temperatura atmosférica, la humedad disponible en el suelo, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Se evaluaron tres periodos de tiempo: la línea base (1961-1990) y dos modelos de cambio climático (GFDL-TR90 y HADLEY-TR-00) para el horizonte de tiempo 2050 que comprende el periodo 2041-2060, y bajo el supuesto socioeconómico A2, que establece un crecimiento poblacional fuerte y un desarrollo económico lento. Los principales resultados muestran un incremento en la superficie no apta para el cultivo del maíz en 63.6% para el modelo GFDL y en 90.8% para el modelo HADLEY. Las zonas centro, norte y este del estado son las que registran los cambios de mayor magnitud. La disponibilidad de humedad en el suelo es el factor que se ubica como el componente limitante para el desarrollo del cultivo.

Brigido et al., (2015) estimó el papel de la alteración de la fertilidad del suelo en las predicciones sobre la productividad del cultivo de café (*Coffea Arabica L.*) al final del siglo XXI para seis de las regiones cafetaleras productoras más importantes del estado de Veracruz, México. Se consideraron tres modelos de circulación global bajo dos escenarios de forzamiento radiativo 4.5 y 8.5. Así mismo utilizó un modelo de desarrollo del cultivo en función de sus características biológicas y las características climáticas propuesto por IIASA/FAO y utilizado ampliamente en el mundo. Los cálculos de la productividad de café cereza para las condiciones climáticas actuales y su comparación con los datos reportados por la SAGARPA señalan que al final del siglo XXI se espera hasta un 34% de reducción en la productividad de café, variando entre regiones cafetaleras debido principalmente al cambio en la precipitación y, en menor grado, al incremento de la temperatura del aire.

Ruiz et al., (2011) realizaron una investigación para determinar las modificaciones agroclimáticas, que podrían estar asociadas con el cambio climático durante las primeras décadas del siglo XXI, en cinco zonas productoras de maíz en México. Para ello se trabajó con sistemas de información geográfica nacionales, tanto para la climatología actual como para la climatología esperada para tres décadas del siglo XXI (2011-2020, 2031-2040 y 2051-2060); la cual se estimó mediante la utilización de modelos de circulación general. Se analizaron los posibles cambios que podrían suscitarse para el periodo mayo-octubre, con relación a temperatura media (T_m), temperatura diurna (T_d), temperatura nocturna (T_n), grados-día de

desarrollo (GDD), precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), índice de humedad calculado con base en la relación P/ETP (IH), y las áreas potenciales para maíz. La temperatura del periodo mayo-octubre se incrementará sostenidamente durante las próximas cinco décadas del siglo XXI, en las cinco zonas productoras de maíz estudiadas, hasta alcanzar un calentamiento aproximado de 2 °C en la década de 2051-2060. Como efecto del incremento de temperatura habrá mayor acumulación de grados-día de desarrollo, incremento en temperaturas diurna y nocturna, y evapotranspiración potencial en las cinco zonas productoras de maíz; lo que reducirá el ciclo de madurez y el potencial de rendimiento del maíz, especialmente en las zonas tropical y subtropical.

La precipitación acumulada promedio del periodo mayo-octubre disminuirá alrededor de 4% en todas las zonas productoras de maíz. La combinación de mayor evapotranspiración potencial y menor precipitación dará como resultado un balance hídrico menos favorable, con efectos negativos sobre el rendimiento en las zonas subtropical, transición y valles altos. La superficie con condiciones agroclimáticas óptimas para producir maíz disminuirá en el trópico por incremento de la temperatura, en el subtrópico por incremento de la temperatura y disminución de la precipitación, y en transición por reducción de la precipitación; y se incrementará en valles altos y valles muy altos, debido al aumento de la temperatura nocturna y a un balance hídrico positivo; a pesar de la reducción en la precipitación (Fig. 16).

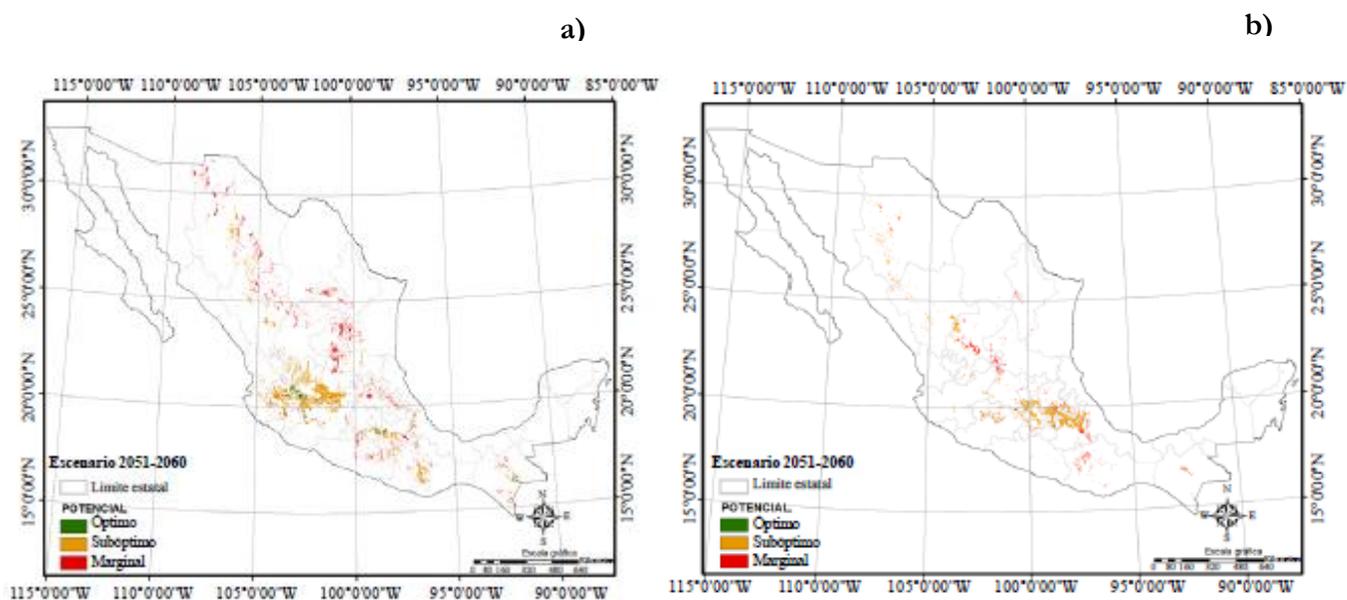


Figura 16. Áreas potenciales para maíz con escenarios de cambio climático 2051-2060, a) en la región valles altos; b) región tropical. Fuente: Ruiz et al., 2011.

Zarazúa et al., (2011) cuantificaron la tendencia de variables climáticas para el ciclo otoño-invierno durante el periodo 1961-2006, estableciendo escenarios climáticos y agroclimáticos futuros para el ciclo otoño-invierno y evaluar el impacto potencial del cambio climático sobre el desarrollo del trigo en la región Ciénega de Chapala, Jalisco, México. Se utilizaron datos de 10 estaciones climatológicas para analizar el cambio climático con visión retrospectiva, y modelos de circulación general para estimar el cambio climático futuro. Se aplicó la prueba de homogeneidad normal estándar, para detectar cambio de tendencia en los valores observados. Se generaron los escenarios futuros para cinco parámetros climáticos y cinco agroclimáticos, para evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre el trigo. Los resultados mostraron un cambio en la tendencia de las temperaturas máxima y mínima alrededor del año 1983. En los escenarios futuros, la temperatura máxima se incrementará hasta 6.4 °C a finales del siglo XXI, provocando incrementos en temperatura media y oscilación térmica. Se tendrán incrementos en la evapotranspiración, aceleración en la acumulación de unidades calor, incrementos en las temperaturas diurnas y nocturnas y disminución en el número de horas frío. El cultivo de trigo sufrirá condiciones desfavorables para la vernalización y acortamiento en sus etapas fenológicas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Estimación de la duración de las etapas siembra-floración y floración-madurez fisiológica del trigo bajo diferentes fechas de siembra con cambio climático.

Año	Fechas de siembra									
	01 Nov.	15 Nov.	01 Dic.	15 Dic.	01 Ene.	01 Nov.	15 Nov.	01 Dic.	15 Dic.	01 Ene.
	Días de la etapa siembra-floración					Días de la etapa floración-madurez fisiológica				
2020	82	82	83	82	80	46	45	40	37	34
2030	82	83	83	83	80	46	44	41	36	34
2040	80	80	80	80	78	45	44	40	36	33
2050	78	78	78	79	76	45	43	41	35	33
2060	75	76	76	77	74	45	42	41	35	34
2070	73	75	75	76	73	43	41	40	34	32
2080	70	72	72	71	71	41	41	39	36	32
2090	69	70	69	68	68	39	39	38	37	32

Fuente: Zarazúata et al., (2011).

Según el estudio realizado por INECC- UACH, (2016) en seis estudios de caso muestran que el rendimiento de los cultivos para el escenario lejano en el caso del maíz tendrá una disminución promedio de 49.3%, en donde el modelo GFDL RCP 8.5 es el de mayor impacto potencial negativo. El frijol variedad de altura en todos los modelos y horizontes mostró una disminución en los rendimientos a un nivel de cero toneladas, asociado a que se eleva la temperatura y ya no serán estas zonas aptas para este cultivo. En el caso del frijol variedad tropical hay un aumento en el rendimiento a mediano plazo con el modelo GFDL RCP 8.5 de 2.23 ton/ha mientras que con el modelo MPI RCP 4.5 el rendimiento es nulo. El rendimiento del sorgo en el horizonte lejano en promedio disminuirá un 45% siendo REA el más drástico. Para la cebada existe un decremento del 40% en promedio respecto al escenario base. Se prevé que el rendimiento del trigo baje a 1.3 ton/ha, lo que implica un 29% menos en contraste con el escenario base, siendo REA RCP 4.5 y GFDL RCP 8.5 los modelos que presentan los rendimientos más bajos (Fig. 17).

La productividad de los suelos agrícolas se redujo considerablemente en los seis estudios de caso ya que según Melillo *et al.* (1993) en regiones secas puede disminuir la producción primaria neta por la disminución de la humedad en el suelo o por el incremento en la evapotranspiración, que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo, así mismo una disminución en las precipitaciones y un aumento en las temperaturas ocasionadas por el calentamiento global pueden generar una disminución en los rendimientos de los cultivos, asociado a un mayor estrés hídrico, lo que a su vez agudizaría la inseguridad alimentaria en especial en las zonas áridas y semiáridas de México.

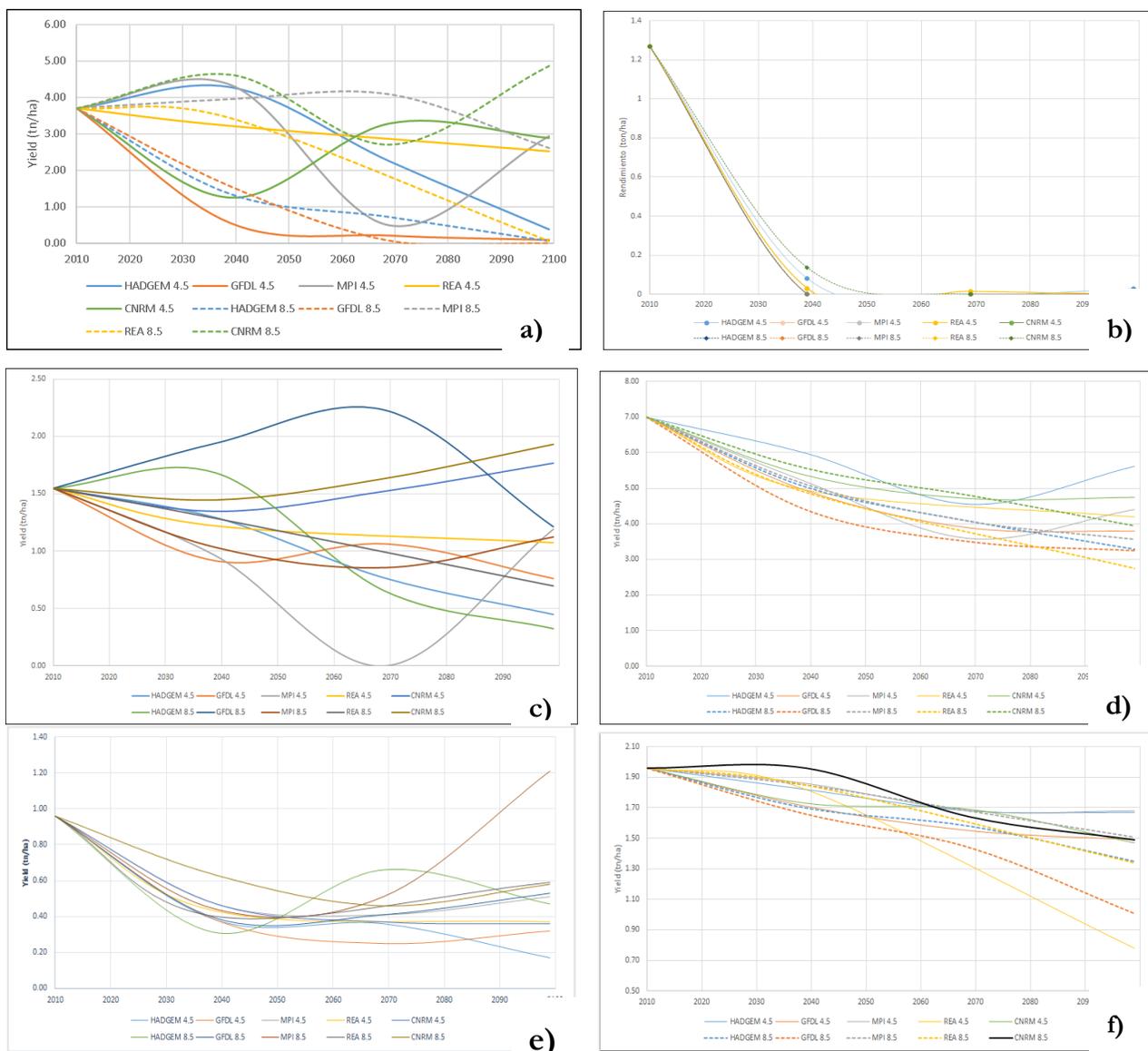


Figura 17. Rendimiento de los cultivos con escenarios de cambio climático para a) Maíz, b) Frijol variedad de altura, c) Frijol variedad tropical, d) Sorgo, e) Cebada, f) Trigo. Fuente: INECC-UACH, 2016.

6. Metodología

6.1 Determinación de las variables climáticas

Se determinaron las razones de cambio y se aplicaron a los siguientes parámetros climáticos: temperatura media mensual, precipitación media mensual, humedad relativa y velocidad del viento con el objeto de estimar su impacto potencial en cada uno de los parámetros del estudio, considerando los escenarios de cambio climático con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C, utilizando los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5, para el horizonte de tiempo 2041.

6.2 Determinación del régimen de humedad del suelo

El régimen de humedad del suelo se estimó con la aplicación del Modelo Newhall propuesto por el Soil Survey Staff (1975) y actualizado por Van Wambeke (2000), definiendo la sección control del suelo de acuerdo a sus características; para ello se consideraron los tipos de suelos que reporta el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000 Serie II de INEGI, esto para condiciones actuales a partir del promedio de las bases de datos de precipitación y temperatura definidas en el escenario base, así como con los escenarios de cambio climático que contemplen un incremento en la temperatura global de 1.5 °C, utilizando los modelos HADGEM2ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5, para el horizonte de tiempo 2041. La escala de trabajo fue 1:250,000 que significó trabajar con poco más de 122 cartas que cubren la superficie nacional. Se generó la cartografía con sus bases de datos en formato shapefile para el escenario base, por lo que se generaron 13 escenarios para este tema (el actual y 12 de cambio climático), con un total de 1 586 cartas a escala 1:250 000.

6.3 Determinación del régimen térmico del suelo

Se tomó como base el estudio realizado por PNUD-INEC (2016), en donde se determinó el régimen térmico del suelo mediante el clima, pendiente, cobertura vegetal y aplicando los principios del USDA (1964), con el objetivo de estimar la temperatura media mensual del suelo a partir de la temperatura media del aire. Para ello se utilizaron los datos de temperatura del aire, precipitación mensual y anual, así como el índice de Aridez calculados en el trabajo realizado por Gómez y Monterroso (2012). A partir de los tipos climáticos y sus regimenes de precipitación (verano, invierno o todo el año), la oscilación térmica de las temperaturas medias de los meses más calientes y los meses más frios y aplicando los principios del USDA (1964) se generaron los factores de ajuste mensuales de la temperatura media del aire para estimar la temperatura media del suelo y realizar la clasificación del régimen de temperatura del suelo de

acuerdo al criterio del Soil Survey Staff (1975), que clasifica el régimen térmico en las siguientes clases: **Gelico, Cryico, Frígido, Mésico, Isomésico, Térmico, Isotérmico, Hipertérmico e Isohipertérmico**. En los Cuadros 7 y 8 se muestran los factores de ajuste para la estimación de la temperatura media del suelo a partir de la temperatura media del aire. Esto para condiciones actuales y con los escenarios de cambio climático que contemplen un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C, utilizando los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5, en el horizonte de tiempo de 2041. La escala de trabajo fue 1:250,000 que significó trabajar con poco más de 122 cartas que cubren la superficie nacional. Se generó la cartografía con sus bases de datos en formato shapefile para el escenario base, por lo que se generaron 13 escenarios para este tema (el actual y 12 de cambio climático), con un total de 1 586 cartas a escala 1:250 000.

Cuadro 7. Factores de ajuste a la temperatura media del aire para estimar la temperatura media del suelo en climas con tipo de lluvia de invierno (Elaborada por Gómez, 2016).

Índice de Aridez	Oscilación de la temperatura del aire	Tipo de lluvia de invierno											
		Enc	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Híper-árido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
Árido	0-5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8	0.7
	5-7	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
	7-14	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	+14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
Semiárido	0-5	0.5	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.6
	5-7	0.6	0.7	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7
	7-14	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.1	0.9	0.8
	+14	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.2	1.0	0.9
Subhúmedo seco	0-5	0.4	0.5	0.6	0.9	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	0.7	0.5
	5-7	0.5	0.6	0.7	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.0	0.8	0.7	0.6
	7-14	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.1	0.9	0.7
	+14	0.7	0.8	0.9	1.2	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.2	1.0	0.8

Fuente: PNUD-INEC, 2016.

Cuadro 8. Factores de ajuste a la temperatura media del aire para estimar la temperatura media del suelo en climas con tipo de lluvia intermedia o de verano (Elaborada por Gómez, 2016).

		Tipo de lluvia de verano o intermedio											
Índice de Aridez	Oscilación de la temperatura del aire	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agosto	Sep	Oct	Nov	Dic
Híper-árido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
Árido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1
Semiárido	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
Subhúmedo seco	0-5	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.8	0.8
	5-7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9
	7-14	0.9	1.0	1.1	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	1.0
	+14	1.0	1.1	1.2	1.3	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
Subhúmedo húmedo	0-5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	5-7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	7-14	0.6	0.7	0.8	0.9	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4
	+14	0.7	0.7	0.8	1.0	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5
Húmedo	0-5	0.2	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	5-7	0.2	0.3	0.5	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	7-14	0.3	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
	+14	0.3	0.4	0.6	0.6	0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.2
Muy húmedo	0-5	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	5-7	0.0	0.0	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	7-14	0.0	0.1	0.2	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	+14	0.0	0.2	0.3	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
Per-húmedo	0-5	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	5-7	0.0	0.0	0.2	0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	7-14	0.0	0.1	0.2	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0
	+14	0.0	0.2	0.3	0.4	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	0.0

Fuente: PNUD-INEC, 2016.

6.4 Determinación de la evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial para las condiciones actuales, se obtuvo de la base de datos realizada por PNUD-INECC, (2015) en donde utilizaron la metodología descrita por Penman modificado por Monteith (Sys et al, 1993). En la cual se estima por medio de un modelo físico la evapotranspiración potencial diaria sobre la superficie de agua libre y poco profunda expresada en milímetros (ET_o) y para la estimación de la evapotranspiración potencial mensual (ETP), se multiplica este parámetro por el número de días del mes. La fórmula consta de un término de radiación y de un término aerodinámico, y tiene por expresión:

$$ET_o = k * (W * (Rn + G) + (1 - W) * f(u) * (e^0 - e))$$

Donde:

ET_o = evapotranspiración sobre superficie de agua libre (mm/día); k = coeficiente de conversión de energía por unidad de superficie en mm de agua que es capaz de evaporar esa energía:

$$k = \frac{10}{\lambda v}$$

Se obtiene fácilmente considerando el calor de vaporización del agua: y se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda v = 595 - (T * 0.51)$$

W = factor de ponderación de los efectos de la radiación sobre la ET_o. Se calcula por medio de la expresión:

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$$

Δ = pendiente de la curva de saturación del vapor, que se estima con la derivada de la fórmula de Bossen particularizada para la temperatura media T (°C).

$$\Delta = 33.8693(0.05904(0.00738T + 0.8072))^7 - 0.0000342) \frac{mb}{^\circ C}$$

γ = constante psicométrica, calculada por la expresión:

$$y = \frac{Cp * Pi}{0.62198 * \lambda vi} \frac{mb}{^{\circ}C}$$

Cp = calor específico del aire seco a presión constante; P = presión atmosférica media mensual;

λv = calor de vaporización del agua que se calcula con la siguiente fórmula:

$$\lambda v = 595 - (T * 0.51)$$

$1-W$ = factor de ponderación correspondiente a los efectos del viento y de la humedad sobre la ETP. Es complementario del anterior según la expresión:

$$1 - W = \frac{y}{\Delta + y}$$

G = flujo advectivo de calor, energía disponible para evaporar por invasiones de aire cálido. Se puede tomar como valor cero al ser un valor pequeño.

Rn = radiación neta, diferencia entre la radiación neta entrante y la saliente:

$$Rn = (1-\alpha)R - Rb$$

$(1-a) R$ = fracción no reflejada

a = albedo (0.23 – 0.25) de la radiación solar; R se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = R_A \left(0.18 + 0.55 \frac{n_i}{N_i} \right)$$

R_A = radiación global en el límite superior de la atmósfera; n_i = horas de insolación reales en el observatorio (h/día); N_i = horas de insolación máxima (h/día); Rb = radiación térmica perdida que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Rb = Rbo \left(a \left(\frac{R}{Rbo} \right) + b \right)$$

Donde:

$a = 1.2$ para zonas áridas o 1.0 en zonas húmedas; $b = -0.2$ para zonas áridas o 0 en zonas húmedas; R = radiación solar (calculada anteriormente).

Rbo = radiación térmica perdida en un día sin nubes, estimada a partir de la emisión según la temperatura (Ley de Stefan – Boltzmann) afectada por un coeficiente de emisión que es función de la humedad del aire:

$$Rbo = \varepsilon \sigma T^4$$

El valor de emisividad ε de la ecuación se estima mediante la expresión:

$$\varepsilon = (a_1 + b_1 * e^{0.5})$$

de forma que:

$$Rbo = (a_1 + b_1 * e^{0.5}) \sigma T^4$$

Donde:

$a_1 = 0.39$; $b_1 = -0.05$; $e(Ti) = e^0(Ti) \text{ HRi}/100$; $\sigma = 11.71 * 10.8$ (constante de Stefan – Boltzmann); T = temperatura del aire en grados Kelvin ($Tk = 273 + T^\circ\text{C}$).

R_s = radiación solar en un día sin nubes (R cuando $n=N$); $f(u)$ = función de viento, que define los efectos del viento como energía disponible para evaporar agua por medio de la expresión:

$$f(u) = 15.36 (1 + 0.0062 U_2)$$

U_2 = velocidad del viento (km/día) a una altura de 2m. Por tanto, se debe conocer la altura del anemómetro; siendo posible corregir la velocidad cuando está situado a una altura diferente (z) por medio de la expresión:

$$U_2 = U_z \left(\frac{2}{z} \right)^{0.2}$$

$e^0 - e$ = déficit de saturación de vapor; para obtenerlo como media, la tensión de saturación se aproxima según la expresión:

$$e^0 = 0.5 (e^0(T_i) + e^0(t_i))$$

o como:

$$e^0 = e^0(T_i)$$

Y la tensión de vapor se obtienen a partir de la humedad relativa como:

$$e(T_i) = e^0(T_i) \frac{HR_i}{100}$$

Así mismo se calculó la evapotranspiración potencial con cambio climático tomando en cuenta un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C, empleando los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5, en el horizonte de tiempo 2041, aplicando las razones de cambio a los diferentes parámetros que se incluyen en la estimación de la ETP. La escala de trabajo fue 1:250,000 que significó trabajar con poco más de 122 cartas que cubren la superficie nacional. Se generó la cartografía con sus bases de datos en formato shapefile para el escenario base, por lo que se generaron 13 escenarios para este tema (el actual y 12 de cambio climático), con un total de 1 586 cartas a escala 1:250 000.

