



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

TESIS

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A ESCALA MUNICIPAL PARA EL ESTADO DE MICHOACÁN CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Para obtener el grado de
Maestra en Ingeniería de los Recursos Hídricos

Presenta:

Ing. Sandra Lizeth Rodríguez Heredia
Ingeniera Civil

Asesora

Dra. Liliana García Romero
Doctora en Ingeniería del Agua y Medioambiental

Co-Asesor

M.I. Angel Flores Ponce
Maestro en Ingeniería de los Recursos Hídricos

Morelia, Michoacán, junio de 2026



Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y en especial a la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos, por contribuir de manera significativa a mi formación académica y profesional, brindándome las herramientas, conocimientos y aprendizajes necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A SECIHTI, por el financiamiento otorgado durante mi periodo de estudios de maestría, el cual fue fundamental para la realización de esta investigación.

A la Dra. Liliana García Romero, por compartir sus conocimientos, por su paciencia, orientación y acompañamiento académico para enriquecer esta investigación.

Al M.I. Ángel Flores Ponce, por su asesoría técnica, disposición y aportaciones durante el desarrollo de esta investigación.

A mi tutor, el Dr. Miguel Ángel Pérez Martín, por su asesoramiento y apoyo durante mi estancia académica en la Universidad Politécnica de Valencia, experiencia que representó una etapa importante en mi formación profesional y personal.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, por su apoyo, orientación y consejos a lo largo de mi formación académica y profesional, así como por su disposición para acompañarme en este proceso.

A Ulises, por su amor, paciencia, compañía y apoyo incondicional durante este recorrido. Gracias a tu apoyo hizo este camino más ligero y significativo.

A Karla, por su amistad sincera, por su apoyo incondicional, por las risas compartida. Gracias por acompañarme en esta etapa con alegría.

A mi familia, a mis papás y a mis hermanos, por su amor, confianza y apoyo incondicional. Gracias por sus palabras de ánimo, por creer en mí y por acompañarme siempre.

Resumen

La presente investigación se centra en el análisis del riesgo ante sequías a escala municipal en el estado de Michoacán, considerando condiciones históricas y escenarios futuros que consideran el efecto del cambio climático. Para ello, se integró información climatológica observada, series proyectadas bajo los escenarios de cambio climático denominados SSP2-4.5 y SSP5-8.5, así como indicadores sociales, económicos y ambientales relacionados con la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. La caracterización de las sequías se realizó a través de la aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración a 12 meses (SPEI-12), lo que permitió identificar la duración, intensidad y magnitud de los eventos secos en los municipios del estado de Michoacán. Asimismo, se construyó un índice de vulnerabilidad y un índice de riesgo mediante la integración de indicadores ponderados, permitiendo clasificar espacialmente los municipios según su nivel de riesgo. Los resultados mostraron que el cambio climático puede incrementar las condiciones de amenaza y vulnerabilidad ante sequías, especialmente en municipios con menor capacidad de adaptación, mayor dependencia de actividades sensibles al clima y limitaciones en infraestructura hídrica. Finalmente, se proponen medidas de actuación diferenciadas por nivel de riesgo, orientadas al fortalecimiento del abastecimiento de agua, monitoreo, agricultura, restauración ambiental, prevención de incendios, atención comunitaria y planeación institucional. Esta investigación busca contribuir a la toma de decisiones y a la planificación preventiva para reducir los impactos de las sequías en Michoacán.

Palabras clave: Riesgo ante Sequías; SPEI-12; Vulnerabilidad Municipal; Cambio Climático; Michoacán.

Abstract

This research focuses on the analysis of drought risk at the municipal scale in the state of Michoacán, considering historical conditions and future scenarios that consider the effect of climate change. For this purpose, observed climatological information, projected series under the climate change scenarios called SSP2-4.5 and SSP5-8.5, as well as social, economic, and environmental indicators related to vulnerability, exposure, and hazard were integrated. The characterization of droughts was carried out through the application of the 12-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI-12), which made it possible to identify the duration, intensity, and magnitude of dry events in the municipalities of the state of Michoacán. Likewise, a vulnerability index and a risk index were constructed through the integration of weighted indicators, allowing the municipalities to be spatially classified according to their level of risk. The results showed that climate change can increase the conditions of hazard and vulnerability to droughts, especially in municipalities with lower adaptive capacity, greater dependence on climate-sensitive activities, and limitations in water infrastructure. Finally, differentiated action measures are proposed by risk level, aimed at strengthening water supply, monitoring, agriculture, environmental restoration, fire prevention, community care, and institutional planning. This research seeks to contribute to decision-making and preventive planning to reduce the impacts of droughts in Michoacán.

Keywords: Drought Risk; SPEI-12; Municipal Vulnerability; Climate Change; Michoacán.

Contenido

1	Introducción	13
2	Problemática	14
3	Justificación	15
4	Objetivos	16
4.1	Objetivo general	16
4.2	Objetivos particulares	16
5	Hipótesis	16
6	Marco teórico	17
6.1	Cambio climático	17
6.1.1	Causas del cambio climático	17
6.1.2	Gases Efecto Invernadero (GEI)	18
6.1.3	Calentamiento Global	18
6.1.4	Escenarios de cambio climático en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, Fase 6 (CMIP6)	19
6.2	Sequías	21
6.2.1	Monitor de sequía de México	21
6.2.2	Sequía meteorológica	23
6.2.3	Indicadores de sequías	23
6.2.4	Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)	24
6.2.4.1	Evapotranspiración potencial	24
6.2.5	Caracterización de sequías	25
6.3	Índice de riesgo ante sequías	26
6.3.1	Vulnerabilidad ante la sequía	26
6.3.1.1	Indicadores de vulnerabilidad	29
6.3.2	El riesgo ante sequías	31
6.4	Medidas de adaptación y mitigación	33
7	Antecedentes	37
8	Materiales y métodos	40