6.5 Determinación del Índice de aridez

Se tomó como base el estudio realizado por Gómez y Monterroso (2012) en donde se delimitaron las Áreas de Influencia Climática (AIC) para todo el territorio de México que son definidas como “unidades geográficas que representan las condiciones anuales y mensuales de las variables temperatura y precipitación en una determinada región de la superficie terrestre” (Gómez et al., 2008). Para ello se realizó una sobreposición de las capas de precipitación (P) y temperatura (T) media anual delimitadas a escala 1:250 000. El Índice de Aridez (IA) se calculó a partir de la relación P/ETP. Los valores en la clasificación del Índice de Aridez se determinaron mediante el criterio de la Convención de Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD, 1994) en donde se diferencian siete clases de tipos climáticos para las tierras, como se describe en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Tipos climáticos definidos por el Índice de Aridez de acuerdo a los criterios de la CNULD.

Índice de Aridez	Tipos climáticos
0.000-0.050	Hiperárido
0.051-0.200	Árido
0.201-0.500	Semiárido
0.501-0.650	Subhúmedo seco
0.651-0.750	Subhúmedo húmedo
0.751-1.250	Húmedo
1.251-2.500	Muy húmedo
>2.500	Per-húmedo

Se estimó el Índice de Aridez con cambio climático considerando un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C manejando los modelos HADGEM2-ES, GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR para el RCP 4.5 y el RCP 8.5, para el horizonte de tiempo 2041, aplicando las razones de cambio a los diferentes parámetros que se incluyen en la estimación de la ETP y de la Precipitación. La escala de trabajo fue 1:250,000 que significó trabajar con poco más de 122 cartas que cubren la superficie nacional. Se generó la cartografía con sus bases de datos en formato shapefile para el escenario base, por lo que se generaron 13 escenarios para este tema (el actual y 12 de cambio climático), con un total de 1 586 cartas a escala 1:250 000.

7. Resultados obtenidos ante un aumento de la temperatura media global de 1.5°C

7.1 Régimen de Humedad del Suelo

7.1.1 Régimen de humedad del suelo bajo condiciones actuales

En el Cuadro 10 se presenta la superficie y porcentaje del régimen de humedad del suelo en la República mexicana bajo condiciones actuales, en donde se observa que el 41.53 % del territorio nacional presenta el régimen Arídico dentro del cual se determinó que el sub-régimen de mayor superficie en esta categoría es el Arídico extremo, con el 26.61% de la superficie del país que presenta suelos secos durante todo el año. El régimen Ústico tiene el 36.33% de la superficie nacional, siendo el Tropústico údico el que ocupa la mayor superficie dentro de este régimen (13.90%) y en menor proporción se encuentra el Tempústico húmedo (2.17%). El régimen Údico ocupa el 20.72%, en donde el sub-régimen Údico típico ocupa la mayor superficie con 11.2% del total; el régimen Xérico solo representa el 0.73% de la superficie nacional del cual el sub-régimen Xérico seco ocupa el 0.66% del total de la superficie. El régimen con menor superficie es el Perúdico que solo representa el 0.70% del total de la superficie nacional.

Cuadro 70. Superficie y porcentaje del régimen de humedad del suelo bajo condiciones actuales en la República mexicana.

Régimen de humedad	Sub-régimen de humedad	Superficie (miles de Ha.)	Porcentaje de la superficie
	Arídico Extremo	52,262.8	26.61
Arídico	Arídico Típico	14,376.2	7.32
	Arídico Débil	14,950.6	7.61
	Xérico		
Xérico	Xérico Seco	1,302.8	0.66
	Xérico Típico	138.7	0.07
Ústico	Tropústico Arídico	6,044.4	3.08
	Tropústico Típico	21,426.0	10.91
	Tropústico Údico	27,295.6	13.90
	Tempústico Típico	12,309.7	6.27
	Tempústico Húmedo	4,257.4	2.17
Údico	Tropúdico Seco	15,334.6	7.81
	Tempúdico Seco	3,273.5	1.67
	Údico Típico	22,085.2	11.24
Perúdico		1,380.0	0.70
Total general		196,437.5	100.00

El régimen Arídico se presenta principalmente en la Península de Baja California, la Planicie Costera del Pacífico Norte en lo que corresponde a Sonora y parte de Sinaloa, las Sierras y Llanuras del Norte, y las Grandes Llanuras de Norteamérica (Fig. 18). El régimen Xérico solo se distribuye en la parte noroccidental de la Península de Baja California. El régimen Ústico se encuentra generalmente en la Sierra Madre del Sur, la Península de Yucatán, en la mesa del Centro, parte de la depresión del Balsas, partes de las laderas del Eje Neovolcánico y en la parte norte de la Sierra Madre Occidental con el sub-régimen *Tempústico Típico*. El régimen Údico se localiza principalmente en la Sierra Madre Occidental, en la Llanura Costera del Golfo Sur y parte de la Llanura Costera del Golfo Norte, así como en la Sierra de Chiapas y el Sistema Volcánico Transversal.

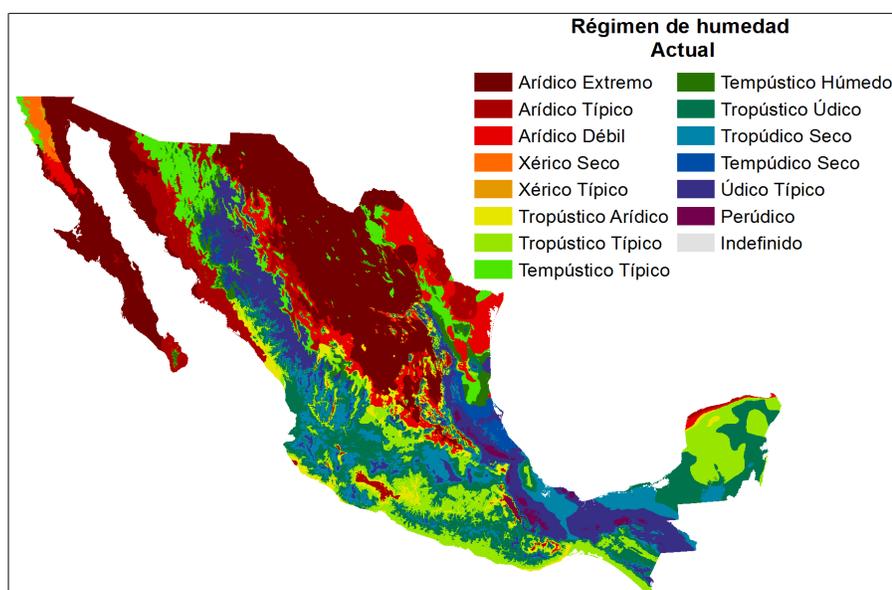


Figura 58. Distribución gráfica del Régimen de humedad del suelo bajo condiciones actuales en la República mexicana.

7.1.2 Régimen de Humedad del Suelo al Considerar un Incremento en la temperatura media global de 1.5°C

7.1.2.1 *Régimen De Humedad Del Suelo Con Un Incremento En La Temperatura Media Global De 1.5°C Para El Rcp 4.5 Watts M²*

Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 4.5 Watts m², se encontró que el régimen Arídico Extremo disminuyó en todos los modelos, el rango de cambio va de -6.22% a -16.78% del total de la superficie del país, siendo el modelo GFDL el que presenta una mayor diferencia; el régimen Arídico Típico obtuvo aumentos de superficie considerables con rangos que van de +10.16% a +18.07% del total de la superficie del país, el modelo GFDL fue el más drástico; el régimen Arídico Débil incrementó ligeramente la superficie, el rango va de +0.94% a +1.47%, el modelo HADGEM es el que presenta mayores cambios. El régimen Xérico Seco tiene cambios mixtos que van de -0.26% a +0.11% del total de la superficie del país, el modelo que disminuyó fue el GFDL y el modelo MPI presentó un aumento. El régimen Xérico Típico disminuyó ligeramente en todos los escenarios, a tasas de cambio de -0.04% a -0.02%, los mayores cambios fueron con los modelos GFDL y el HADGEM. El Tropústico Arídico tiene cambios mixtos, el rango va de -3.77% a +0.14% del total de la superficie del país, siendo el modelo MPI el que aumentó ligeramente y el modelo GFDL el que más disminuyó.

El régimen Tropústico Típico incrementó en todos los modelos, el rango de cambio va de +0.51% a +4.24 del total de la superficie del país, el modelo HADGEM fue el que presentó mayores cambios. En cuanto al régimen Tempústico Típico la proporción cambio en -0.70% a +1.80% del total de la superficie del país, el modelo HADGEM fue el que disminuyó y el modelo GFDL obtuvo el mayor aumento; el Tempústico Húmedo tuvo un aumento ligero en todos los escenarios, el rango de cambio va de +0.49% a +0.92% del total de la superficie del país, en este caso el modelo GFDL fue el de mayor cambio; el régimen Tropústico Údico presenta tasas de cambio de +0.78% a -2.94% del total de la superficie del país, siendo el modelo HADGEM el que más disminuyó y el modelo GFDL el que obtuvo un mayor aumento en su superficie.

El régimen Tropúdico Seco tiene el mismo comportamiento que el régimen descrito anteriormente, el rango de cambio va de -1.62% a +0.08, el modelo MPI tuvo el menor cambio y el modelo GDFL presentó una mayor disminución. El régimen Tempúdico Seco muestra resultados mixtos en los diferentes escenarios con una tasa de cambio de -0.19% a +0.37% del total de la superficie del país, el modelo que disminuyó fue MPI y el que más aumentó fue el modelo GFDL. El régimen Údico Típico también disminuyó su superficie en todos los escenarios con un rango de cambio de -2.74% a -4.99% del total de la superficie del país, en este caso el modelo con mayor cambio fue MPI y, por último, el régimen Perúdico disminuye su superficie en todos los modelos con tasas de cambio que van de -0.28% a -0.39% del total de la superficie del país, siendo el modelo MPI con mayor cambio. (Cuadro 11).

Cuadro 11. Superficie (miles de ha) y porcentaje del Régimen de Humedad del suelo actual y bajo los escenarios de cambio climático con un RCP 4.5 y un aumento de temperatura media global de 1.5°C.

Régimen de humedad	Superficie en miles de Ha			
	Superficie en porcentaje			
	Actual	GDFL	HADGEM	MPI
Árido Extremo	47,717.25	14,743.26	31,313.07	35,495.62
	24.29	7.51	15.94	18.07
Árido Típico	23,204.39	58,701.75	46,678.80	43,154.99
	11.81	29.88	23.76	21.97
Árido Débil	8,670.46	11,315.53	11,544.97	10,507.84
	4.41	5.76	5.88	5.35
Xérico Seco	1,305.66	782.99	1,007.19	1,505.78
	0.66	0.40	0.51	0.77
Xérico Típico	137.41	59.84	51.02	98.58
	0.07	0.03	0.03	0.05
Tropústico Árido	13,118.08	5,722.78	10,816.24	13,403.80
	6.68	2.91	5.51	6.82
Tropústico Típico	21,178.51	22,178.82	29,495.19	28,750.37
	10.78	11.29	15.02	14.64
Tempústico Típico	10,096.65	13,624.63	8,719.37	10,348.76
	5.14	6.94	4.44	5.27
Tempústico Húmedo	3,442.59	5,253.44	5,140.32	4,403.68
	1.75	2.67	2.62	2.24
Tropústico Údico	26,799.83	28,323.95	21,025.54	22,089.71
	13.64	14.42	10.70	11.25
Tropúdico Seco	15,061.17	15,219.52	13,602.72	11,889.03
	7.67	7.75	6.92	6.05
Tempúdico Seco	3,214.68	3,952.32	3,639.95	2,839.76
	1.64	2.01	1.85	1.45
Údico Típico	21,429.90	16,045.53	12,921.21	11,632.36
	10.91	8.17	6.58	5.92
Perúdico	1,060.76	512.98	464.42	299.77
	0.54	0.26	0.24	0.15
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5

Como se puede observar en la Figura 19 hay un desplazamiento de la superficie a regímenes más secos en todos los modelos, principalmente con los modelos HADGEM y MPI, algo que también es importante destacar es el aumento de superficie que tiene el régimen Arídico Típico en particular en el modelo GFDL. En la Figura 20 se muestra que el régimen Arídico Extremo disminuye considerablemente su extensión en el Desierto Chihuahuense y cambia por el Arídico Típico, también el Arídico Débil localizado en el norte de la Llanura costera del Golfo norte cambia a ligeramente más seco (Arídico Típico), se observa que en la parte norte de la Sierra Madre Oriental se vuelve más seca en todos los escenarios, lo mismo pasa en la Llanura Costera del Golfo sur, para la Península de Yucatán dos de los tres escenarios muestran un cambio a regímenes más secos, en la región de Chiapas se ve una reducción del régimen Údico Típico en los modelos HADGEM y MPI, en estos mismos modelos también se aprecia un cambio en el mismo sentido en el Eje Neovolcánico, la Depresión del Balsas, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Occidental, para la Llanura costera del pacífico en la parte de Sonora, el modelo GFDL se muestra más húmedo mientras que los otros dos modelos se muestran sin cambios significativos al actual. Para la Península de Baja California se muestra más seco en GFDL y cambios ligeros en los otros modelos.

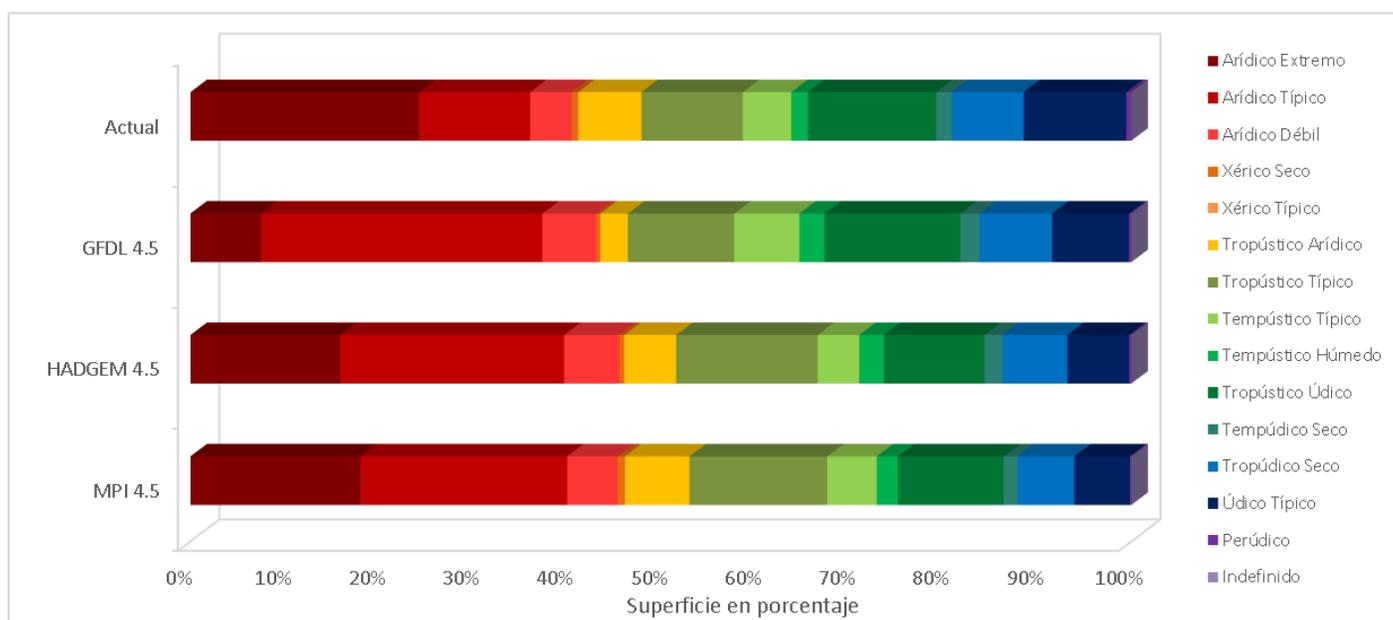
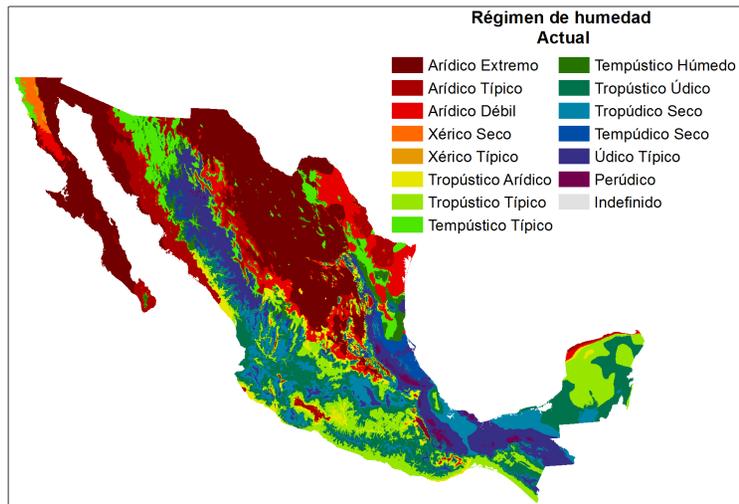
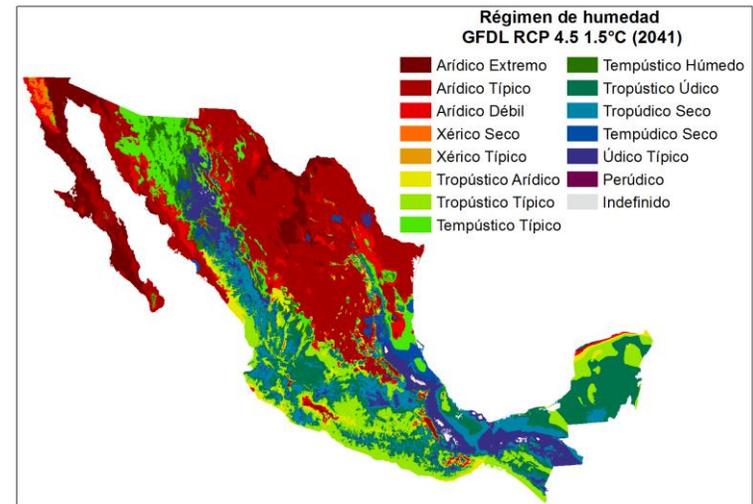


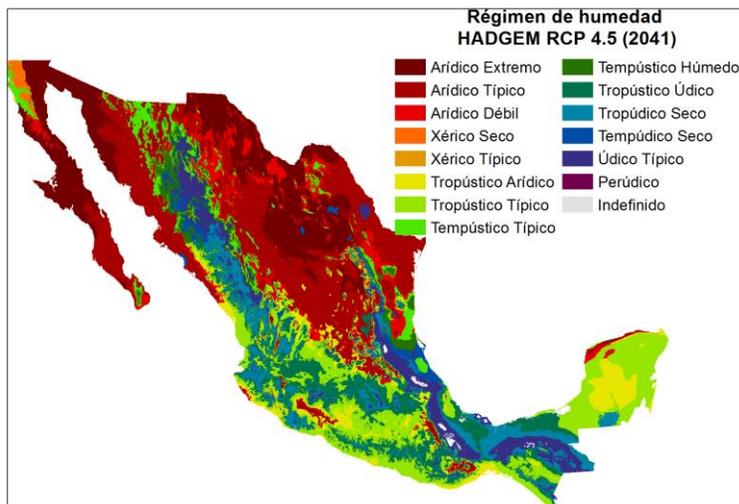
Figura 19. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de Humedad del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5.



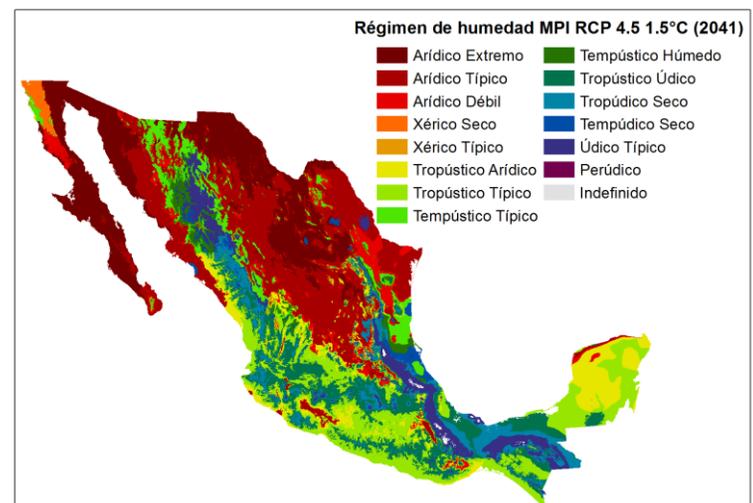
a)



b)



c)



d)

Figura 20. Distribución gráfica de los Regímenes de humedad del suelo: a) escenario base; b) modelos GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻²

7.1.2.2 *Régimen de humedad del suelo con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 8.5 Watts m-2*

Con un aumento de temperatura media global 1.5°C bajo el RCP 8.5 Watts m⁻² se encontró que el régimen Arídico Extremo disminuyó en todos los modelos, el rango va de -6.23% a -19.34% del total de la superficie del país, siendo el modelo GFDL el que presenta una mayor disminución. El régimen Arídico Típico presenta resultados mixtos, el rango va de -4.58% a +19.87% del total de la superficie del país, el mayor incremento se tiene con el modelo GFDL, y la mayor disminución con el modelo HADGEM. El régimen Arídico Débil aumentó la superficie en todos los modelos a razones de cambio que va de +0.56% a +8.42% del total de la superficie del país, en este caso el modelo HADGEM presentó el mayor incremento en superficie. El régimen Xérico Seco tiene cambios mixtos, los cambios van de -0.31% a +0.15%, nuevamente el modelo que disminuyó fue GFDL mientras que el modelo MPI obtuvo el mayor incremento. El régimen Xérico Típico tuvo cambios mixtos de +0.89% a -0.02% del total de la superficie del país, el modelo que presentó la ligera disminución fue GFDL y el que obtuvo un mayor aumento fue HADGEM. Mientras que el Tropústico Arídico pues disminuyó en todos los modelos a rangos de cambio que va de -3.93% a -2.01% del total de la superficie del país, el modelo GFDL fue el que presentó una mayor disminución.

De manera inversa ocurrió en el régimen Tropústico Típico que aumentó en todos los escenarios, el rango va de +1.01% a +9.18% del total de la superficie del país, el modelo que presenta mayor aumento fue HADGEM. En cuanto al régimen Tempústico Típico el rango de cambio va de -0.11% a +3.74% del total de la superficie del país, el modelo que disminuyó fue MPI mientras que el modelo HADGEM obtuvo el mayor aumento; el Tempústico Húmedo tuvo un incremento en todos los escenarios con un rango de +5.44% a +0.30% del total de la superficie del país, en este caso el modelo con mayor incremento fue HADGEM; el régimen Tropústico Údico tuvo una razón de cambio de +0.11% a -2.43%, el modelo MPI obtuvo el mayor decremento mientras que el modelo GFDL obtuvo el mayor aumento en superficie.

En el régimen Tropústico Seco tiene resultados mixtos, el rango de cambio va de -4.41% a +2.17% del total de la superficie del país, siendo el modelo HADGEM el que disminuyó y el modelo GDFL el que más aumentó; el régimen Tempústico Seco tiene resultados mixtos, pero con tendencia positiva con cambios de -0.07% a +1.13% del total de la superficie del país, el modelo que presentó la pequeña disminución fue el MPI y el que más aumentó fue el modelo GFDL. El régimen Údico Típico también disminuyó su superficie en todos los escenarios en un rango de -4.87% a -7.89%, en este caso el modelo más severo fue HADGEM; y, por último, el régimen Perúdico disminuye su superficie en todos los modelos en un rango de cambio de -0.26% a -0.54% del total de la superficie del país siendo el modelo con mayor disminución el GFDL (Cuadro 12).

Cuadro 12. Superficie (miles de ha) y porcentaje del Régimen de Humedad actual del suelo y bajo los escenarios de cambio climático con un RCP 8.5 y un aumento de temperatura media global de 1.5°C.

Régimen de humedad	Superficie en miles de Ha			
	Superficie en porcentaje			
	Actual	GDFL	HADGEM	MPI
Árido Extremo	47,717.25	9,718.17	35,477.47	31,392.30
	(24.29)	(4.95)	(18.06)	(15.98)
Árido Típico	23,204.39	62,223.11	14,200.40	48,663.66
	(11.81)	(31.68)	(7.23)	(24.77)
Árido Débil	8,670.46	12,157.83	25,196.42	9,758.31
	(4.41)	(6.19)	(12.83)	(4.97)
Xérico Seco	1,305.66	693.98	756.05	1,581.45
	(0.66)	(0.35)	(0.38)	(0.81)
Xérico Típico	137.41	54.73	1,879.64	93.61
	(0.07)	(0.03)	(0.96)	(0.05)
Tropústico Árido	13,118.08	5,394.73	8,131.43	9,171.19
	(6.68)	(2.75)	(4.14)	(4.67)
Tropústico Típico	21,178.51	23,152.55	39,214.90	33,495.10
	(10.78)	(11.79)	(19.96)	(17.05)
Tempústico Típico	10,096.65	14,753.39	17,442.89	9,873.11
	(5.14)	(7.51)	(8.88)	(5.03)
Tempústico Húmedo	3,442.59	8,859.86	14,124.50	4,035.10
	(1.75)	(4.51)	(7.19)	(2.05)
Tropústico Údico	26,799.83	27,018.91	24,115.60	22,024.31
	(13.64)	(13.75)	(12.28)	(11.21)
Tropúdico Seco	15,061.17	19,326.05	6,398.01	10,985.61
	(7.67)	(9.84)	(3.26)	(5.59)
Tempúdico Seco	3,214.68	5,442.44	3,372.14	3,088.97
	(1.64)	(2.77)	(1.72)	(1.57)
Údico Típico	21,429.90	7,641.33	5,938.19	11,869.51
	(10.91)	(3.89)	(3.02)	(6.04)
Perúdico	1,060.76	0.16	126.13	387.69
	(0.54)	(0.00)	(0.06)	(0.20)
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5

Como se puede observar en la Figura 21 hay un desplazamiento de la superficie a regímenes más secos en todos los modelos, principalmente con el modelo MPI, algo que también es importante destacar es el aumento de la superficie que tiene el régimen Arídico Típico en especial en el modelo GFDL. En la Figura 22 se puede apreciar que el régimen Arídico Extremo disminuye considerablemente su extensión en el Desierto Chihuahuense y cambia por el Arídico Típico, también el Arídico Débil localizado en el norte de la Llanura costera del golfo norte cambia a Arídico Típico, se observa que en la parte norte de la Sierra Madre Oriental se vuelve más seca en todos los escenarios, lo mismo pasa en la Llanura costera del golfo sur; para la Península de Yucatán dos de los tres modelos muestran un cambio a regímenes más secos, en las Sierras de Chiapas y Guatemala se ve una reducción del régimen Údico Típico en los modelos HADGEM y MPI, en estos mismos modelos también se ve un cambio en el mismo sentido en el Eje Neovolcánico, la Depresión del Balsas, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Occidental, para Llanura costera del pacífico en la parte de Sonora y Sinaloa el modelo GFDL lo muestra más húmedo mientras que los otros dos modelos lo muestran sin cambios significativos al actual. Para la Península de Baja California se muestra más seco en GFDL y cambios ligeros en los otros modelos.

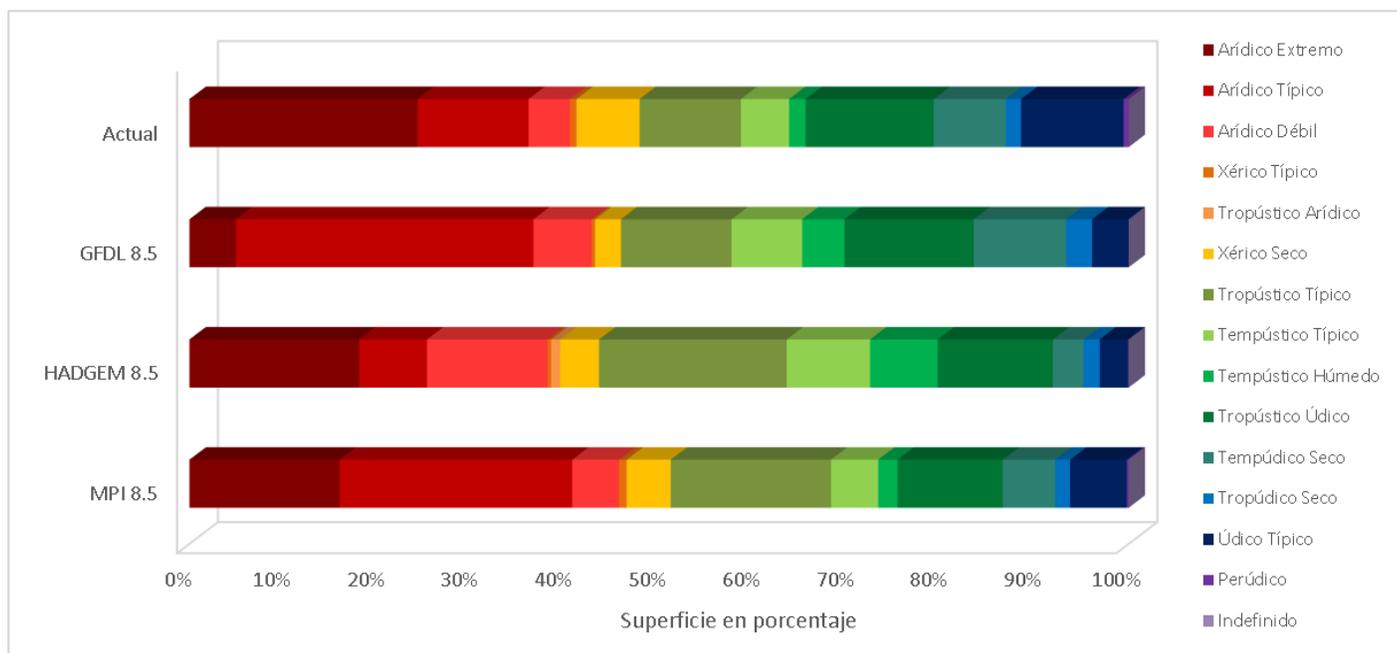
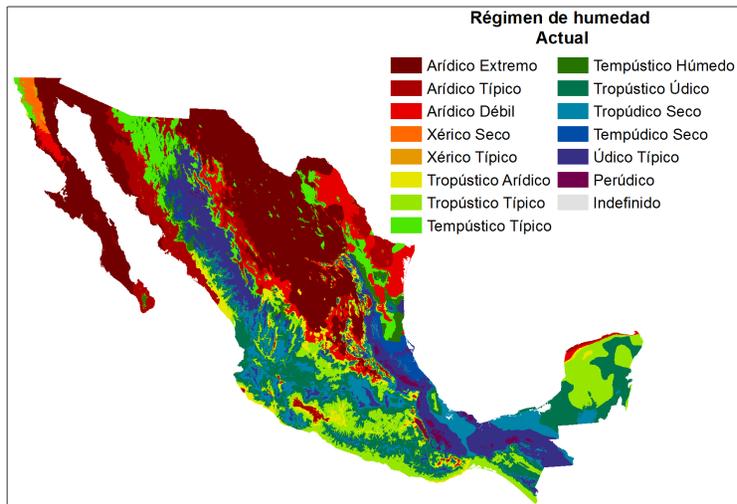
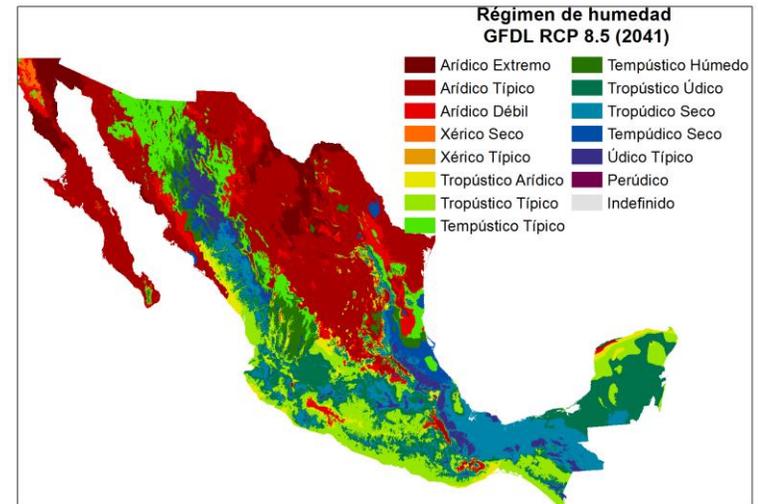


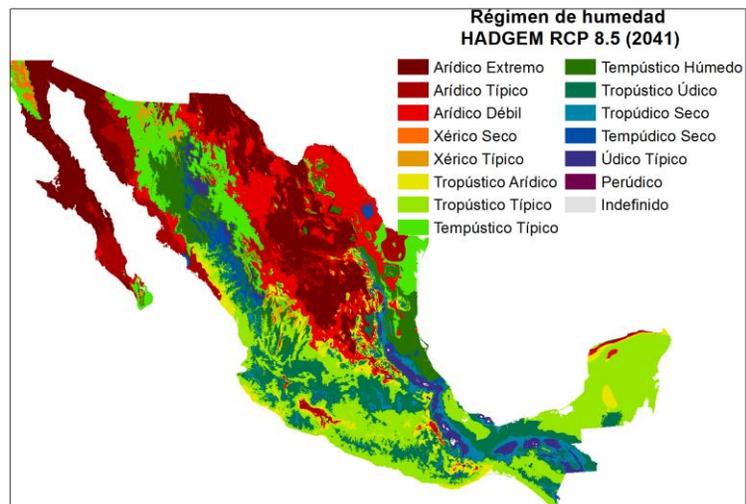
Figura 21. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de Humedad del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.



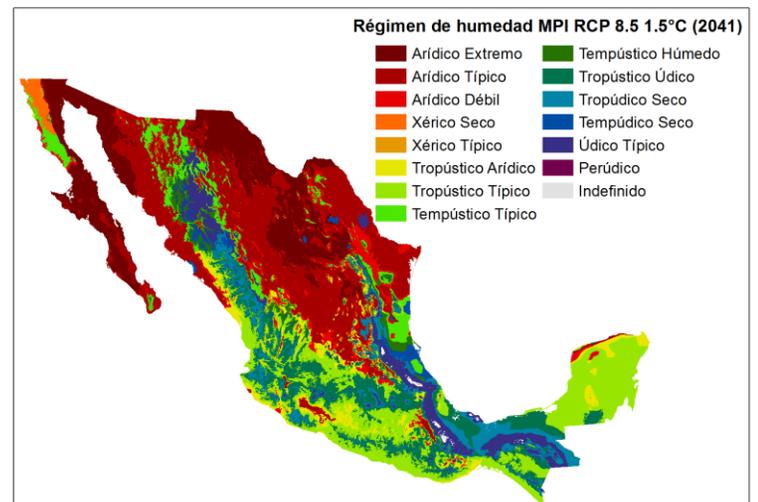
a)



b)



c)



d)

Figura 22. Distribución gráfica de los Regímenes de humedad: a) escenario base; b) modelos GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻²

7.1.2.3 *Comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y RCP 8.5 del régimen de humedad del suelo*

Comparando todos los modelos bajo los distintos RCP con un aumento de temperatura media global 1.5°C se puede observar que todos los modelos tienen un aumento en la superficie en los regímenes de temperatura más cálidos, siendo HADGEM 4.5 el modelo que menos cambia y el que más cambia es el modelo HADGEM 8.5. Para los modelos GFDL a diferencia de otros escenarios, muestra la misma tendencia que el resto de los modelos, siendo el modelo GFDL 4.5 es el más drástico dentro de los modelos con RCP 4.5. (Figura 23). La superficie entre los regímenes de temperatura cambia entre los modelos GFDL con RCP 4.5 y 8.5, en su mayoría disminuye con excepción de los regímenes Frígido e Hipertérmico; el régimen de temperatura Gélido tiene un cambio de -4.26 mlies de Ha. mientras que el régimen Cryico disminuiría -4.52 miles de Ha. mientras que en el régimen Frígido aumentaría +0.98 miles de Ha. El régimen Mésico disminuiría -311.56 miles de Ha.; para el régimen Isomésico disminuiría -243.92 miles de Ha., en el régimen Térmico disminuiría -2912.9 miles de Ha. mientras que el régimen Isotérmico disminuiría -1025.26 miles de Ha., el régimen Hipertérmico aumentaría +5,518.72 miles de Ha. y por último el régimen Isohipertérmico disminuiría -1017.97 miles de Ha.

La superficie entre los regímenes de temperatura cambia entre los modelos HADGEM con RCP 4.5 y 8.5, en su mayoría disminuye con excepción de los regímenes Frígido e Hipertérmico; el régimen de temperatura Gélido tiene un cambio de -4.26 mlies de Ha. mientras que el régimen Cryico disminuiría -2.94 miles de Ha. mientras que en el régimen Frígido disminuiría -0.59 miles de Ha. El régimen Mésico disminuiría -2,721.72 miles de Ha.; para el régimen Isomésico disminuiría -51.08 miles de Ha., en el régimen Térmico disminuiría -9267.00 miles de Ha. mientras que el régimen Isotérmico disminuiría -493.16 miles de Ha., el régimen Hipertérmico aumentaría +12,961.10 miles de Ha. y por último el régimen Isohipertérmico disminuiría -420.35 miles de Ha.

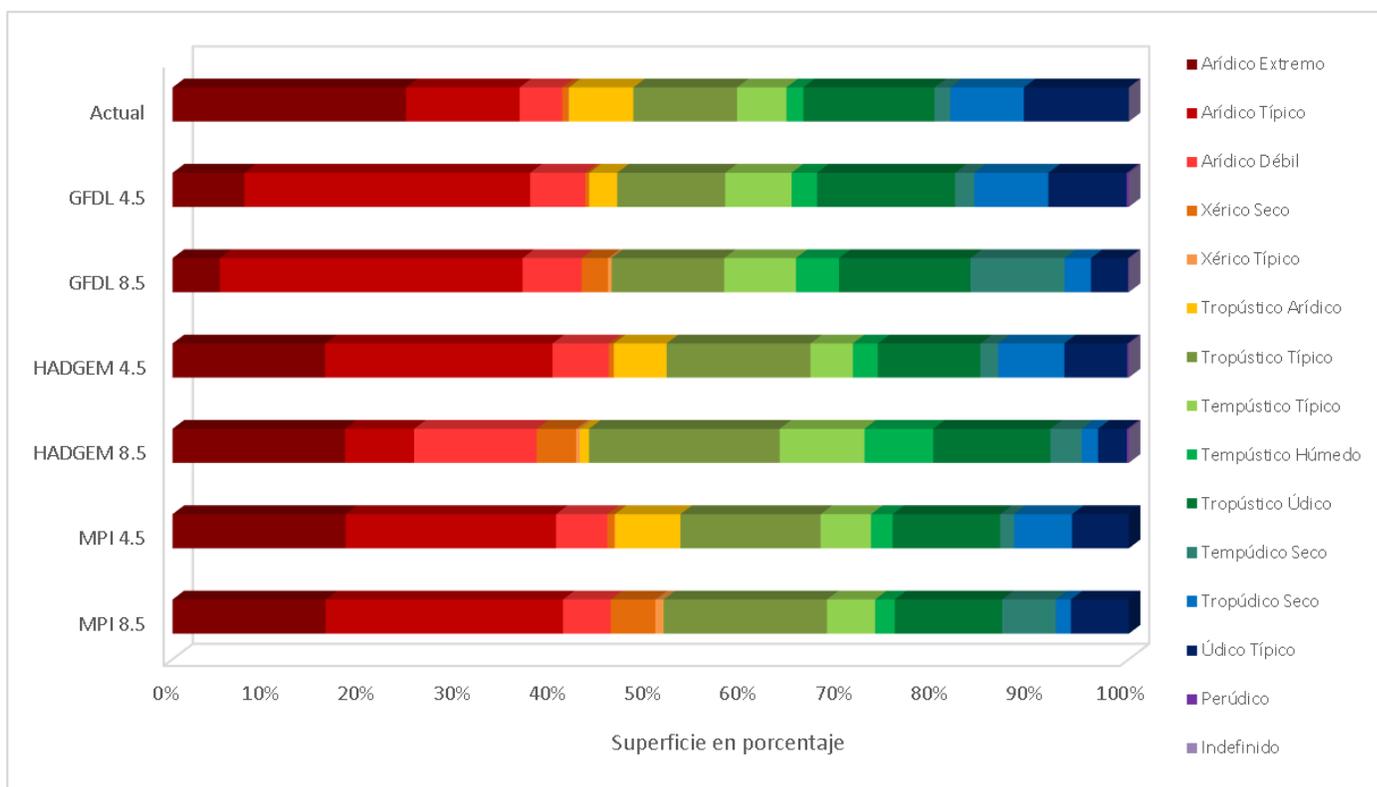


Figura 23. Comparación de la superficie en porcentaje de los Regímenes de humedad del suelo bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m^{-2} y RCP 8.5 Watts m^{-2} bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C.

7.2 Régimen de temperatura del suelo

7.2.1 Régimen de temperatura del suelo bajo condiciones actuales

Del total de la superficie del país (196, 437,500 ha), el 92% tiene regímenes de temperatura del suelo con temperaturas medias anuales iguales o superiores a 15°C (Cuadro 13). De estos, el 47% tiene una temperatura media anual del suelo igual o superior a 15°C, pero inferior a 22°C (Térmica e Isotérmica) y sólo un 3.3% tiene una oscilación entre las temperaturas medias de verano y las temperaturas medias del invierno de menos de 6°C. De los suelos del país, el 45% tiene temperaturas anuales medias iguales o superiores a 22°C (Hipertérmico e Isohipertérmico), de las cuales sólo el 4% tiene una oscilación entre la temperatura media del verano y las temperaturas medias del invierno de menos de 6°C (Isohipertérmica).

Cuadro 13. Superficie (miles de ha) y porcentaje de los actuales regímenes de temperatura del suelo de México.

Régimen de temperatura del suelo									
	Gelico	Cryico	Frigido	Mésico	Isomésico	Termico	Iso-termico	Hyper-termico	Isohiper-termico
Temperatura media anual del suelo	≤ 0°C	>0°C y <8°C		≥ 8°C y < 15°C		≥ 15°C y < 22°C			≥ 22°C
Diferencia de temperatura entre verano e invierno	-	≥6°C	< 6°C	≥ 6°C	< 6°C	≥ 6°C	< 6°C	≥ 6°C	< 6°C
Superficie (ha x1000)	2.16	84.61	46.25	12,703.6	2,485.6	87,166.4	6,590.2	79,599.5	7,759.0
Porcentaje	0.00	0.04	0.02	6.47	1.27	44.37	3.35	40.52	3.96

Las regiones del país con regímenes de temperatura Isotérmica e Isohipertérmica se concentran principalmente en las zonas húmedas y de media a baja altitud y baja latitud. Los regímenes de temperatura más fría del suelo (Gélico, Cryico y Frígido) están asociados con áreas de elevación más altas del Eje Neovolcánico donde el régimen Gélico corresponde a áreas que fueron cubiertas por glaciares en las cimas más altas (2 160 ha) Y los regímenes Frígidos comprenden 130 857 ha. El régimen de temperatura Mésico (6.47%) corresponde a las áreas elevadas de las regiones montañosas del país, con un área mayor en la Sierra Madre Occidental; otras regiones con este régimen son la Sierra de San Pedro Mártir, en la Península de Baja California, la parte norte del Eje Neovolcánico y las montañas más altas de la Sierra Madre Oriental. El régimen Isomésico (1.27%) se encuentra en la parte sur del Eje Neovolcánico y en una pequeña porción de las Sierras de Chiapas y Guatemala (Figura 24).

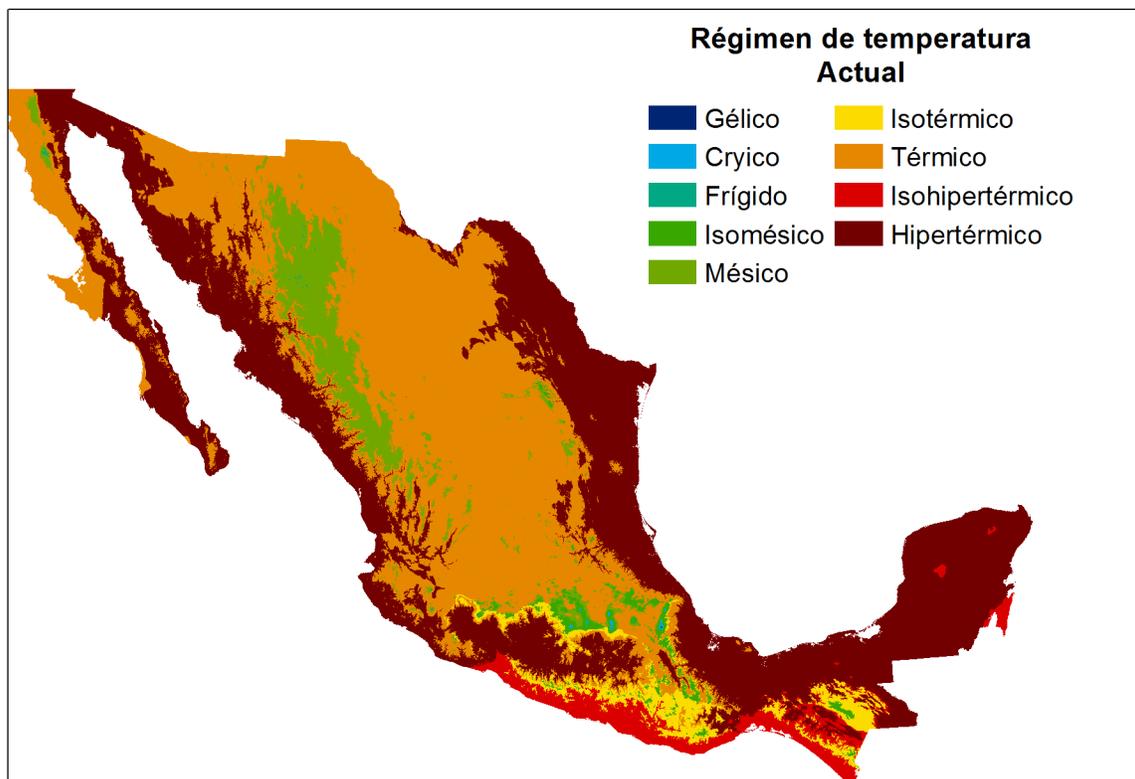


Figura 24. Régimen de temperatura del suelo bajo condiciones actuales en la República Mexicana.

7.2.2 Régimen de temperatura del suelo al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C

7.2.2.1 *Régimen de temperatura del suelo con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 4.5 Watts m⁻²*

Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 4.5 Watts m⁻² se encontró que el régimen de temperatura Pergélico aumenta ligeramente en dos de los tres modelos (GFDL y HADGEM) mientras que el MPI disminuye a 930 hectáreas en comparación con la superficie actual (2 160 Ha). El Cryico disminuye en todos los modelos de 0.04% de la superficie nacional a 0.03% el modelo con mayor disminución fue MPI. Del mismo modo, el régimen Frígido también presenta disminuciones considerables tomando en cuenta la superficie actual (46 250 Ha) a un rango de 910 a 2 060 ha, nuevamente el modelo con más cambios fue MPI, tal como se muestra en el Cuadro 14. El régimen Mésico también disminuye en todos los modelos con un rango de disminución que va de -3.45% a -2.96% de la superficie

total del país, siendo el modelo con mayores cambios el MPI; el régimen Isomésico disminuye de -0.81% a -0.48% de la superficie total del país, en este caso el modelo HADGEM presentó más cambios. El régimen Térmico disminuyó su superficie con todos los modelos en un rango de -14.24% a -11.16% de la superficie nacional siendo el modelo GFDL el que presenta el cambio más drástico, de la misma manera el régimen Isotérmico disminuye en -1.64% a -0.34% de la superficie nacional, el modelo HADGEM fue el que reportó mayor disminución. A partir de estos valores de temperatura, los regímenes de temperatura tienden a aumentar su superficie, el Hipertérmico tiene un aumento en superficie de un rango de +14.35% a +16.63% del total de la superficie del país, donde el aumento más drástico es en el modelo HADGEM. Por último, el modelo Isohipertérmico presenta cambios de la superficie de -0.01% a +4.99% del total de la superficie del país, siendo el modelo con más cambios el GFDL.

Cuadro 14. Superficie (miles de ha) y porcentaje de los Regímenes de Temperatura del suelo en el escenario base y con los modelos GFDEL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻².

Régimen de temperatura	Superficie en miles de Ha			
	(Sup. en porcentaje)			
	Actual	GFDL	HADGEM	MPI
Pergélico	2.16	5.19	5.19	0.93
	0.00	0.00	0.00	0.00
Cryíco	84.61	56.43	57.73	54.87
	0.04	0.03	0.03	0.03
Frígido	46.25	2.06	1.42	0.91
	0.02	0.00	0.00	0.00
Mésico	12,703.62	6,287.56	6,893.25	5,927.52
	6.47	3.20	3.51	3.02
Isomésico	2,485.64	1,083.40	896.79	1,551.02
	1.27	0.55	0.46	0.79
Térmico	87,166.48	59,181.37	65,241.11	61,203.37
	44.37	30.13	33.21	31.16
Isotérmico	6,590.27	4,470.99	3,353.67	5,919.82
	3.35	2.28	1.71	3.01
Hipertérmico	79,599.48	107,782.23	112,256.68	110,178.27
	40.52	54.87	57.15	56.09
Isohipertérmico	7,758.98	17,568.28	7,731.65	11,600.79
	3.95	8.94	3.94	5.91
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5

En la Figura 25 se puede observar que bajo los modelos de Cambio Climático con un RCP 4.5 Watts m^{-2} y un aumento de temperatura media global de $1.5^{\circ}C$ hay un desplazamiento de la superficie del país en general a regímenes de temperatura más cálidos, y también se observa que tienden a modificarse en mayor medida los regímenes de temperatura con oscilaciones térmicas extremas, en este caso el modelo GFDL fue el que presentó mayores cambios en superficie. En la Figura 25 se observa como el régimen de temperatura Frígido disminuye a grado de casi desaparecer, los regímenes fríos disminuyen casi a la mitad de la superficie que actualmente cubren.

En la Figura 26 se puede observar que el régimen Hipertérmico se extiende en todos los escenarios hacia el Desierto Chihuahuense, cada modelo difiere en la superficie aumentando de manera más notoria con el modelo GFDL, también aumenta la superficie ligeramente en la Península de Baja California; en el régimen Isohipertérmico los modelos GFDL y MPI presentan un aumento considerable en la superficie de la Península de Yucatán, el modelo HADGEM no presenta cambios significativos en este régimen. Gran parte del régimen Térmico cambia al régimen Hipertérmico principalmente para el modelo GFDL, el régimen Isotérmico de la región del Bajío desaparece en los modelos GFDL y HADGEM, mientras que el régimen Mésico disminuye su superficie tanto en la Sierra Madre Occidental, como en el Eje Neovolcánico y la Sierra de San Pedro Mártir. El modelo que presenta los cambios más contrastantes es el modelo GFDL para el RCP 4.5.

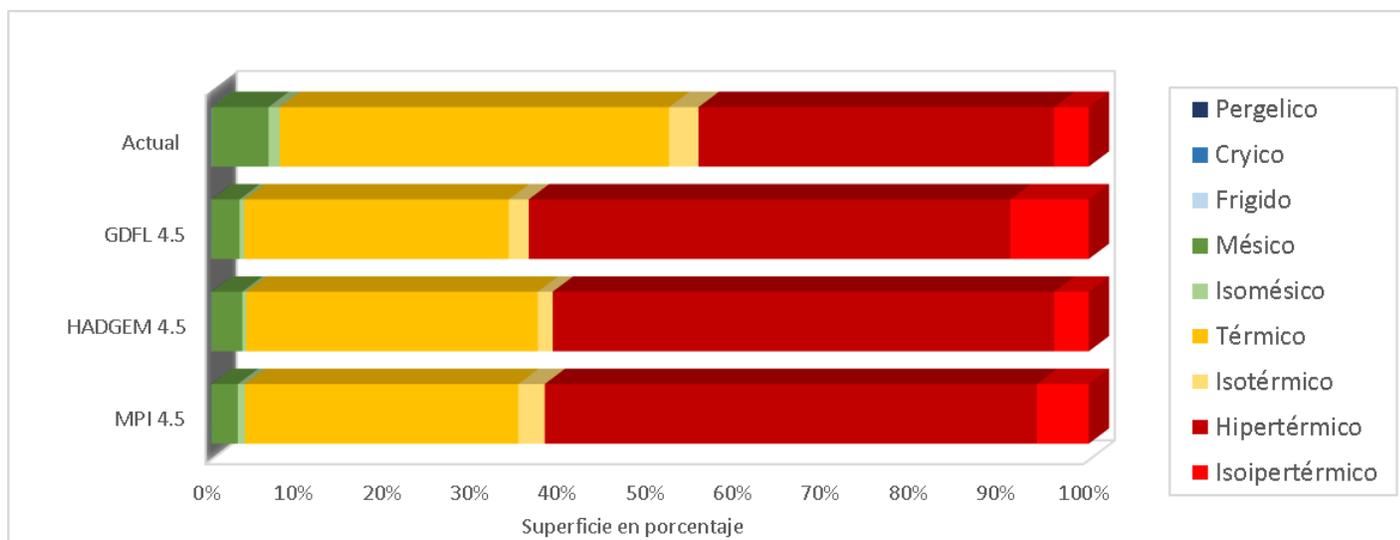


Figura 25. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de temperatura en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5.

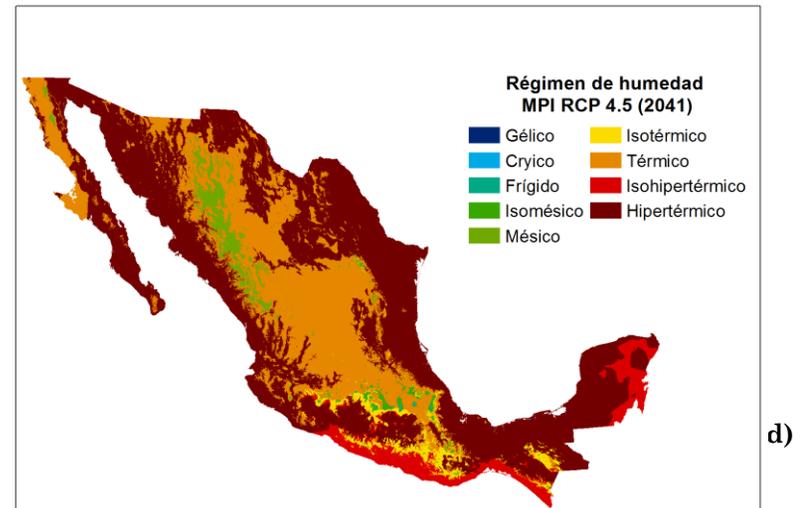
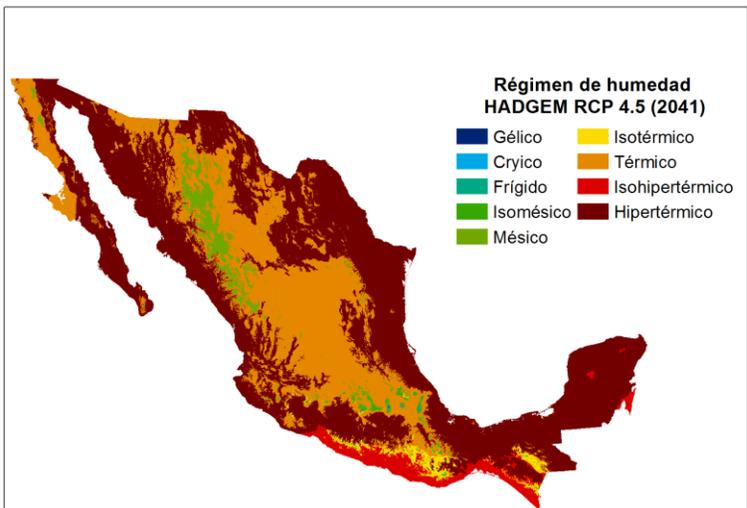
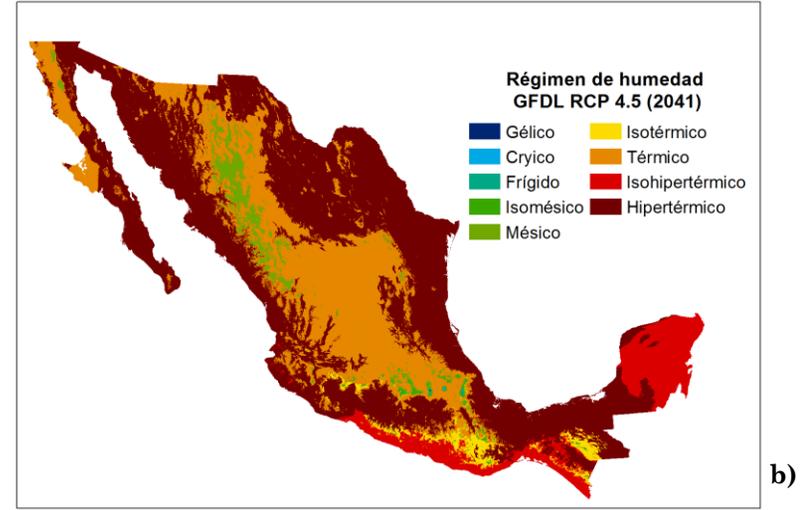
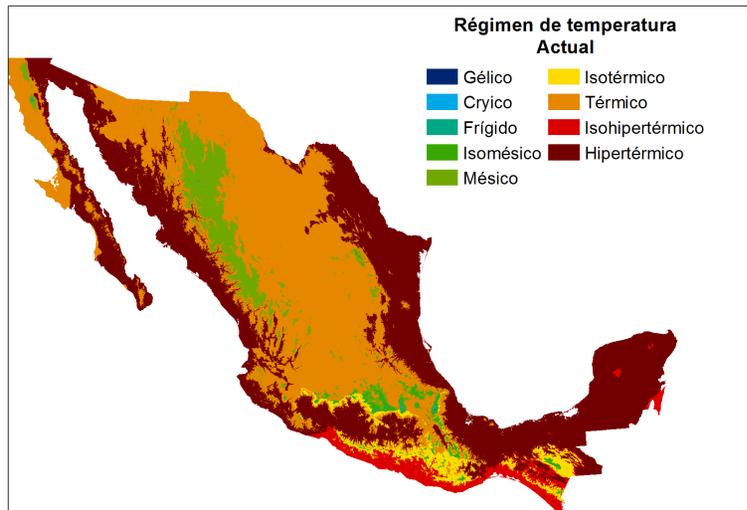


Figura 26. Distribución gráfica de los Regímenes de temperatura del suelo: a) escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻²

7.2.2.2 *Régimen de temperatura del suelo con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 8.5 Watts m⁻²*

Con un aumento de temperatura media global de 1.5°C bajo el RCP 8.5 W m⁻² se encontró que el régimen de temperatura Pérgélico disminuye en todos los modelos a 930 ha en comparación con la superficie actual (2 160 ha). Del mismo modo el Cryico disminuye en todos los modelos de 0.04% de la superficie nacional a 0.03% siendo el escenario con mayor cambio el modelo GFDL. El régimen Frígido también presenta disminuciones considerables tomando en cuenta la superficie actual (46 250 ha) a un rango de cambio de 830 a 3 730 ha, el modelo con más cambios fue HADGEM, tal como se muestra en el Cuadro 15. El régimen Mésico también disminuye en todos los modelos con un rango de disminución que va de -4.35% a -3.43% de la superficie total del país, siendo el modelo que presenta mayor disminución el HADGEM; el régimen Isomésico disminuye de -0.84% a -0.48% del total de la superficie, el modelo GFDL presentó mayores cambios. El régimen Térmico disminuyó su superficie en un rango de -15.88% a -11.16% de la superficie nacional siendo el modelo HADGEM el que presenta el cambio más drástico; de la misma manera el régimen Isotérmico disminuye -1.89% a -0.34% de la superficie nacional, mostrando el cambio más extremo con el mismo modelo. A partir de aquí los regímenes de temperatura tienden a aumentar su superficie, el Hipertérmico tiene un aumento en superficie de un rango de +15.57% a +23.22% del total de la superficie del país, donde el aumento más drástico se dio nuevamente con el modelo HADGEM. Por último, el régimen Isohipertérmico presenta cambios de la superficie de -0.23% a +4.48%, en este caso el modelo GFDL fue el que tuvo mayores cambios.

Cuadro 15. Superficie (miles de ha) y porcentaje de los Regímenes de Temperatura en el escenario base y con los modelos GFDEL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m-2.

Régimen de temperatura	Superficie en miles de Ha			
	(Sup. en porcentaje)			
	Actual	GDFL	HADGEM	MPI
Pergélico	2.16	0.93	0.93	0.93
	0.00	0.00	0.00	0.00
Cryíco	84.61	51.91	54.79	54.87
	0.04	0.03	0.03	0.03
Frígido	46.25	3.73	0.83	0.91
	0.02	0.00	0.00	0.00
Mésico	12,703.62	5,976.00	4,171.53	5,927.52
	6.47	3.04	2.12	3.02
Isomésico	2,485.64	839.48	845.71	1,551.02
	1.27	0.43	0.43	0.79
Térmico	87,166.48	56,268.47	55,974.11	61,203.37
	44.37	28.64	28.49	31.16
Isotérmico	6,590.27	3,445.73	2,860.51	5,919.82
	3.35	1.75	1.46	3.01
Hipertérmico	79,599.48	113,300.95	125,217.78	110,178.27
	40.52	57.68	63.74	56.09
Isohipertérmico	7,758.98	16,550.31	7,311.30	11,600.79
	3.95	8.43	3.72	5.91
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5

En la Figura 27 se puede observar que bajo los modelos de Cambio Climático con un RCP 8.5 Watts m⁻² y un aumento de temperatura media global de 1.5°C hay un desplazamiento de la superficie del país en general a regímenes de temperatura más cálidos, y también se observa que tienden a modificarse en mayor medida los regímenes de temperatura con oscilaciones térmicas extremas. En la Figura 27 se observa como el régimen de temperatura Frígido disminuye a grado de casi desaparecer, los regímenes fríos disminuyen más de la mitad de la superficie que actualmente cubren.

En la Figura 28 se puede percibir que el régimen Hipertérmico se extiende en todos los escenarios hacia el Desierto Chihuahuense, cada modelo difiere en la superficie que aumenta

siendo el más drástico el GFDL, también aumenta la superficie ligeramente en la Península de Baja California; el régimen Isohipertérmico con los modelos GFDL y MPI presenta un aumento considerable en la superficie de la Península de Yucatán, con el modelo HADGEM no presenta cambios significativos en este régimen. Gran parte del régimen Térmico cambia al régimen Hipertérmico principalmente para el modelo GFDL, el régimen Isotérmico de la región del Bajío desaparece en los modelos GFDL y HADGEM, mientras que el régimen Mésico disminuye su superficie tanto en la Sierra Madre Occidental, como en el Eje Neovolcánico y la Sierra de San Pedro Mártir. El modelo que presenta los cambios más drásticos es el modelo HADGEM para el RCP 8.5.

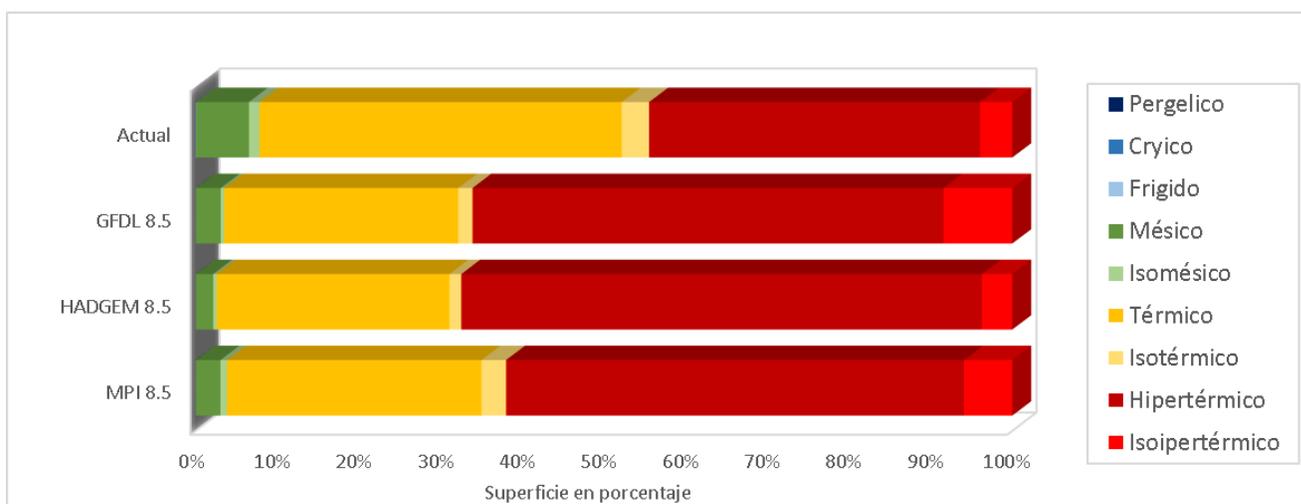
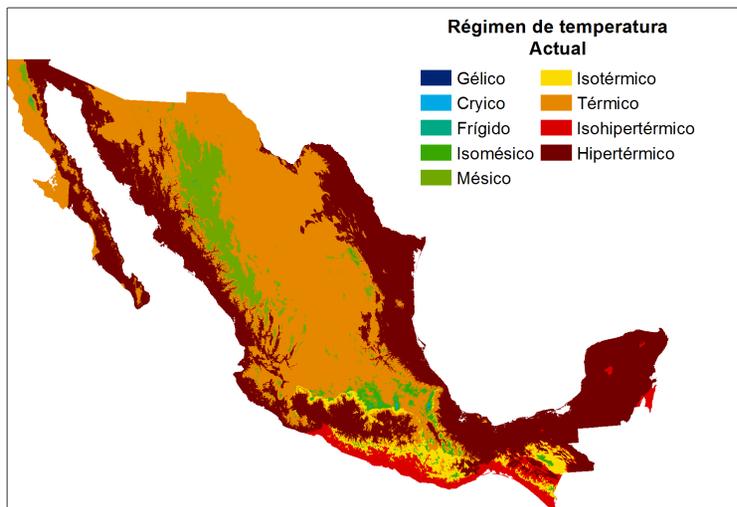
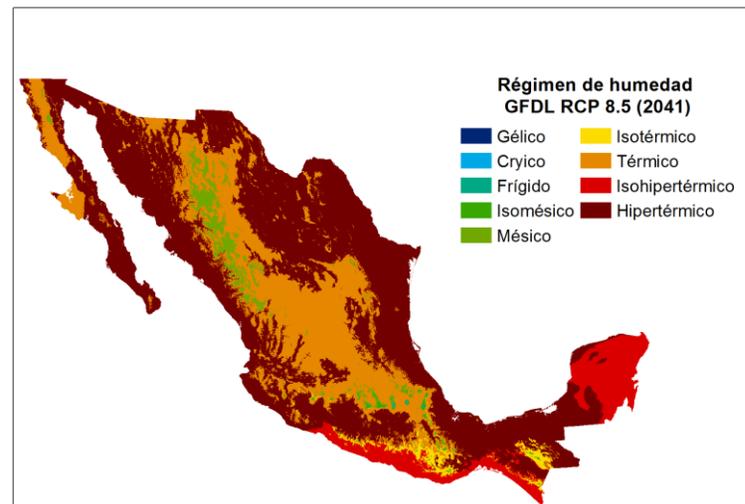


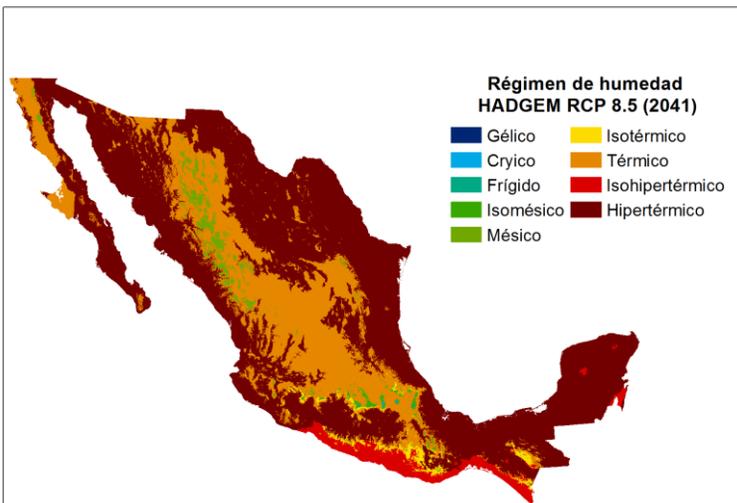
Figura 27. Porcentaje de la superficie de los Regímenes de temperatura del suelo en el escenario actual y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5.



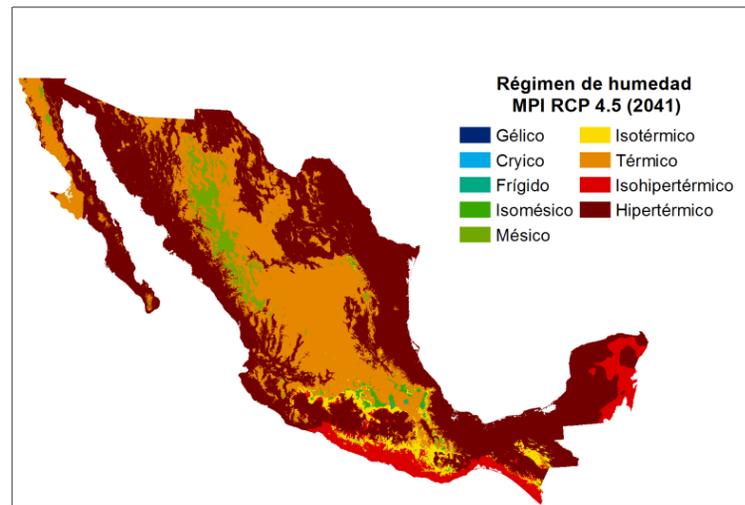
a)



b)



c)



d)

Figura 28. Distribución gráfica de los Regímenes de temperatura del suelo: a) escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻²

7.2.2.3 Comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y 8.5 del régimen de temperatura del suelo

Comparando todos los modelos bajo los distintos RCP con un aumento de temperatura media global 1.5°C se puede observar que la mayoría de los modelos tienen un aumento en la superficie en los regímenes de temperatura más secos, con excepción del modelo HADGEM RCP 8.5, siendo el modelo con menos cambio GFDL 4.5, y el que más cambia es el modelo MPI 8.5. El modelo GFDL tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 muestra la misma tendencia que el resto de los modelos, siendo el modelo GFDL 4.5 es el más drástico dentro de los modelos con RCP 4.5. De manera peculiar, el modelo HADGEM 8.5 es mucho menos drástico que el modelo HADGEM 4.5 (Figura 29)

La superficie entre los regímenes de humedad cambia entre los modelos GFDL con RCP 4.5 y 8.5; el régimen de humedad Árido Extremo tiene un cambio de -5,025.09 miles de Ha. mientras que el régimen Árido Típico aumentaría +3,521.36 miles de Ha. mientras que en el régimen Árido débil aumentaría +842.30 miles de Ha. El régimen Xérico Seco aumentaría +4,611.74 miles de Ha.; para el régimen Xérico Típico aumentaría +634.14 miles de Ha., en el régimen Tropústico Árido disminuiría -5,668.05 miles de Ha. mientras que el régimen Tropústico Típico aumentaría +973.73 miles de Ha. El régimen Tempústico Típico aumentaría +1,128.76 miles de Ha., el régimen Tempústico Húmedo aumentaría +3,606.45 miles de Ha., el Tropústico Údico disminuiría -1.305.04 miles de Ha., el régimen Tempústico Seco aumentaría 15,373.73 miles de Ha.; el régimen Tropústico Seco disminuiría 9,777.08 miles de Ha., el régimen Údico Típico disminuiría -8,404.20 miles de Ha. y por último el régimen Perústico disminuiría -512.82 miles de Ha.

La superficie entre los regímenes de humedad cambia entre los modelos HADGEM con RCP 4.5 y 8.5; el régimen de humedad Árido Extremo tiene un cambio de +4,164.40 miles de Ha. mientras que el régimen Árido Típico disminuiría -32,478.40 miles de Ha. mientras que en el régimen Árido débil aumentaría +13,651.45 miles de Ha. El régimen Xérico Seco aumentaría +7,124.24 miles de Ha.; para el régimen Xérico Típico aumentaría +705.03 miles de Ha., en el régimen Tropústico Árido disminuiría -8,936.60 miles de Ha., mientras que el régimen Tropústico Típico aumentaría +9,719.71 miles de Ha., el régimen Tempústico Típico aumentaría +8,723.52 miles de Ha., el régimen Tempústico Húmedo aumentaría +8,984.18 miles de Ha., el Tropústico Údico disminuiría -3,090.06 miles de Ha., el régimen Tempústico Seco aumentaría +2,758.06 miles de Ha.; el régimen Tropústico Seco disminuiría -10,230.50 miles de Ha., el régimen Údico Típico disminuiría -6,983.02 miles de Ha. y por último el régimen Perústico disminuiría -338.29 miles de Ha.

La superficie entre los regímenes de humedad cambia entre los modelos MPI con RCP 4.5 y 8.5; el régimen de humedad Árido Extremo tiene un cambio de -4,103.32 miles de ha. mientras que el régimen Árido Típico aumentaría +5,508.67 miles de Ha. mientras que en el régimen Árido débil disminuiría +749.53 miles de Ha. El régimen Xérico Seco aumentaría +7,665.41 miles de Ha.; para el régimen Xérico Típico aumentaría +1,482.87 miles de Ha., en el régimen Tropústico

Árido disminuiría -13,310.19 miles de Ha. mientras que el régimen Tropústico Típico aumentaría +4,744.73 miles de Ha., el régimen Tempústico Típico disminuiría -475.65 miles de Ha., el régimen Tempústico Húmedo disminuiría -358.58 miles de Ha., el Tropústico Údico disminuiría -65.36 miles de Ha., el régimen Tempúdico Seco disminuiría -8,145.85 miles de Ha.; el régimen Tropúdico Seco disminuiría -8,800.06 miles de Ha., el régimen Údico Típico aumentaría -237.15 miles de Ha. y por último el régimen Perúdico disminuiría -87.92 miles de Ha.

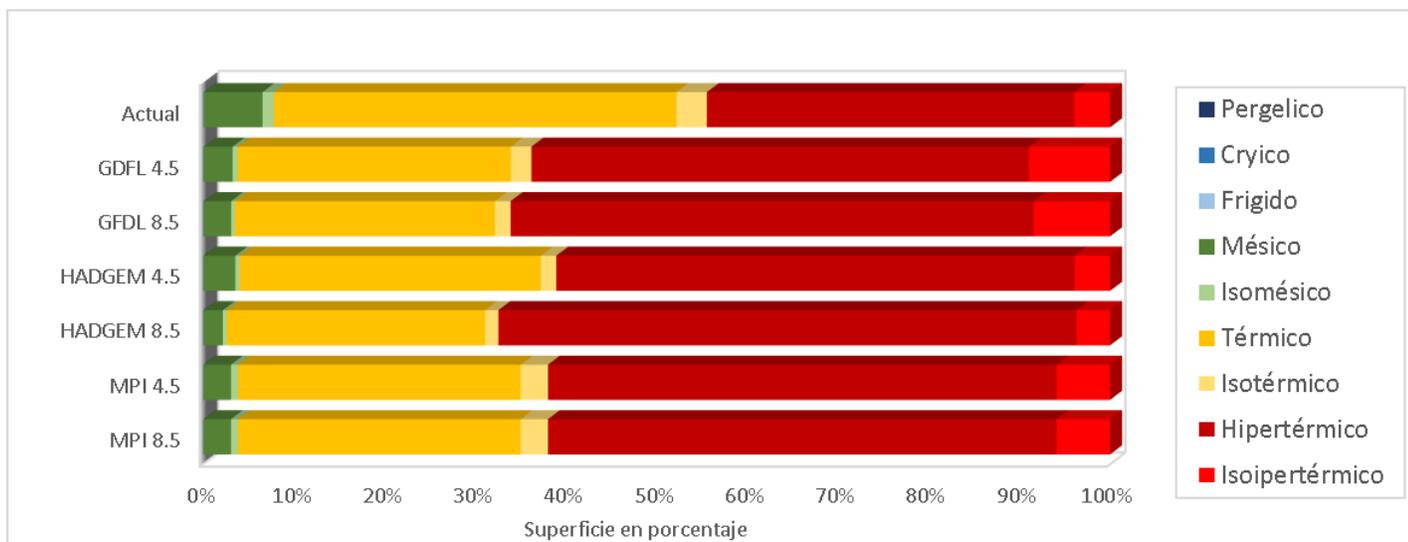


Figura 29. Comparación de la superficie en porcentaje de los Regímenes de temperatura del suelo bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C.

7.3 Evapotranspiración Potencial

7.3.1 Evapotranspiración Potencial Bajo Condiciones Actuales

Los resultados obtenidos sobre la condición actual de la evapotranspiración potencial (ETP) a nivel nacional (Cuadro 16), arrojan que el 42% de la superficie de México cuenta con una ETP de 1401-1600 mm, distribuidos principalmente en la Mesa del Norte, Península de Yucatán, en gran parte de la Península de Baja California y la Llanura Costera del Golfo Norte (Fig. 30).

Cuadro 16. Superficie (miles de ha) y porcentaje de los rangos de Evapotranspiración potencial (ETP) en la República Mexicana.

Rangos ETP (mm)	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
380-400	16.4	0.01
401-600	1.0	0.00
601-800	14.4	0.01
801-1000	3,615.7	1.84
1001-1200	21,027.2	10.70
1201-1400	55,948.4	28.48
1401-1600	82,299.0	41.90
1601-1800	26,426.4	13.45
1801-2000	6,532.5	3.33
2001-2200	556.6	0.28
Total general	196,437.5	100.00

El 28.5% de la superficie del territorio nacional registra una ETP de 1201-1400 mm, ubicándose en la Mesa del centro, Llanura costera del Golfo Norte y la Sierra de Chiapas, así como en algunas partes de la Sierra Madre Occidental, Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur. El rango de ETP de 1601-1800 mm representa el 13.5% del total de la superficie, registrándose en algunas partes de la Llanura costera del pacífico en la parte de Sonora y de Sinaloa, Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Sur. El rango de ETP de 1001-1200 mm cuenta con el 10.7% de la superficie nacional encontrándose principalmente en la parte norte de la Sierra Madre Occidental y en el Eje Neovolcánico. Las regiones con mayor ETP se encuentran en la parte norte de la Llanura costera del pacífico, sur de Sonora y el Delta del Río Colorado

ocupando tan solo el 3.61% de la superficie nacional. Mientras que las regiones con menor ETP que van de 380-1000 mm solo registra el 1.86% del total de la superficie, localizándose en las zonas con grandes montañas y volcanes, como en los límites entre Puebla y Veracruz.

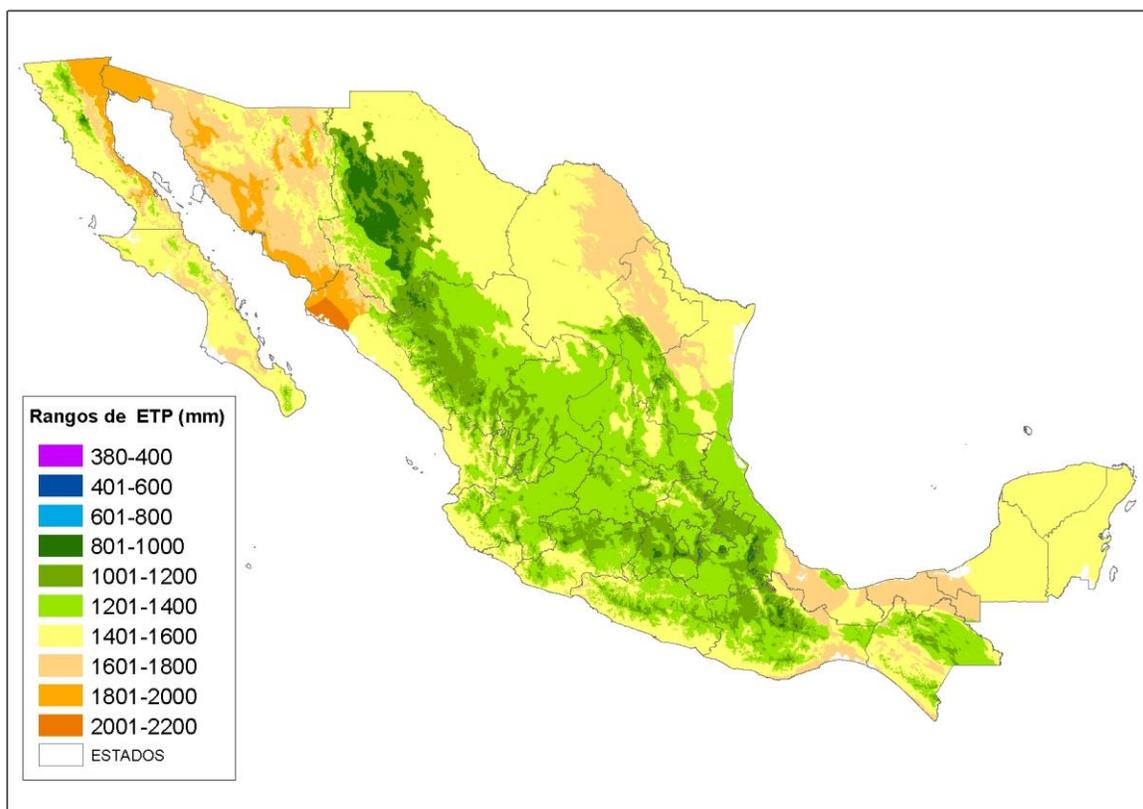


Figura 30. Distribución gráfica de los rangos de Evapotranspiración Potencial (ETP mm) actual en la República Mexicana.

7.3.2 Evapotranspiración potencial al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5 °C

7.3.2.1 *Evapotranspiración potencial con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 4.5 Watts m-2*

Ante un aumento de la temperatura media global de 1.5 °C utilizando el RCP 4.5 Watts m⁻² con los modelos GFDL, HADGEM y MPI, el rango de ETP (mm) de 380-400 disminuirá en todos los modelos ocupando tan solo 100 ha de 16 410 ha que se tienen en el escenario base (Cuadro 17); el rango de 401-600 desaparece en todos los modelos; el rango de 601-800 presenta el mismo comportamiento ya que disminuye en los tres modelos ocupando solamente 2 000 ha del territorio nacional con los modelos GFDL y HADGEM de 14 360 ha que se tienen en el escenario base; el rango de 801-1000 disminuye en todos los modelos a una tasa de cambio que va de -1.65% a -1.69% del total de la superficie del país, alcanzando tan solo el 0.15% de la superficie nacional con el modelo GFDL; el rango de 1001-1200 también disminuye en los tres modelos con una razón de cambio que va de -5.59% a -6.28% del total de la superficie del país, nuevamente el modelo GFDL tuvo la mayor disminución; el rango de 1201-1400 también muestra una disminución en los tres modelos a una razón de cambio que va de -12.06% a -12.97% del total de la superficie del país, el modelo con mayor cambio fue GFDL; así mismo el rango de 1401-1600 tiene un decremento en superficie con todos los modelos (-2.26% a 11.86%) llegando a 30.04%, del total de la superficie del país, utilizando el modelo GFDL. El rango de 1601-1800 aumenta considerablemente en los tres modelos estudiados a una razón de cambio que va de +13.47 a +24.12 del total de la superficie del país, teniendo el porcentaje más alto con el modelo GFDL; el rango de 1801-2000 también muestra un incremento importante en los tres modelos con una tasa de cambio de +6.1% a +7.56% del total de la superficie del país, teniendo un mayor aumento aplicando el modelo HADGEM; el rango de 2001-2200 muestra un ligero aumento en todos los modelos, alcanzando tasas de cambio que van de +1.77% a +2.41% del total de la superficie del país, el modelo que obtuvo el mayor aumento fue GFDL. Así mismo aparece un nuevo rango que va de 2201-2400 ocupando el 0.17% de la superficie nacional con el modelo MPI y el 0.28% del territorio nacional con los modelos GFDL y HADGEM.

Cuadro 17. Superficie (miles de ha) y porcentaje por rangos de ETP (mm) en la República Mexicana al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5°C con el escenario base y los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻².

Rangos de ETP (mm)	Superficie (miles de hectáreas)			
	Porcentaje de la superficie			
	Escenario base	GFDL	HADGEM	MPI
380-400	16.41	0.1	0.1	0.1
	0.01	0.00	0.00	0.00
401-600	1.03	0.0	0.0	0.0
	0.00	0.00	0.00	0.00
601-800	14.36	2.0	2.0	2.9
	0.01	0.00	0.00	0.00
801-1000	3,615.73	303.3	334.9	379.8
	1.84	0.15	0.17	0.19
1001-1200	21,027.21	8,289.0	8,678.3	10,030.0
	10.70	4.22	4.42	5.11
1201-1400	55,948.39	30,475.1	30,505.3	32,255.2
	28.48	15.51	15.53	16.42
1401-1600	82,298.96	59,018.6	59,863.0	77,862.8
	41.90	30.04	30.47	39.64
1601-1800	26,426.37	73,800.6	69,829.9	52,887.4
	13.45	37.57	35.55	26.92
1801-2000	6,532.48	18,528.6	21,384.9	18,655.1
	3.33	9.43	10.89	9.50
2001-2200	556.58	5,464.5	5,283.5	4,022.5
	0.28	2.78	2.69	2.05
2201-2400	0	555.7	555.7	341.8
	0.00	0.28	0.28	0.17
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5
	100.00	100.00	100.00	100.00

En la Figura 31 se presenta el porcentaje por rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻², en donde se observa que el modelo que mostró mayores cambios en superficie fue GFDL, seguido de HADGEM; el modelo que tuvo menores cambios en superficie fue MPI. En la Figura 32 se muestra la

distribución gráfica de los rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI, en donde se aprecia que la Llanura costera del norte del estado de Sinaloa pasaran de tener un rango de 2001-2200 a 2201-2400 mm en todos los modelos; en el sur de Sonora y el Delta del Río Colorado la ETP pasará de 1801-2000 a 2001-2200 ante un aumento de temperatura media global de 1.5°C; el rango que presenta mayores cambios en la superficie utilizando todos los modelos es el de 1601-1800 mm al aumentar considerablemente, principalmente en las Sierras y llanuras del Norte y la Península de Yucatán. En gran parte de la Mesa del Centro, El Eje neovolcánico y algunas partes de la Sierra Madre Oriental, Occidental y la Sierra Madre del Sur pasaran de 1201-1400 a 1401-1600 mm. Los rangos con menor ETP localizados en las partes altas, tenderán a desaparecer.

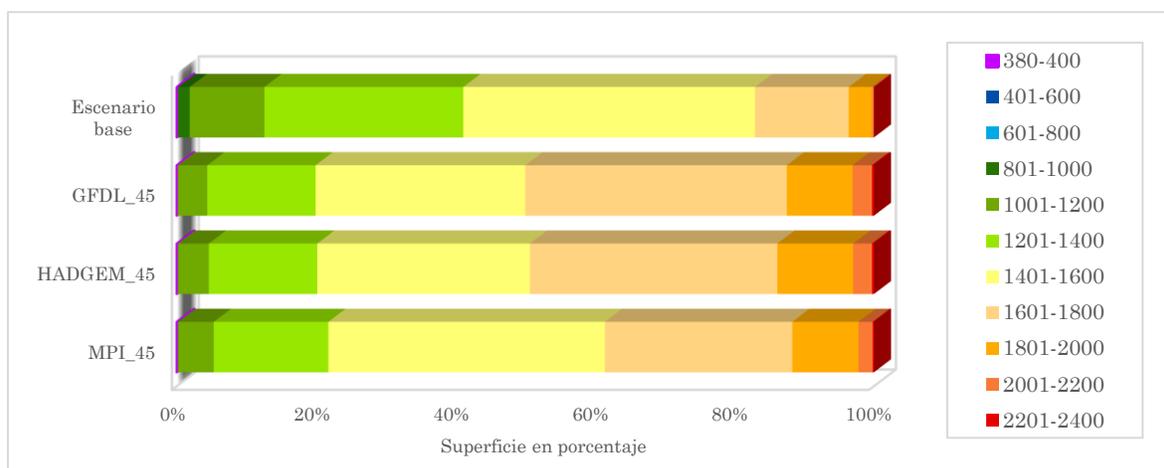
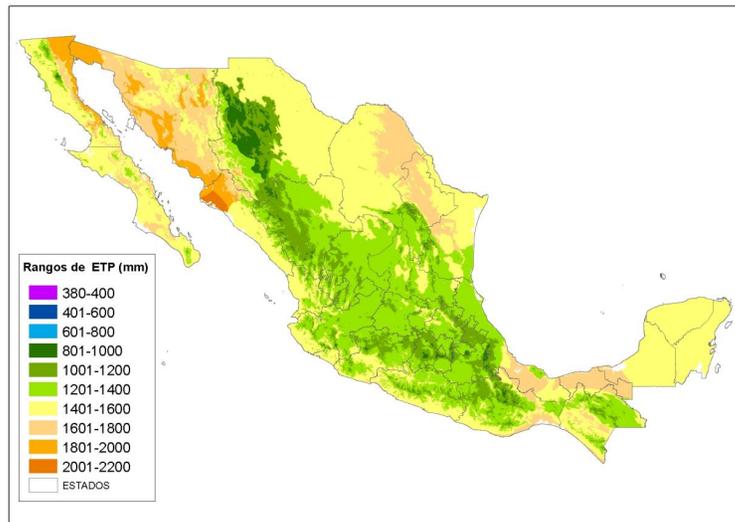
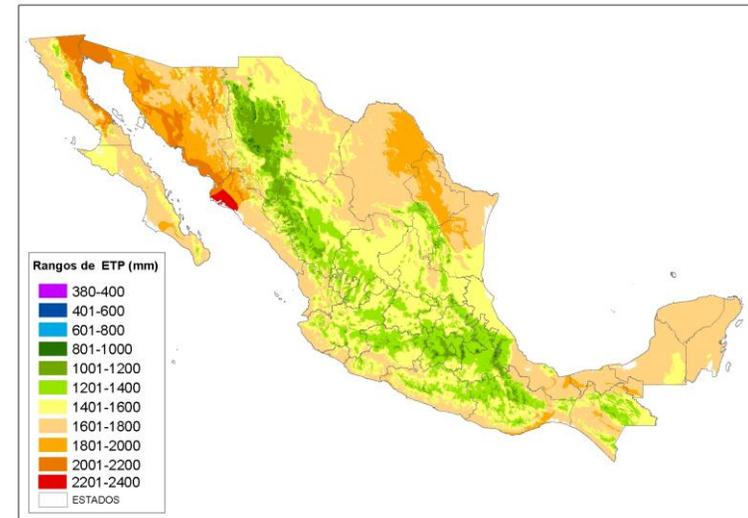


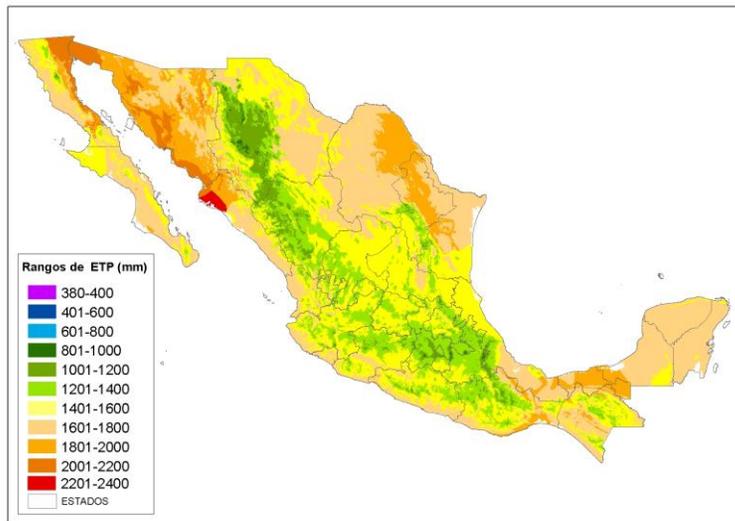
Figura 31. Porcentaje de la superficie por rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m-2 en la República Mexicana.



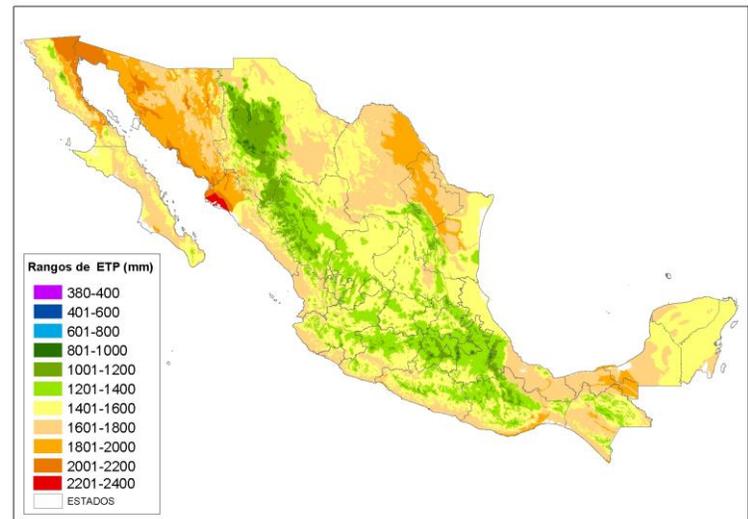
a)



b)



c)



d)

Figura 32. Distribución de los rangos de ETP (mm) en la República Mexicana para el RCP 4.5 Watts m⁻² con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI.

7.3.2.2 *Evapotranspiración potencial con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 8.5 watts m-2*

La superficie y porcentaje de los rangos de ETP (mm) considerando un aumento en la temperatura media global de 1.5°C utilizando los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² se muestran en el Cuadro 18, donde se observa que nuevamente el rango de 380-400 disminuye a 100 ha en todos los modelos de 16 410 ha que se tienen en el escenario base; el rango de 401-600 prácticamente desaparece en todos los modelos; en el caso del rango de 601-800 éste disminuye considerablemente en los tres modelos alcanzando tan solo 1 200 ha con el modelo HADGEM de 14 360 ha que se tienen en el escenario base. El rango de 801-1000 presenta un decremento en la superficie en los tres modelos evaluados a una razón de cambio que va de -1.69% a -1.76% del total de la superficie del país, nuevamente el modelo HADGEM fue el que presentó mayores cambios en superficie; de igual forma los rangos de ETP que van de 1001-1200, 1201-1400 y 1401-1600 presentan disminuciones en la superficie en todos los modelos, siendo el modelo HADGEM el de mayores cambios, con tasas que van de -6.73% a -7.95%, -13.77% a -14.11% y -10.09% a -14.73% del total de la superficie del país, respectivamente. El rango de 1601-1800 aumenta en los tres modelos con una razón de cambio que va de +22.07 a +24.22% del total de la superficie del país, el modelo HADGEM es el que presenta un mayor incremento en superficie; lo mismo sucede con el rango de 1801-2000 al incrementar la superficie en los tres modelos evaluados (+7.70% a +10.24%) alcanzando el 13.57% de la superficie nacional con el modelo HADGEM. El mismo fenómeno ocurre con el rango de 2001-2200 aumentando a una razón de +2.24% a +3.79% del territorio nacional, alcanzando una mayor superficie con el mismo modelo mencionado anteriormente. Al igual que en el RCP 4.5 Watts m⁻², en este caso también aparece en todos los modelos un nuevo rango de ETP que va de 2201-2400, representando el 0.33% del territorio nacional con los modelos GFDL y HADGEM y el 0.28% con el modelo MPI.

Cuadro 18. Superficie (miles de ha) y porcentaje por rangos de ETP (mm) en la República Mexicana al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5°C con el escenario base y los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻².

Rangos de ETP (mm)	Superficie (miles de hectáreas)			
	Porcentaje de la superficie			
	Escenario base	GFDL	HADGEM	MPI
380-400	16.41	0.1	0.1	0.1
	0.01	0.00	0.00	0.00
401-600	1.03	0.0	0.0	0.0
	0.00	0.00	0.00	0.00
601-800	14.36	1.7	1.2	1.8
	0.01	0.00	0.00	0.00
801-1000	3,615.73	272.3	163.4	293.7
	1.84	0.14	0.08	0.15
1001-1200	21,027.21	7,308.9	5,394.4	7,795.5
	10.70	3.72	2.75	3.97
1201-1400	55,948.39	28,368.2	28,223.3	28,904.5
	28.48	14.44	14.37	14.71
1401-1600	82,298.96	59,532.2	53,367.3	62,494.0
	41.90	30.31	27.17	31.81
1601-1800	26,426.37	72,012.2	73,992.2	69,775.8
	13.45	36.66	37.67	35.52
1801-2000	6,532.48	22,026.1	26,652.9	21,673.8
	3.33	11.21	13.57	11.03
2001-2200	556.58	6,276.8	8,002.6	4,942.7
	0.28	3.20	4.07	2.52
2201-2400	0	639.2	640.1	555.7
	0.00	0.33	0.33	0.28
Total general	196,437.5	196,437.5	196,437.5	196,437.5
	100.00	100.00	100.00	100.00

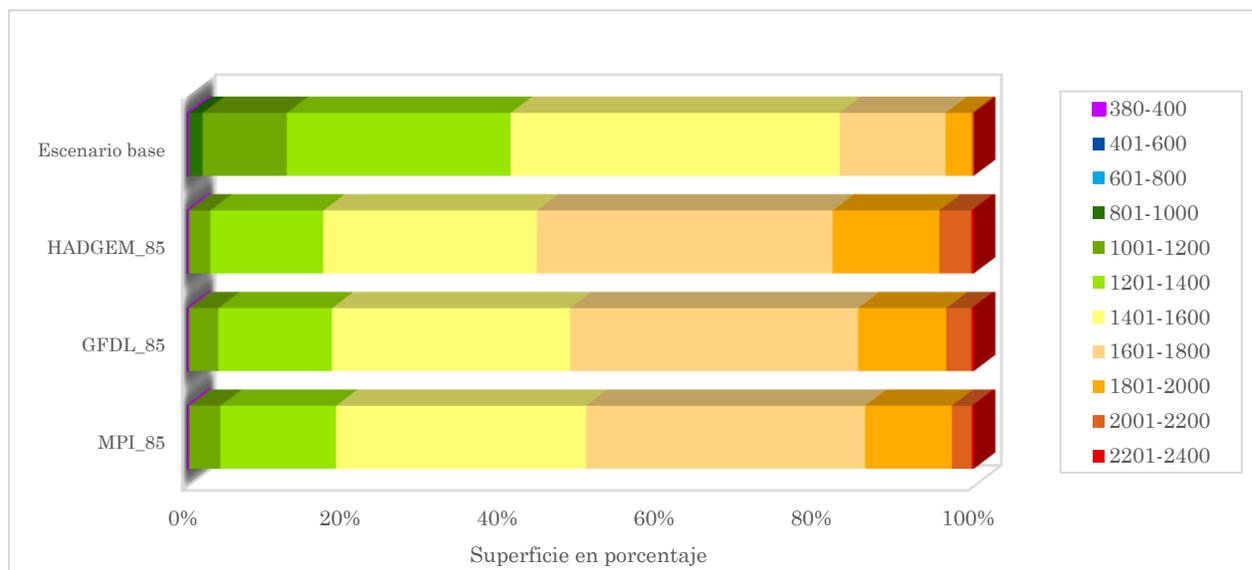


Figura 33. Porcentaje de la superficie por rangos de ETP (mm) en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m^{-2} en la República Mexicana.

El porcentaje de la superficie por rangos de ETP en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m^{-2} , se presenta en la Figura 33, en donde se observa que el modelo que tuvo mayores cambios en superficie fue HADGEM, seguido de GFDL y por último el modelo MPI. Nuevamente se observa que las planicies costeras del norte del estado de Sinaloa aumentarán la ETP de 2001-2200 a 2201-2400 (Fig. 34); el rango de 2001-2200 se distribuirá en el sur de Sonora y el Delta del Río Colorado, ocupando algunas regiones de la parte norte de la Sierra Madre Oriental con el modelo HADGEM; la Llanura Costera del Pacífico en la parte Sonorense, el Norte de la Sierra Madre oriental y la Llanura Costera del Golfo Sur pasarán a tener un rango de 1801-2000 en todos los modelos; gran parte de la Península de Baja California, Sierras y Llanuras del Norte, Llanura Costera del Pacífico, el norte de la Llanura Costera del Golfo Norte y la Península de Yucatán, pasarán de tener un rango de 1401-1600 a 1601-1800 en todos los modelos utilizados siendo más drástico el modelo HADGEM; el rango de 1401-1600 se concentrará principalmente en la Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental disminuyendo drásticamente el rango de 1201-1400 que solo se localizará en las partes altas de la Sierra Madre Occidental y del Eje Neovolcánico. Los rangos con menor ETP tenderán a desaparecer.

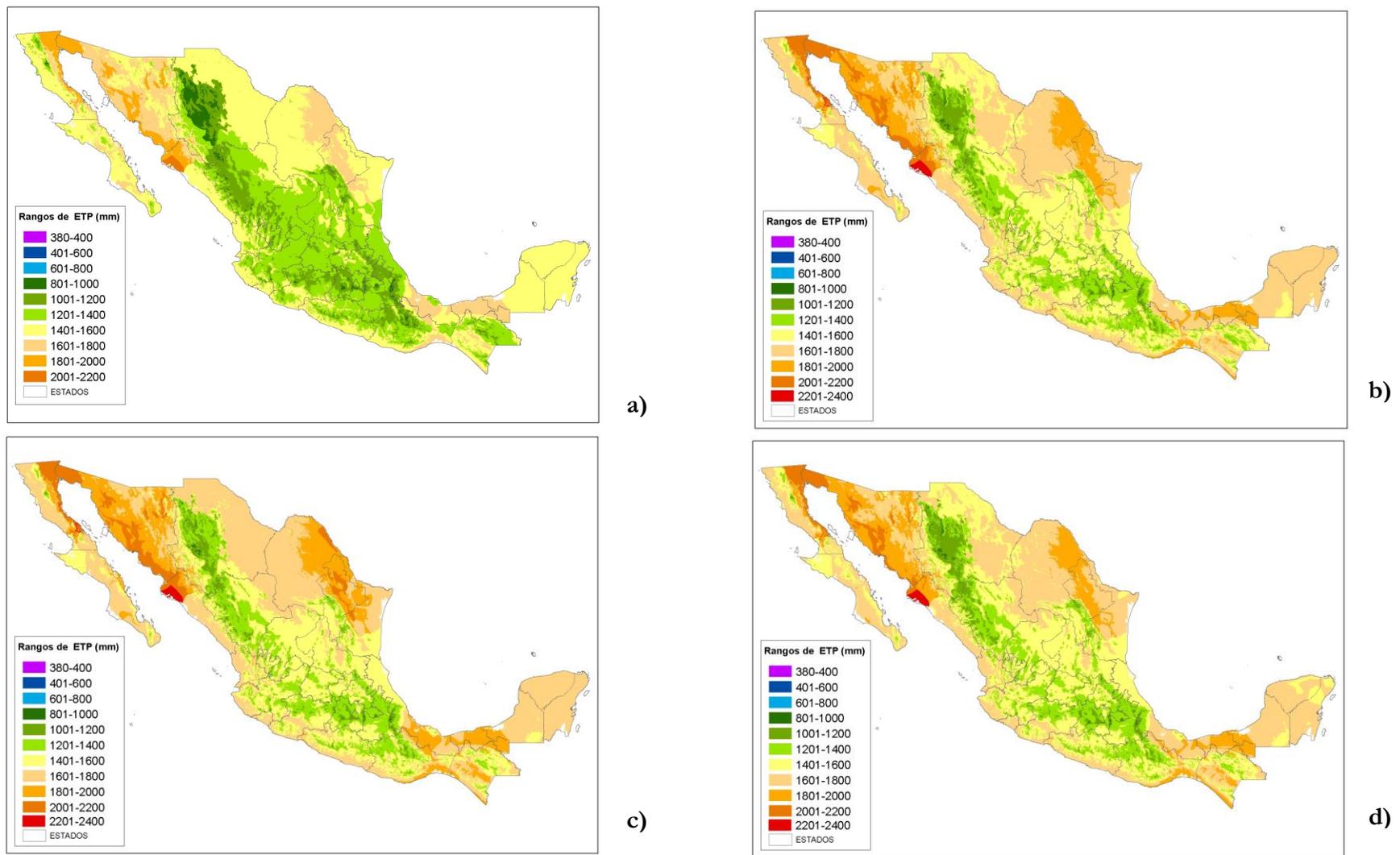


Figura 34. Distribución de los rangos de ETP (mm) en la República Mexicana para el RCP 8.5 Watts m^{-2} con: **a)** el escenario base; **b)** modelo GFDL; **c)** modelo HADGEM; **d)** modelo MPI.

7.3.2.3 *Comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y RCP 8.5 de la evapotranspiración potencial*

En la Figura 35 se hace una comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y RCP 8.5 de la Evapotranspiración potencial, en donde se observa que de manera general el RCP más drástico en todos los modelos fue el 8.5 en donde el modelo HADGEM fue el que obtuvo el mayor cambio en superficie en comparación con el escenario base; los cambios obtenidos con el modelo GFDL fueron inferiores a los obtenidos con HADGEM pero superiores a los registrados con el modelo MPI que fue el modelo que presentó un menor cambio. Para el caso del RCP 4.5 se observa que el modelo que tuvo un mayor impacto potencial fue el GFDL, seguido de HADGEM y por último MPI. En los tres modelos evaluados tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 los rangos que van de 380-400, 401-600, 601-800 prácticamente desaparecen; mientras que los rangos de 801-1000, 1001-1200, 1201-1400, 1401-1600 disminuyen considerablemente, los rangos de 1601-1800, 1801-2000, 2001-2200 mm incrementan notoriamente. En todos los casos se observa la aparición de un nuevo rango que va de 2201-2400 mm.

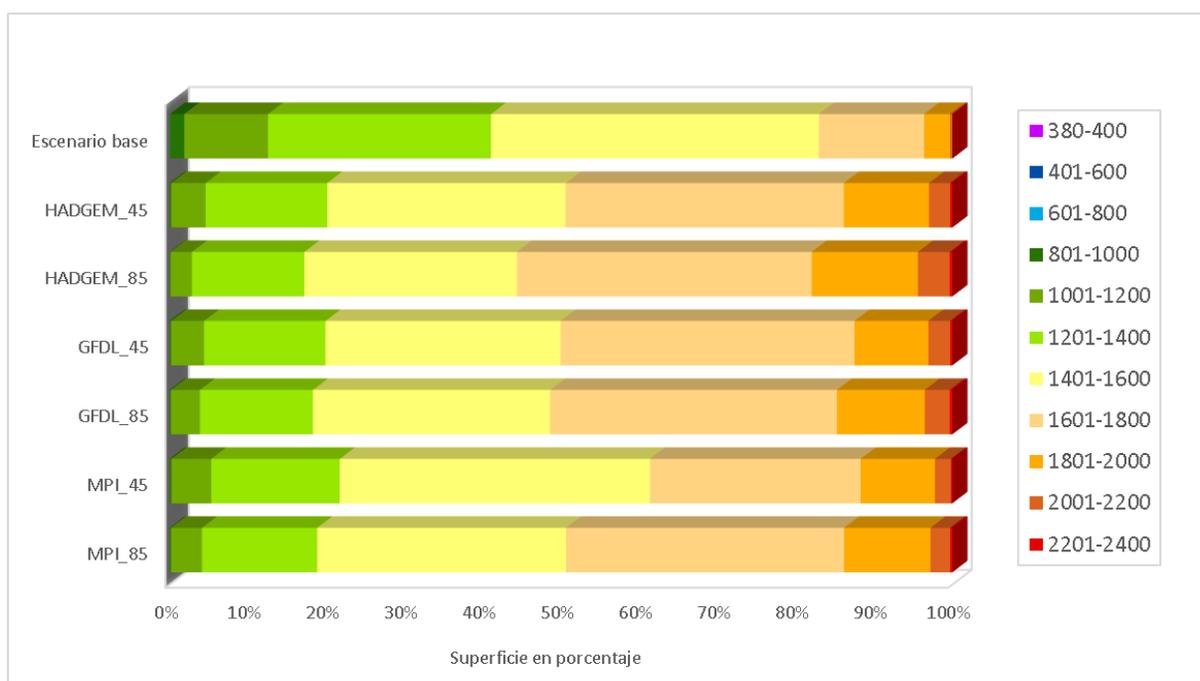


Figura 35. Comparación de la superficie en porcentaje de los Rangos de ETP (mm) bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C.

7.4 Índice de aridez

7.4.1 Índice de aridez bajo condiciones actuales

En el Cuadro 19 se presenta la superficie y porcentaje del Índice de Aridez, en donde se muestra que el 64.88% de la superficie nacional cuanta con Tierras Secas y el 35.12% presenta Tierras no secas; dentro de la categoría de Tierras Secas se tiene que el índice de aridez con menor superficie es el Hiper-árido (0.69%) ubicándose en las zonas del Delta del río Colorado (Fig. 36). El índice Árido representa el 19% de la superficie nacional localizándose mayormente en la Península de Baja California y las Sierras y Llanuras del Norte y en una parte de la Llanura Costera del Pacífico en la porción de Sonora y norte de Sinaloa; la condición Semiárida es la que presenta la mayor superficie del país con el 34% de la superficie, que se distribuye principalmente en la Mesa del Centro, Llanura Costera del Golfo Norte, Grandes Llanuras de Norteamérica, parte de la Llanura Sonorense y Llanura costera del Pacífico. El índice subhúmedo seco representa el 11.17% de la superficie nacional, se localiza en la Sierra Madre Occidental y en la parte norte de la Sierra madre del Sur, así como en una porción de la Sierra de Chiapas.

En cuanto a las Tierras no secas se tiene que índice Subhúmedo húmedo ocupa el 10.01% del territorio nacional ubicándose en el centro-oeste de la Península de Yucatán, en el sur de la Llanura Costera del Golfo Norte, y en algunas regiones de la Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur. El índice húmedo ocupa el 18% del territorio nacional, ubicado en una parte de la Península de Yucatán, la Llanura costera del Golfo Sur, en la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico. La condición Muy húmeda (6.07%) se concentra principalmente en la Llanura Costera del Golfo Sur, y en el suroeste de la Sierra Madre Oriental. En algunas regiones de la Llanura Costera del Golfo Sur y la Cordillera Centroamericana se presenta la condición Per-húmeda ocupando tan solo el 0.98% del territorio nacional.

Cuadro 19. Superficie (miles de ha) y porcentaje del Índice de Aridez en la República Mexicana bajo las condiciones actuales.

Índice de aridez	Superficie (miles de hectáreas)	Porcentaje de la superficie
Hiper-árido	1,353.5	0.69
Árido	37,351.6	19.01
Semiárido	66,799.0	34.01
Subhúmedo seco	21,940.1	11.17
Tierras secas	127,444.2	64.88
Subhúmedo húmedo	19,671.5	10.01
Húmedo	35,462.2	18.05
Muy húmedo	11,932.7	6.07
Per-húmedo	1,926.9	0.98
Tierras no secas	68,993.3	35.12
Total general	196,437.50	100.00

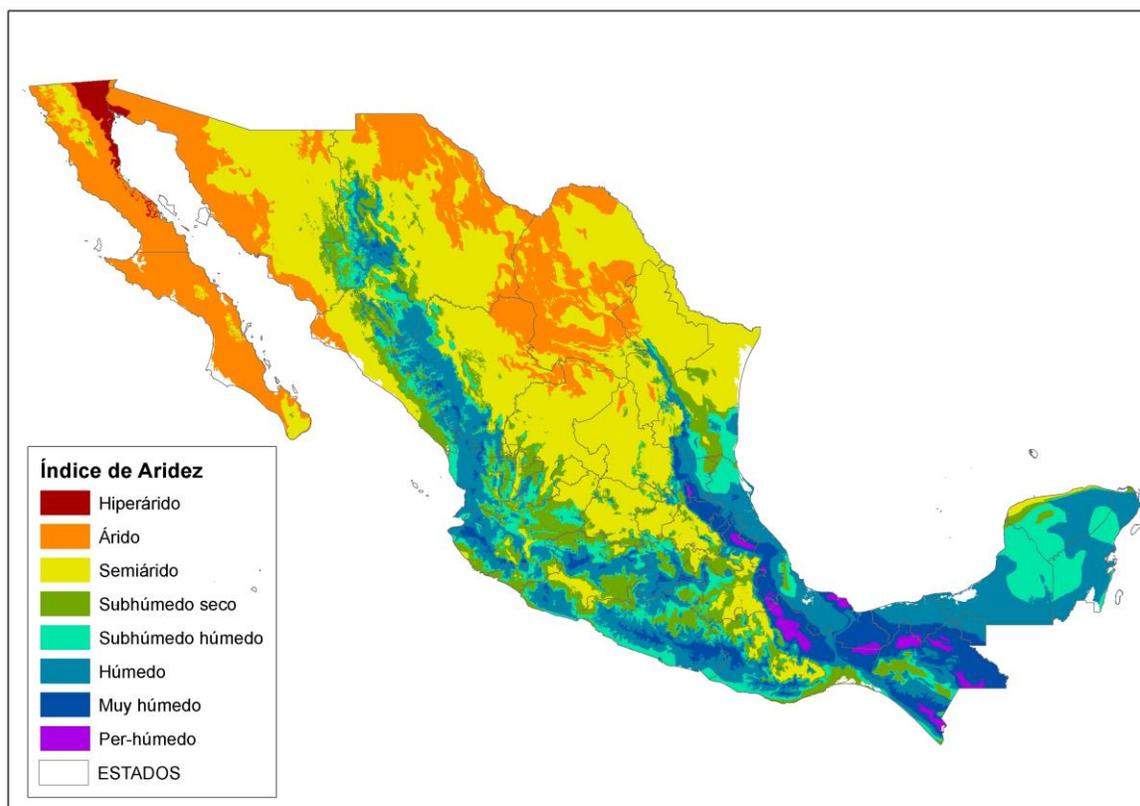


Figura 36. Distribución gráfica del Índice de Aridez de la República Mexicana bajo condiciones actuales.

7.4.2 Índice de aridez al considerar un Incremento en la temperatura media global de 1.5°C

7.4.2.1 *Índice de Aridez con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 4.5 Watts m-2*

En el Cuadro 20 se muestran los resultados obtenidos del Índice de Aridez al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5°C con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² comparados con el escenario base, en donde se observa que las Tierras Secas aumentarán en los tres modelos a una razón de cambio de +3.45% a +8.19%, alcanzando el 73.07% de la superficie nacional con el modelo HADGEM. El índice de aridez Híper-árido presenta resultados mixtos ya que aumentará en los modelos MPI y HADGEM, a una razón de cambio de +1.81% y +1.46% respectivamente, sin embargo, disminuye considerablemente con el modelo GFDL (-0.69%); el índice Árido aumentará en todos los modelos a una razón de cambio de +9.42% a +11.24% de la superficie del país, obteniendo el 30.25% del territorio nacional utilizando el modelo HADGEM. La condición Semiárida disminuirá en los tres modelos (-5.75% a -6.46%) llegando a tener el mayor decremento en superficie con el modelo GFDL; en cuanto al índice Subhúmedo Seco éste tendrá un aumento ligero en todos los modelos teniendo una razón de cambio que va de +0.64% a +1.91% de la superficie, siendo más drástico el modelo MPI. Todo lo contrario ocurre con los índices de Tierras no secas (Subhúmedo húmedo, húmedo, muy húmedo y per-húmedo) ya que todos tienden a disminuir en los tres modelos evaluados; para el índice Subhúmedo Húmedo éste disminuye a una razón de cambio de -0.30% a -2.61%, presentando una mayor disminución con el modelo GFDL; la condición Húmeda decrece a una razón de cambio que va de -4.42% a -5.14% teniendo una mayor disminución con el modelo HADGEM pero aumenta +0.19% con el modelo GFDL; el índice Muy húmedo disminuirá en -0.79% a -1.47%, obteniendo los resultados más drásticos con el mismo modelo mencionado anteriormente; mientras que el índice Per-húmedo tan solo representará el 0.59% de la superficie nacional con dicho modelo, disminuyendo en -0.24% a -0.39%.

Cuadro 20. Índice de Aridez en la República Mexicana al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5°C con el escenario base y los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻².

Índice de Aridez	Superficie (miles de hectáreas)			
	Porcentaje de la superficie			
	Escenario base	GFDL	HADGEM	MPI
Híper-árido	1,353.5	0.07	4,212.72	4,912.99
	0.69	0.00	2.14	2.50
Árido	37,351.6	56,914.17	59,421.86	55,857.78
	19.01	28.97	30.25	28.44
Semiárido	66,799.0	54,102.96	55,510.19	54,470.25
	34.01	27.54	28.26	27.73
Subhúmedo seco	21,940.1	23,200.16	24,390.73	25,685.10
	11.17	11.81	12.42	13.08
Tierras secas	127,444.2	134,217.36	143,535.50	140,926.11
	64.88	68.33	73.07	71.74
Subhúmedo húmedo	19,671.5	14,554.06	15,933.57	19,077.05
	10.01	7.41	8.11	9.71
Húmedo	35,462.2	35,830.34	26,773.61	25,373.28
	18.05	18.24	13.63	12.92
Muy húmedo	11,932.7	10,372.47	9,038.66	9,739.85
	6.07	5.28	4.60	4.96
Per-húmedo	1,926.9	1,463.27	1,156.16	1,321.20
	0.98	0.74	0.59	0.67
Tierras no secas	68,993.27	62,220.14	52,902.00	55,511.39
	35.12	31.67	26.93	28.26
Total general	196,437.50	196,437.50	196,437.50	196,437.50
	100.00	100.00	100.00	100.00

En la Figura 37 se muestra el porcentaje de la superficie del Índice de Aridez en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻², en este caso HADGEM fue el modelo que presentó mayores cambios en superficie en la mayoría de los índices. El índice Híper-árido aumenta considerablemente en este modelo al igual que con el modelo MPI, el modelo GFDL mostró una disminución considerable. El índice Árido aumentó en los tres modelos, siendo el modelo HADGEM el que obtuvo mayor superficie; esta misma situación ocurre con el índice Semiárido y el Subhúmedo Seco. En cuanto al índice Subhúmedo Húmedo se presenta una disminución considerable sobre todo con el modelo HADGEM al igual que el índice Muy húmedo y Perhúmedo. En la Figura 38 se presenta la distribución gráfica de los índices de aridez con los tres modelos utilizados, en comparación con el escenario base, en donde se aprecia que el índice Híper-árido se distribuye hasta la Península de Baja California con el modelo MPI, pero disminuye considerablemente en el modelo GFDL; el índice Árido incrementa en todos los modelos, principalmente en las Sierras y Llanuras del Norte a partir de las zona Semiáridas en esa zona; el índice Subhúmedo seco aumenta notoriamente en la Península de Yucatán con los modelos HADGEM y MPI, al igual que el Subhúmedo húmedo, provocando un decremento en la superficie del índice húmedo; los índices Muy húmedos y Per-húmedos presentan una ligera disminución principalmente en la Llanura Costera del Golfo Sur.

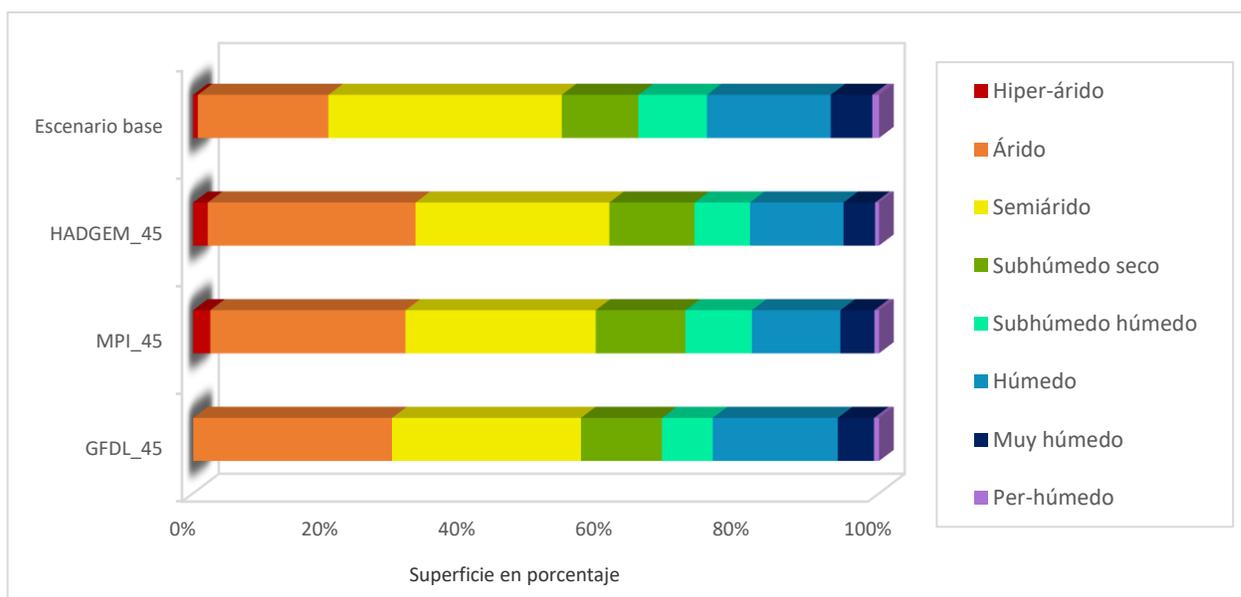
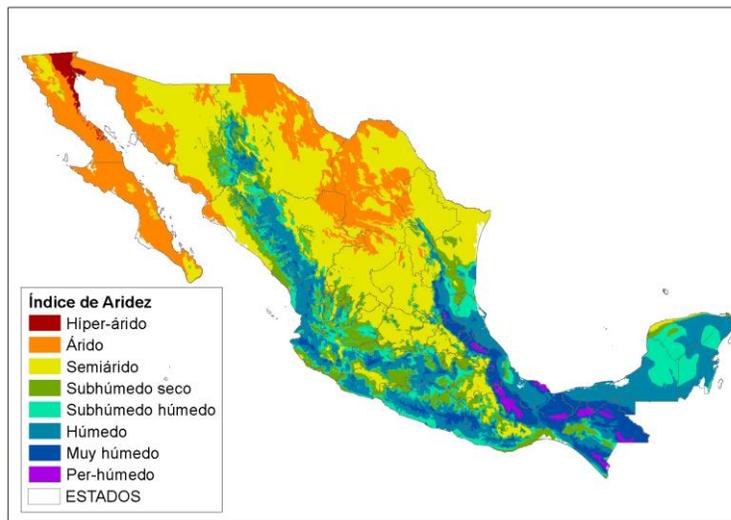
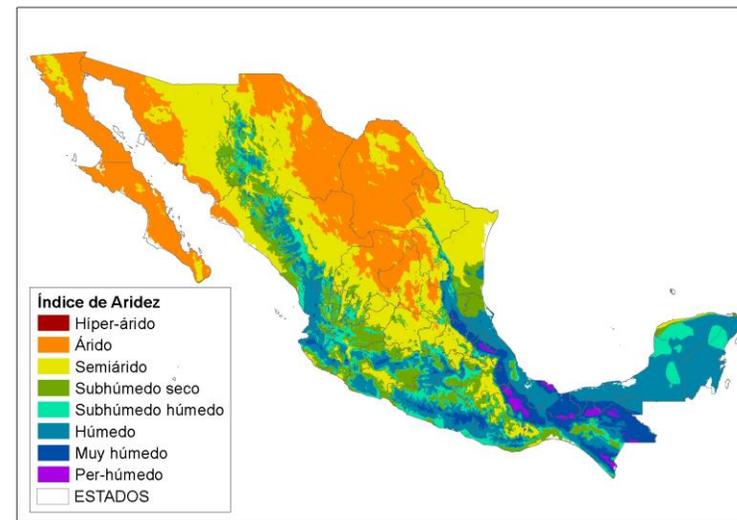


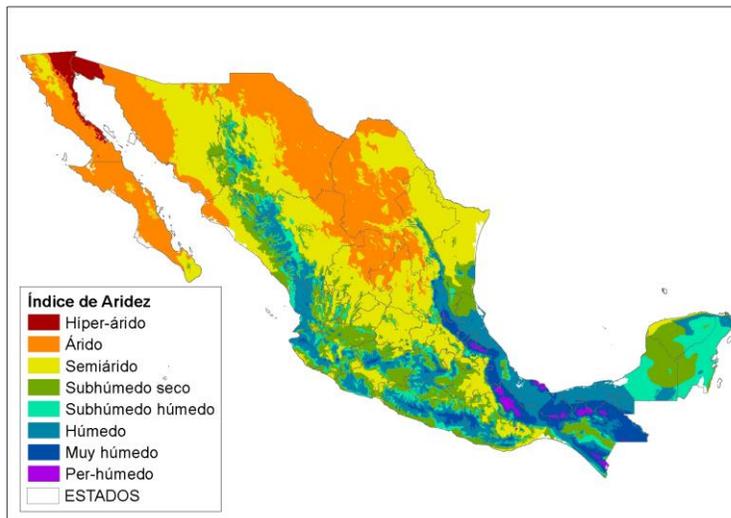
Figura 37. Porcentaje de la superficie del índice de aridez en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² en la República Mexicana



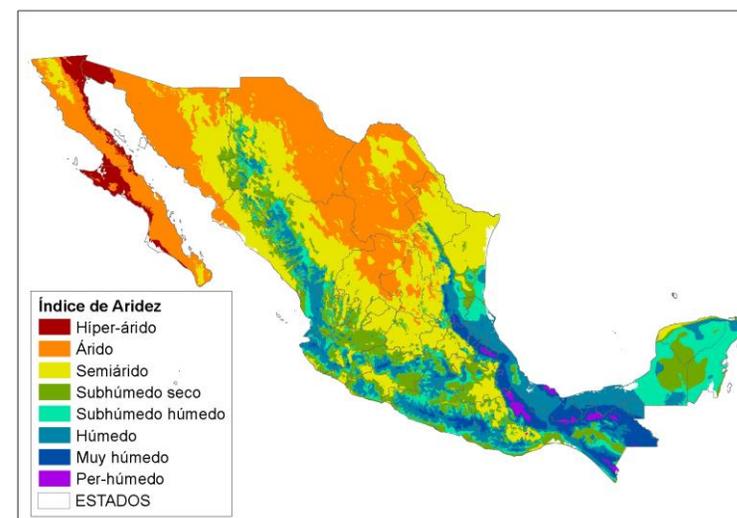
a)



b)



c)



d)

Figura 38. Distribución de los Índices de Aridez en la República Mexicana para el RCP 4.5 Watts m^{-2} con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI

7.4.2.2 *Índice de Aridez con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 8.5 Watts m-2*

Los resultados obtenidos del Índice de Aridez con un incremento en la temperatura media global de 1.5°C utilizando los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻² se muestran en el Cuadro 21, bajo esta condición la categoría de Tierras Secas aumenta en los tres modelos en +3.42% a +10.21% del porcentaje de la superficie del país, teniendo un mayor incremento con el modelo HADGEM alcanzando el 75.09% del territorio nacional; dentro de esta categoría se tiene que el índice Híper-árido aumenta en los tres modelos, registrando la mayor superficie con el modelo HADGEM (+0.55% a +1.59%); el índice Árido presenta el mismo comportamiento aumentando en +6.53% a +12.33% de la superficie nacional obteniendo un mayor incremento con el modelo HADGEM; el índice Semiárido disminuye ligeramente en los tres modelos (-1.72% a -7.15%), siendo más notorio con el modelo GFDL. El índice subhúmedo seco aumenta ligeramente en todos los modelos (+0.43% a +2.45%) alcanzando una mayor superficie utilizando el modelo HADGEM. En cuanto a la categoría de Tierras no secas se tiene que disminuye al igual que con el RCP 4.5 Watts m⁻² en -3.42% a -10.21%, obteniendo una mayor disminución con el modelo HADGEM representando tan solo el 24.91% del territorio nacional. Dentro de esta categoría se observa que el índice Subhúmedo húmedo tendrá un decremento en la superficie en todos los modelos (-0.79% a -2.43%) representando tan solo el 7.58% de la superficie nacional con el modelo GFDL. El índice Húmedo presenta resultados mixtos ya que aumenta ligeramente con el modelo GFDL, pero disminuye considerablemente con los modelos HADGEM y MPI (+0.04% a -6.75%); los índices Muy húmedo y Per-húmedo presentan decrementos en la superficie teniendo una mayor disminución con el modelo HADGEM con cambio que van de -0.77% a -1.55% y -0.26% a -0.44% respectivamente.

Cuadro 21. Superficie (miles de ha) y porcentaje del Índice de Aridez en la República Mexicana al considerar un incremento en la temperatura media global de 1.5°C con el escenario base y los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m⁻².

Índice de Aridez	Superficie (miles de hectáreas)			
	Porcentaje de la superficie			
	Escenario base	GFDL	HADGEM	MPI
Híper-árido	1,353.5	2,426.47	4,467.96	2,351.03
	0.69	1.24	2.27	1.20
Árido	37,351.6	56,185.63	61,580.34	50,171.91
	19.01	28.60	31.35	25.54
Semiárido	66,799.0	52,760.47	54,696.57	63,427.64
	34.01	26.86	27.84	32.29
Subhúmedo seco	21,940.1	22,790.44	26,761.18	23,739.45
	11.17	11.60	13.62	12.08
Tierras secas	127,444.2	134,163.0	147,506.0	139,690.0
	64.88	68.30	75.09	71.11
Subhúmedo húmedo	19,671.5	14,893.35	16,785.72	18,124.75
	10.01	7.58	8.55	9.23
Húmedo	35,462.2	35,544.45	22,206.56	28,057.07
	18.05	18.09	11.30	14.28
Muy húmedo	11,932.7	10,418.46	8,880.34	9,394.22
	6.07	5.30	4.52	4.78
Per-húmedo	1,926.9	1,418.23	1,058.83	1,171.42
	0.98	0.72	0.54	0.60
Tierras no secas	68,993.27	62,274.49	48,931.4	56,747.4
	35.12	31.70	24.91	28.89
Total general	196,437.50	196,437.50	196,437.50	196,437.50
	100.00	100.00	100.00	100.00

De manera general se puede decir que el modelo que tuvo mayor impacto potencial en el incremento de la superficie de las zonas más secas con un incremento de la temperatura media global de 1.5°C para el RCP 8.5 Watts m⁻² es HADGEM, cabe mencionar que el comportamiento de los tres modelos fue similar (Fig. 39), nuevamente se observa que el índice Híper-árido y Árido aumentan considerablemente en los tres modelos, pero con mayor

intensidad en el modelo HADGEM. El índice Semiárido disminuye notoriamente en los tres modelos teniendo un mayor impacto potencial con el mismo modelo, el índice Subhúmedo seco aumenta ligeramente principalmente con el modelo HADGEM. Todo lo contrario, ocurre con el índice Subhúmedo Húmedo que disminuye en los tres modelos. En cuanto al índice Húmedo disminuye notoriamente sobre todo con el modelo HADGEM, pero aumenta ligeramente con el modelo GFDL. En cuanto a los índices Muy Húmedo y Per-húmedo estos disminuyen en los tres modelos con un mayor cambio en el modelo HADGEM.

La distribución gráfica de los Índice de Aridez con los tres modelos evaluados se presenta en la Figura 40, donde se observa que el índice Híper-árido se extiende en la Península de Baja California en los tres modelos y ocupa una parte importante del territorio del estado de Coahuila con el modelo HADGEM; el índice Árido incrementa la superficie en todos los modelos principalmente en las Llanuras y Sierras del Norte lo que generó una disminución en el índice Semiárido; el índice Subhúmedo Seco se incrementa en la Península de Yucatán con el modelo HADGEM y en el Eje Neovolcánico y en la parte sur de la Llanura Costera del Golfo Norte con los demás modelos generando que disminuya la superficie del índice Subhúmedo húmedo; la condición Húmeda decrece principalmente en las partes altas de la Sierra Madre Occidental en los tres modelos; en cuanto a los índices Muy húmedo y Per-húmedo estos disminuyen de manera poco significativa en la Llanura Costera del Golfo Sur.

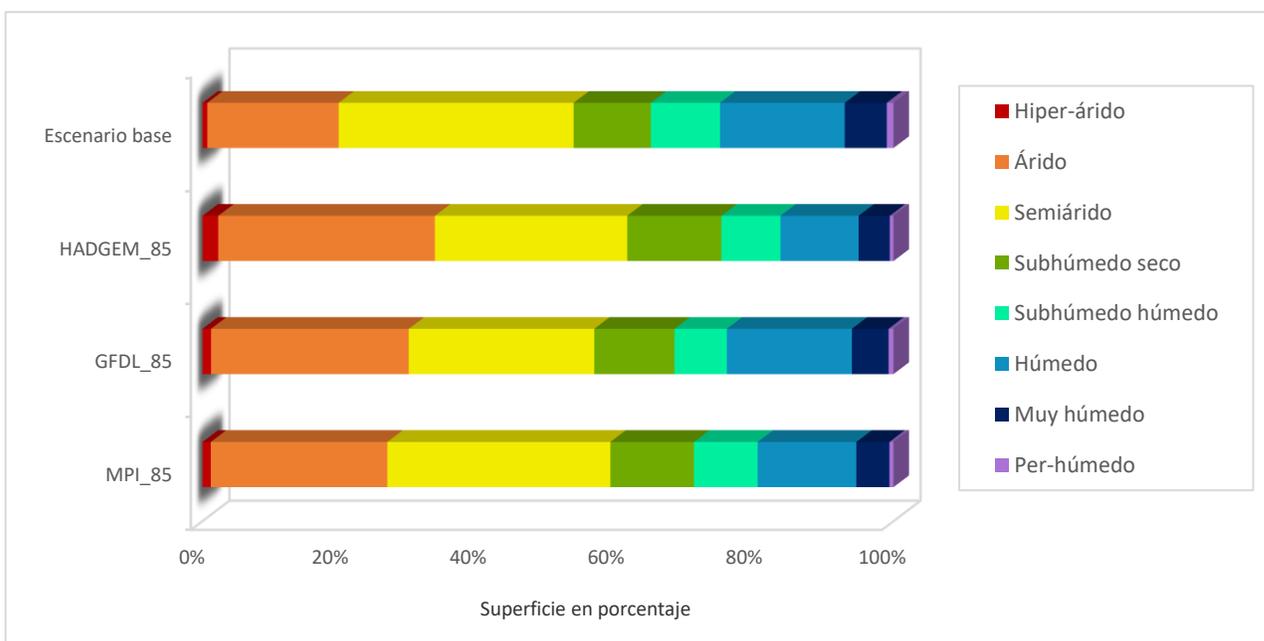


Figura 39. Porcentaje de la superficie del índice de aridez en el escenario base y con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 8.5 Watts m² en la República Mexicana

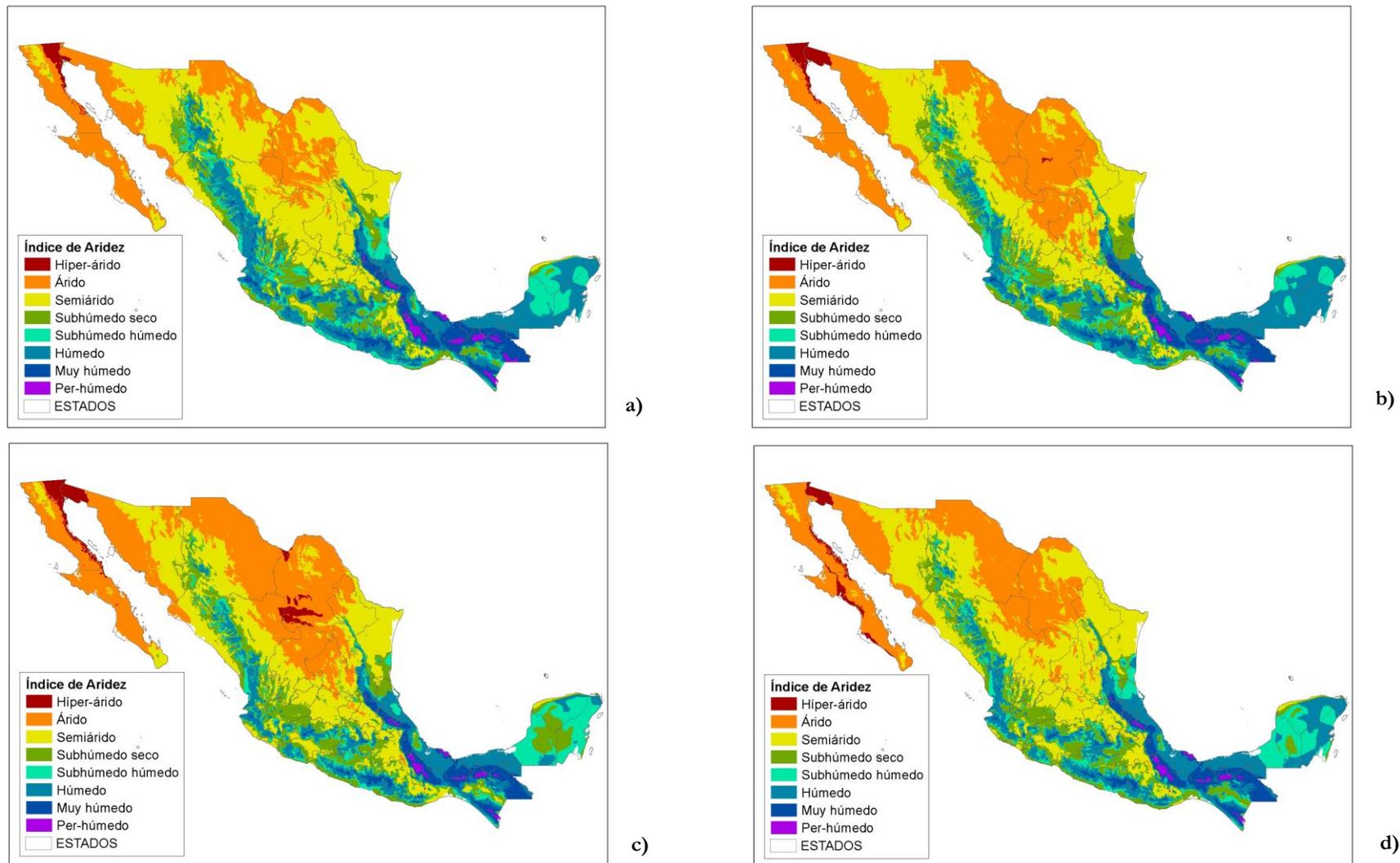


Figura 40. Distribución de los Índices de Aridez en la República Mexicana para el RCP 8.5 Watts m^{-2} con: a) el escenario base; b) modelo GFDL; c) modelo HADGEM; d) modelo MPI.

7.4.2.3 *Comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y RCP 8.5 del índice de aridez*

En la Figura 41 se muestra la comparación de los resultados obtenidos en el RCP 4.5 y RCP 8.5 del índice de aridez. En este caso se observa que el modelo más drástico fue HADGEM con el RCP 8.5 pues mostró un incremento de 64.88% de la superficie nacional a 75.09% en las tierras secas y una disminución de tierras no secas de 35.12% a 24.91%, mientras que con el RCP 4.5 utilizando el mismo modelo se registra una superficie de tierras secas de 73.07% y de tierras no secas de 28.93%; el modelo MPI arrojó un aumento de la superficie de las tierras secas de 71.74% y de tierras no secas de 28.26% con el RCP 4.5 siendo más drástico que con el RCP 8.5 en donde se obtuvo un incremento de las tierras secas de 71.11% y un decremento de las tierras no secas alcanzando el 28.89% de la superficie. En este caso el modelo que mostro menores cambios en superficie fue GFDL tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 obteniendo una superficie de 68.33% de tierras secas y 31.67% de tierras no secas con el RCP 4.5 y de 68.30% de tierras secas y 31.70% de tierras no secas con el RCP 8.5.

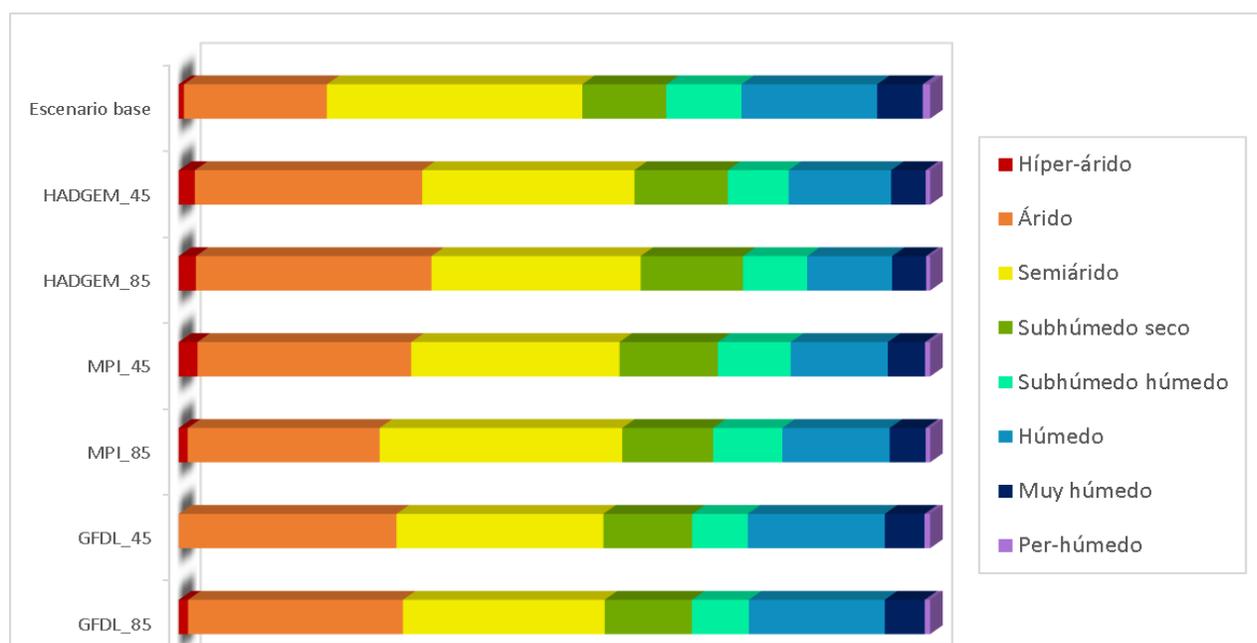


Figura 41. Comparación de la superficie en porcentaje de los Rangos de ETP (mm) bajo el escenario actual con los modelos GFDL, HADGEM y MPI para el RCP 4.5 Watts m⁻² y RCP 8.5 Watts m⁻² bajo el incremento de la temperatura media global de 1.5°C.

8. Análisis de resultados

8.1 Régimen de humedad del suelo

Como se pudo apreciar en los resultados, los cambios en la temperatura media global a 1.5°C afectaran directamente en la humedad del suelo, debido a que los cambios en la humedad del suelo dependen fundamentalmente de la variación del volumen y de las fechas no sólo de la precipitación sino también de la evaporación (Bates *et al.*, 2008), al haber un aumento en la evaporación sobre todo en la parte norte del país habrá un incremento en la superficie del sub-régimen Arídico Típico; esto podría afectar directamente en el rendimiento y potencial de los cultivos, ya que una prolongada deficiencia de humedad del suelo puede retardar el crecimiento de las plantas, por lo que es indispensable mejorar el abastecimiento de agua en esta región para impedir que los cultivos estén sometidos a largos periodos de estrés hídrico. Una estrategia de adaptación sería realizar cambios en las variedades de los cultivos, mejorar el sistema de riego para que sea más eficiente, y analizar posibles cambios en la siembra (Komuscu,1998), así como mejorar las condiciones físicas del suelo para que se incremente su capacidad de retención de humedad, todo esto para limitar los efectos adversos del cambio climático bajo un incremento en la temperatura a 1.5 °C. También se presenta una disminución considerable en la superficie del régimen Arídico Extremo cambiando principalmente al régimen Arídico Típico, esto significa que en ciertas regiones del país se podría volver ligeramente más húmedo. Los regímenes Xérico Seco y Arídico Débil disminuyen ligeramente en los diferentes escenarios, por lo que los ecosistemas como Matorrales Desérticos, Matorrales Espinosos, Mezquiales y Pastizales podrían disminuir o aumentar ligeramente su superficie. El rango de cambio de la dicha superficie es de -2.67% a +5.36% de la superficie nacional.

El régimen de humedad Xérico Típico, relacionado principalmente a Chaparrales y Bosque de Pino, tiene resultados mixtos por lo que estos ecosistemas podrían mantenerse sin cambios en superficie. El Tropústico Arídico disminuyó considerablemente su superficie mientras que el Tropústico Típico aumentó su superficie, por lo que los ecosistemas como la Selva Baja Caducifolia, Selva Mediana Subcaducifolia, Selva Mediana Caducifolia, Matorral Desértico Rosetófilo o Pastizales podrían mantener su superficie. En cuanto a los regímenes de humedad Tempúdico Seco, Tempúdico Húmedo y Tempúdico Típico aumentarían ligeramente, lo que significa que algunos de los ecosistemas que actualmente son muy húmedos y fríos tenderán a pasar a esta categoría. Los regímenes de humedad Tropúdico Seco y Tropústico Údico tienen resultados mixtos lo que significa que la superficie de los ecosistemas tales como Bosque de Pino-Encino, Bosque de Encino, Bosque de Pino, Selva Mediana Perennifolia y Selva Mediana Sub-caducifolia tenderán a mantenerse. Los regímenes más húmedos como el Perúdico o el Údico Típico tienen disminuciones considerables en todos los escenarios, por lo tanto, todos los ecosistemas que requieran una gran cantidad de humedad pueden verse afectados, tales como el Bosque Mesófilo de Montaña, la Selva Alta Perennifolia, el Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino y Bosque de Encino.

8.2 Régimen de Temperatura del Suelo

El incremento de la temperatura media global a 1.5°C tendrá como consecuencia un aumento en la superficie de los regímenes de temperatura del suelo denominados como cálidos (Isohipertérmico, e Hipertérmico). Esto afectará directamente en los procesos físicos, biológicos y microbiológicos que ocurren en el suelo (Rustad *et al.*, 2001) ya que la temperatura del suelo controla procesos biogeoquímicos tales como la duración de la temporada de crecimiento, las tasas de mineralización de la materia orgánica del suelo y la asimilación de nutrientes por las plantas, así como la productividad forestal (Hai *et al.*, 2010; Euskirchen *et al.*, 2006; Oquist and Laudon, 2008).

Los regímenes de temperatura más fríos como el Pergélico, Cryico y Frígido disminuirán su superficie, lo que significa que los tipos de vegetación, así como los usos de suelo relacionados a estos regímenes, se verán afectados, principalmente la Pradera de alta montaña, los Bosques templados de Pino, Pino-Encino y Oyamel y los Chaparrales y Pastizales templados, ya que la temperatura del suelo, incluyendo las variaciones estacionales, pueden tener un impacto potencial significativo en el ecosistema regional, así mismo se ha determinado que los cambios de temperatura del suelo es probable que tengan el mayor impacto potencial en las regiones de latitudes altas (Kane *et al.*, 1991). Los regímenes de temperatura templados tales como el Mésico e Isomésico también tienden a disminuir en todos los modelos. Los tipos de ecosistemas que se encuentran relacionados con estos regímenes de temperatura son para el Mésico: Bosques de Pino, Pino-Encino, Encino y Pastizal Natural y para el Isomésico: Bosques de Pino, Pino-Encino, Encino y Oyamel además del Bosque Mesófilo de Montaña.

El aumento de los regímenes de temperatura en el suelo tras un incremento de la temperatura media global de 1.5°C se debe fundamentalmente a mecanismos de transferencia de calor como el flujo de calor sensible, flujo de calor latente (enfriamiento de la superficie por evaporación), y flujo de calor infrarrojo (enfriamiento por emisión y calentamiento por absorción) (Seinfeld, 2008). El balance energético de la superficie puede ser modificado aún más por la cobertura vegetal, la topografía y las propiedades del suelo (Kang *et al.*, 2000). A medida que aumenta la temperatura del suelo, los procesos ecológicos terrestres cambiarán gradualmente para reflejar las condiciones climáticas regionales (Yanying *et al.*, 2014).

8.3 Evapotranspiración Potencial

El aumento de la temperatura media global a 1.5 °C tendrá consecuencias negativas para los cultivos, ya que la evapotranspiración potencial aumentará en gran parte del territorio nacional, pues según los resultados obtenidos tanto en el RCP 4.5 como en el RCP 8.5 los rangos con menor ETP tienden a disminuir debido a que aumentan los rangos con mayor ETP; esto se debe fundamentalmente a que la demanda de agua por las condiciones atmosféricas aumenta con la temperatura y se aceleran los procesos de evaporación y de transpiración. Lo que tiene como consecuencia un aumento en el déficit de vapor de agua en la atmósfera, al igual que la

tasa de evaporación que está controlada por la precipitación y el forzamiento radiativo. Afectando directamente el balance hídrico y la humedad del suelo (Bates *et al.*, 2008). Así mismo, el aumento de los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) afectará directamente en la evapotranspiración de la vegetación ya que una mayor concentración de CO₂ puede reducir la transpiración, pues los estomas foliares no necesitan abrirse tanto para absorber la misma cantidad de CO₂ que necesitan para la fotosíntesis (Gedney *et al.*, 2006) sin embargo, también se puede dar un efecto inverso ya que las concentraciones de CO₂ pueden estimular el crecimiento de las plantas, dando lugar a una mayor superficie foliar y por consiguiente a un aumento de la transpiración. Las magnitudes relativas de estos dos efectos varían en función del tipo de planta y de la respuesta a otras influencias, como la disponibilidad de nutrientes o los efectos de los cambios de la temperatura y de la disponibilidad de agua (Bates *et al.*, 2008).

Por lo tanto, se espera que se acorte el ciclo fenológico de los cultivos lo que implicaría una reducción en el rendimiento potencial de los mismos, sobre todo en las regiones con mayores rangos de ETP (1601-2400) como las planicies costeras del Pacífico Norte correspondiente al norte del estado de Sinaloa, sur de Sonora y el Delta del Río Colorado, así como en la Llanura Costera del Golfo Sur, Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental. La reducción del ciclo fenológico puede ocasionar un mayor número de cortes, mayor tasa de crecimiento y un mayor consumo de agua por año agrícola (Allen *et al.*, 2006). Según Bustamante *et al.* (2011) una posible acción de adaptación ante el aumento de la evapotranspiración potencial debido al cambio climático sería restringir el periodo de siembra a los periodos fríos para que generen mayor duración del ciclo de cultivo, y usar variedades de ciclo largo, resistentes al estrés térmico e hídrico, y que soporten temperaturas mayores a las que se presentan actualmente.

8.4 Índice de Aridez

Analizando las proyecciones regionales de cambio climático con un aumento de 1.5 °C en la temperatura media global, se observa una disminución en la precipitación y un aumento en la evapotranspiración potencial, lo que conlleva a un incremento en los índices de aridez Hiperárido, Árido, y Subhúmedo Seco principalmente en la parte norte de México. Esto se debe fundamentalmente a la escasez de precipitación, tanto en cantidad como en intensidad y regularidad, alta radiación solar, lo que origina altas temperaturas y una evapotranspiración superior al volumen de agua disponible, así como una baja humedad atmosférica (Mercado *et al.*, 2010).

En base a los resultados obtenidos se tiene que para el modelo más drástico que fue HADGEM con el RCP 8.5 Watts m⁻², México tendría el 75.09% de tierras secas y tan solo el 24.91% de tierras no secas, lo que significa que el país es altamente vulnerable al deterioro ambiental y desertificación, ya que, de acuerdo al Programa Ambiental de Naciones Unidas, aquellas regiones donde la tasa anual de cociente PP/ETP es de 0.05 a 0.65, pueden considerarse vulnerables a la desertificación. Afectando directamente a la productividad de los

cultivos. Por lo tanto, es de suma importancia que se contemple un manejo adecuado de los recursos tanto hídrico como edáficos en condiciones Hiper-áridas, Áridas, Semiáridas y Subhúmedas secas, debido a que el manejo intensivo de la agricultura promueve la salinización del suelo y la intrusión salina en los acuíferos sobre todo en las zonas costeras del noroeste de México (Cardona *et al.*, 2004). En este sentido la determinación del índice de aridez bajo un incremento de la temperatura a 1.5 °C permitirá ampliar las herramientas en la lucha contra la sequía y desertificación, puesto a que la disminución del recurso hídrico y el cambio de uso del suelo, principalmente en zonas áridas y semiáridas, generan perturbación en la vegetación y en la supervivencia de los diferentes organismos que se interrelacionan en los hábitats predominantes, así mismo se ven afectados los procesos de producción primaria tanto agropecuarios como forestales, pues están determinados por las condiciones climáticas, que aunadas a otros factores, determinan la sostenibilidad de los procesos (Herrmann & Hutchinson, 2005).

9. Literatura Citada

- Allen, G. R., G. R., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO de Riego y Drenaje No. 56. FAO. Roma. 298 p.
- Asseng, S. et al. 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Clim. Change* 5, 143–147.
- Bai Y., T.A. Scott, Min, Q. 2014. Climate change implications of soil temperature in the Mojave Desert, USA. *Climate change implications of soil temperature* 8(2):302-308. doi. 10.1007/s11707-013-0398-3.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 págs.
- Berthelot M., Friedlingstein P., & Ciais P. 2002. Global response of the terrestrial biosphere to CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*. 16. 31(1):31-15.
- Brigido, J.G., Nikolskii, I., Terrazas, L., Herrera, S.S. 2015. Estimación del impacto del cambio climático sobre fertilidad del suelo y productividad de café en Veracruz, México. *Tecnol.cienc.agua*. 6(4): 101-116.
- Bustamante, O.W., Sifuentes, I.E., Iñiguez, C.M., Montero, M.M.J. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia*, 45: 1-11.
- Cardona A, Carrillo–Rivera JJ, Huizar–Alvarez, Graniel–Castro E. 2004. Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from San Domingo, Baja California Sur, México. *Environmental Geology* 45: 350–366.
- CONAFOR-UACH. 2013. Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe final. Zapopan, Jalisco: Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo.
- Conde, C, R Ferrer, and S Orozco. 2006. Climate change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures: a Mexican case study. *Atmosfera* 19, no. 3: 181-194.
- Conde, C. 2008. Adaptación al cambio climático en el sector agrícola. PowerPoint presentation at the Taller de Evaluación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Iberoamérica, Cartagena de Indias, Colombia. 10 June.
- Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. CNUCLD. 1994. (www.unccd.int).
- Delgado, G., Gay, C., Imaz M. y Martínez, M.A. 2010. México frente al cambio climático. Retos y oportunidades. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Eakin, Hallie. 2000. Smallholder maize production and climatic risk: a case study from Mexico." *Climatic Change* 45: 19-36.
- Euskirchen E, McGuire AD, Kicklighter DW, Zhuang Q, Clein JS, et al. 2006. Importance of recent shifts in soil thermal dynamics on growing season length, productivity, and carbon sequestration in terrestrial high latitude ecosystems. *Global Change Biology* 12: 731–750.
- FAO. 1978. Report on the agroecological Zones Project. Methodology and Results for Africa. World Soil. Resources Report 40. FAO. Rome, Italy. 127pp.
- Fischer, E. M. & Knutti, R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Clim. Change* 5, 560–564.
- Gedney, N., P.M. Cox, R.A. Betts, O. Boucher, C. Huntingford and P.A. Stott, 2006: Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 439(7078), 835–838.
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J., & Martínez, M. 2008. Spatial estimation of mean temperature and precipitation in areas of scarce meteorological information. *Atmosfera*, 21(1): 35–56.
- Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A. 2012. Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y sub-húmedas secas de México a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación Fondo SEMARNAT-CONACYT. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Gómez-Díaz, J., & Monterroso-Rivas, A. 2003. Caracterización del Índice de Aridez en México usando dos alternativas de estimación de la Evapotranspiración Potencial y escenarios de Cambio Climático.
- Haei M, Öquist MG, Buffam I, Ågren A, Blomkvist P, et al. 2010. Cold winter soils enhance dissolved organic carbon concentrations in soil and stream water. *Geophysical Research Letters* 37.
- Herrmann, S.M. & Hutchinson, C.F. 2005. The changing contexts of the desertification debate. *Journal of Arid Environments* 63: 538–555.
- INECC-UACH. 2016. Insumos para el Atlas Nacional al Cambio Climático: Evaluación integrada de la sensibilidad al cambio climático sobre los suelos y el potencial productivo agrícola; e identificación de indicadores que integran la perspectiva de género. Chapingo, México.
- Instituto Nacional de Ecología. 2010. Coordinación del Programa de Cambio Climático. <http://www2.ine.gob.mx/cclimatico>.
- Jungqvist G, Oni SK, Teutschbein C, Futter MN (2014) Effect of Climate Change on Soil Temperature in Swedish Boreal Forests. *PLoS ONE* 9(4): e93957. doi:10.1371/journal.pone.0093957.

- Kane D.L., Hinzman L.D. y Zarling J.P. 1991. Thermal response of the active layer to climatic warming in a Permafrost Environment. *Cold Regions Sci. Technol.* 19:111-122.
- Kang S, Kim S, Oh S, Lee D. 2000. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *For Ecol Manage*, 136(1-3): 173-184
- Komuscu, A. U. 1998. Implications of Climate Change for Soil Moisture Availability in Turkey's Southeastern Anatolia Project Region. *Drought Network News*, 10 (2): 9-13.
- López-Feldman, A. 2013. Climate change, agriculture, and poverty: A household level analysis for rural Mexico. *Economics Bulletin*, 33(2):1126-1139.
- Melillo M., McGuire A., Kicklighter D., Moore B., Vorosmarty J., & Schloss A. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*. 363:234-240.
- Mercado, M. G., D.E., Troyo, G.A., Aguirre, A.B., Murillo, M. L.F., Beltrán, H.J.L, García. 2010. Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas.
- Monterroso A.I. y J.D. Gómez. 2003. Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el cambio climático. Comisión Nacional de las Zonas Áridas- Universidad Autónoma Chapingo. 170 pp.
- Oquist M, Laudon H. 2008. Winter soil frost conditions in boreal forests control growing season soil CO₂ concentration and its atmospheric exchange. *Global Change Biology* 14: 2839-2847.
- PNUD-INECC. 2015. Evaluación de impactos del cambio climático sobre los suelos de México. Análisis de la degradación de suelos por erosión hídrica, erosión eólica, degradación física y degradación química de suelos. México, D.F.
- PNUD-INECC. 2016. Evaluación del potencial productivo de los suelos de México que considere cambio climático. Plataforma de colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México. México, D.F.
- Rounsevell M.D.A., Evans S.P. and Bullock P. 1999. Climate Change and Agricultural soils: Impacts and adaptation. *Climatic Change*. 43:683-709.
- Ruiz, C.J.A., Medina, G.G., Ramírez, D.J.L., Flores, L.H.E., Ramírez, O.G., Manríquez, O.J.D., Zarazúa, V.P., González, E.D.R., Díaz, P.G., Mora, O.C.M. 2011. Cambio climático y sus implicaciones en cinco zonas productoras de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2: 309-323.
- Rustad L, Campbell J, Marion G, Norby R, Mitchell M, et al. (2001) A metaanalysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. *Oecologia* 126: 543-562.

- Schleussner, C.-F. et al. 2016. Differential climate impacts for policy relevant limits to global warming: the case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth Syst. Dynam.* 7, 327–351.
- Schleussner, C.-F. et al. 2016. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature climate Change*. DOI: 10.1038.
- Sedláček, J. & Knutti, R. 2014. Half of the world's population experience robust changes in the water cycle for a 2 °C warmer world. *Environ. Res. Lett.* 9, 044008.
- Seinfeld J (2008). Climate change. *Reviews in Chemical Engineering*, 24(1): 1–65.
- SEMANAT-CP. 2002. Evaluación de la Degradación de Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agricultural Handbook No. 436. Soil Conservation Service, USDA, Washington. D.C.
- Sys C., E. Van Ranst and J. Debaveye. 1991. Land Evaluation Part I. Principles in Land Evaluation and crop production calculations. International Training Centre for Post-graduate Soil Scientists, University of Ghent. Belgium. 274 pp.
- Tinoco, R. J., Gómez, D. J.A., Monterroso, R.A.I. 2011. Efectos del cambio climático en la distribución potencial de maíz en el estado de Jalisco, México. *Terra Latinoamericana*. 29 (2): 161-168.
- Van, W. A.R. 2000. The Newhall Simulation Model for estimating soil moisture & temperature regimes. Department of Crop and Soil Sciences. Cornell University, Ithaca, N.Y.
- Zarazúa, V.P., Ruiz, C.J.A., González, E.R.D., Flores, L.H.E., Ron, P.J. 2011. Cambio climático y agroclimático para el ciclo otoño-invierno en la región Ciénega de Chapala. *Revista de ciencias Agrícolas*. 2: 295-308.

10. Glosario de Términos

Árido Débil: La sección control de humedad del suelo esta húmeda en alguna de sus partes por más de 45 días, pero menos de 90 días consecutivos durante el periodo en que la temperatura del suelo a 50 cm está por arriba de 8°C.

Árido Extremo: La sección control de humedad del suelo está completamente seca durante todo el año

Árido Típico: La sección control de humedad del suelo esta húmeda en alguna de sus partes por 45 o menos días durante el periodo en que la temperatura del suelo a 50 cm está por arriba de 8°C.

Árido: La sección control del suelo no está húmeda en alguna de sus partes por al menos 90 días consecutivos cuando la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm está por arriba de los 8° C.

Cryico: Suelos muy fríos (T° media menor de 8°C). No presentan permafrost, ya que no se encuentran congelados durante todo el año. Aparece en la zona de los Andes y el sur de Chile y Argentina.

Evapotranspiración potencial (ETP): Cantidad de agua máxima de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación que se desarrolla en óptimas condiciones y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua. Se expresa en mm.

Frigido: Es más cálido en verano que un suelo con régimen cryico, pero su temperatura media anual es menor de 8°C. La diferencia entre la temperatura media del suelo en verano y en invierno es mayor de 6°C.

Gélico: Suelos con T° media menor de 0°C. La temperatura media del suelo en verano es de al menos 10°C.

Hipertérmico: La T° media del suelo mayor de 22°C, la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es mayor de 6°C.

Índice de Aridez (IA): Según la FAO es la base de cuantos días el balance de agua permite el crecimiento de las plantas (estación de crecimiento), determinado mediante la relación de P/ETP.

Isofrígido: La T° media del suelo es menor de 8°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es menor de 6°C.

Isohipertérmico: La T° media del suelo es mayor de 22°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es menor de 6°C.

Isomegatérmico: La T° media del suelo mayor de 28°C; la diferencia entre las temperaturas medias del suelo en verano e invierno es menor de 5°C.

Isomésico: La T° media del suelo se encuentra en el rango de 8-15°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es menor de 6°C.

Isotérmico: La T° media del suelo se encuentra en el rango de 15-22°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es menor de 6°C.

Mésico: La T° media del suelo se encuentra en el rango de 8-15°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es mayor de 6°C.

Perúdicico: Cuando el agua se mueve por el suelo en todos los meses y no está congelada se le conoce a este régimen de humedad extremadamente húmedo como Perúdicico. A diferencia de otros regímenes de humedad el Perúdicico no presenta subtipos.

Régimen de Humedad del Suelo: Se refiere a la presencia o ausencia de un nivel freático o de agua retenida a tensiones inferiores a 1500 kPa (potencial mátrico superior a-1500 kPa) durante períodos del año.

Régimen de Temperatura del Suelo: El régimen de temperatura de los suelos hace referencia a la temperatura media anual del suelo medida a una profundidad arbitraria de 50 cm (que se ha escogido por corresponder a la zona radicular y por no verse influenciada por los cambios diarios de temperatura, sino únicamente por los cambios estacionales).

Tempúdicico seco: Son los suelos que están secos en algunas o todas las partes durante 30 o más días acumulativos cuya oscilación de temperatura es mayor a 5°C.

Tempústico típico: Suelos con un régimen de humedad Ústico sin un régimen de temperatura Iso en donde la sección control de humedad del suelo está húmeda en todas sus partes por más de 45 días consecutivos durante los 4 meses que siguen del solsticio de verano y en donde la sección control no está completamente seca por más de 45 días consecutivos durante los 4 meses que siguen del solsticio de invierno.

Tempústico údicico: Suelos con un régimen de humedad Ústico sin un régimen de temperatura Iso que no caen en las dos clasificaciones anteriores.

Tempústico xérico: Suelos con un régimen de humedad Ústico sin un régimen de temperatura Iso en donde la sección control de humedad del suelo está seca en todas sus partes por más de 45 días consecutivos durante los 4 meses que siguen del solsticio de verano y en donde la sección control está húmeda en todas sus partes por más de 45 días consecutivos durante los 4 meses que siguen del solsticio de invierno.

Térmico: La T° media del suelo se encuentra en el rango de 15-22°C; la diferencia entre la temperatura media del suelo en verano e invierno es mayor de 6°C.

Tropúdicico seco: Son los suelos que están secos en algunas o todas las partes durante 30 o más días acumulativos con un régimen de iso-temperatura (oscilación de temperatura menor a 5°C).

Tropústico arídico: Suelos con un régimen de humedad Ústico y un régimen de temperatura Iso en donde la sección control de humedad del suelo está completamente o parcialmente

húmeda por menos de 180 días consecutivos cuando la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es mayor a 8°C.

Tropústico típico: Suelos con un régimen de humedad Ústico y un régimen de temperatura Iso en donde la sección control de humedad del suelo está completamente o parcialmente húmeda por al menos 180 días, pero menos de 270 días consecutivos cuando la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es mayor a 8°C.

Tropústico údico: Suelos con un régimen de humedad Ústico y un régimen de temperatura Iso en donde la sección control de humedad del suelo está completamente o parcialmente húmeda por 270 días consecutivos o más cuando la temperatura del suelo a 50 cm de profundidad es mayor a 8°C.

Údico Típico: Son suelos con un régimen údico de humedad en el que MCS es seco en algunas de todas las partes por menos de 30 días acumulados.

Údico: La sección control de humedad del suelo no está seca en ninguna de sus partes por 90 días acumulativos.

Ústico: El régimen de humedad es intermedio entre el Árido y el Údico. La sección control de humedad esta húmeda en algunas de sus partes por más de 180 días acumulativos o esta húmeda en alguna de sus partes por al menos 90 días consecutivos. Esta seca en alguna de sus partes por 90 o más días acumulativos en la mayoría de los años.

Xérico seco: La sección control de humedad del suelo esta seca en todas sus partes por más de 90 días consecutivos durante los 4 meses que siguen del solsticio de verano, pero está húmeda en todas sus partes por más de 45 días consecutivos en los 4 meses que siguen al solsticio de invierno.

Xérico típico: La sección control de humedad del suelo esta seca en todas sus partes por 45 días o más pero menos de 90 días consecutivos durante los cuatro meses que siguen del solsticio de verano, pero está húmeda en todas sus partes por más de 45 días consecutivos en los cuatro meses que siguen al solsticio de invierno.

Xérico: La sección control del suelo esta seca en todas sus partes por 45 días consecutivos o más en los cuatro meses que siguen al solsticio de verano en 6 o más años de 10. La sección control del suelo esta húmeda en todas sus partes por 45 días consecutivos o más entre los 4 meses que siguen al solsticio de invierno en 6 o más años de 10. Es típico de los climas con lluvias en invierno



Plataforma de colaboración sobre
**CAMBIO CLIMÁTICO
Y CRECIMIENTO VERDE**
entre Canadá y México

Este documento fue desarrollado en el marco de la Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y México, todos los derechos reservados

Derechos reservados © 2018

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)

Montes Urales 440, Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo, CDMX C.P. 11000

www.mx.undp.org

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 4209, Colonia Jardines en la Montaña, Delegación Tlalpan, CDMX CP. 14210

www.gob.mx/inecc



Environment
Canada

Environnement
Canada

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL DE
ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO



Al servicio
de las personas
y las naciones