8.1	Gestión de datos	41
8.1.1	Información climatológica observada	41
8.1.1.1	Preselección de estaciones	41
8.1.1.2	Selección de estaciones	41
8.1.1.3	Estimación de datos faltantes.....	42
8.1.1.4	Generación de estaciones ficticias.....	42
8.1.2	Información climatológica proyectada	42
8.1.2.1	Reducción de escala.....	43
8.2	Indicadores de sequías	44
8.2.1	Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)	44
8.2.1.1	Caracterización de sequías	45
8.3	Índice de riesgo ante sequías.....	45
8.3.1	Cálculo del Índice de vulnerabilidad	47
8.3.2	Cálculo del Índice de riesgo por sequías.....	47
8.4	Medidas de actuación.....	48
9	Resultados	51
9.1	Ámbito de estudio	51
9.2	Información climatológica observada o medida	59
9.2.1	Selección de estaciones meteorológicas	59
9.2.2	Análisis climático observado	64
9.3	Información climatológica simulada.....	67
9.3.1	Corrección del sesgo.	69
9.4	Índice de sequías	71
9.4.1	Distribución espacial de las sequías históricas	72
9.4.2	Caracterización de sequías meteorológicas históricas	74
9.4.2.1	Caracterización de sequías históricas máximas.....	77
9.4.3	Distribución espacial de sequías considerando el efecto del cambio climático....	79
9.4.4	Caracterización de las sequías meteorológicas considerando el efecto del cambio climático	86
9.5	Riesgo a las sequías	89
9.5.1	Índice de vulnerabilidad histórica.....	89

9.5.2	Índice de riesgo por sequías para el periodo histórico	91
9.5.3	Índice de vulnerabilidad futura	93
9.5.4	Índice de riesgo de sequías para el periodo futuro.....	96
9.6	Medidas de actuación.....	100
9.6.1	Municipios con riesgo muy bajo.....	101
9.6.2	Municipios con riesgo bajo ante sequías	104
9.6.3	Municipios con riesgo medio.....	108
9.6.4	Municipios con riesgo alto.....	111
9.6.5	Municipios con riesgo muy alto.....	115
10	Discusión.....	121
11	Conclusiones	125
12	Recomendaciones y líneas futuras	127
13	Referencias.....	128

Índice de Figuras

Figura 4.1 Posicionamiento de los Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP).	20
Figura 4.2. Monitor de sequías de México.	22
Figura 4.3 Intensidad de la Sequía.....	23
Figura 4.4 Caracterización de un periodo de sequía.....	26
Figura 4.5 Diagrama de concepto de vulnerabilidad	27
Figura 4.6 Definición del riesgo.	32
Figura 8.1 Metodología aplicada.	40
Figura 8.2 Serie temporal del indicador de sequía con umbrales de normalidad, prealerta, alerta y emergencia.	48
Figura 9.1 Micro localización del estado de Michoacán.	51
Figura 9.2 Población total por municipio en el estado de Michoacán.....	52
Figura 9.3 Regiones socioeconómicas y administrativas del estado de Michoacán.....	53
Figura 9.4 Topografía de Michoacán.	54
Figura 9.5 Tipo de clima en el estado de Michoacán.....	55
Figura 9.6 Precipitación media anual en el estado de Michoacán.	56
Figura 9.7. Temperaturas promedio del estado.....	57
Figura 9.8 Evapotranspiración anual (mm) en estado.	58
Figura 9.9 Hidrografía y regiones hidrológicas del estado de Michoacán.	59
Figura 9.10 Estaciones climatológicas seleccionadas.....	64
Figura 9.11 Precipitación anual y temperatura media, máxima y mínima	65
Figura 9.12 Climatología mensual observada de precipitación y temperatura.....	65
Figura 9.13 Precipitación anual y evapotranspiración.....	66
Figura 9.14 Climatología mensual de precipitación y evapotranspiración.....	66
Figura 9.15 Variación de la precipitación anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte	68
Figura 9.16 Variación de las temperaturas máximas anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte.....	68
Figura 9.17 Variación de las temperaturas mínimas anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte.....	68
Figura 9.18 Deltas mensuales de precipitación para los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 en dos horizontes de proyección (2020 – 2050 y 2070 – 2100).....	69

Figura 9.19 Deltas mensuales de temperatura media para los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 en dos horizontes de proyección (2020 – 2050 y 2070 – 2100)	70
Figura 9.20 Precipitación y temperatura anuales: periodo base y proyección SSP2 – 4.5.....	71
Figura 9.21 Precipitación y temperatura anual: periodo base y proyección SSP5 – 8.5.	71
Figura 9.22 Comportamiento del SPEI – 12 meses	72
Figura 9.23 Comparativa SPEI - 12 meses (1990-2020).	74
Figura 9.24 Caracterización media SPEI – 12 meses.	76
Figura 9.25 Mapeo de la caracterización máxima SPEI – 12.	79
Figura 9.26 Sequías meteorológicas SSP2-4.5 a corto plazo (SPEI – 12).....	81
Figura 9.27 Sequías meteorológicas SSP2-4.5 a largo plazo (SPEI – 12).....	83
Figura 9.28 Sequías meteorológicas SSP5 8.5 a corto plazo (SPEI – 12).....	84
Figura 9.29 Sequías meteorológicas SSP5 8.5 a largo plazo (SPEI – 12).....	86
Figura 9.30 Caracterización media de las sequías, en meses, para los escenarios de cambio climático SSP2 -4.5 y SSP5 - 8.5 en los periodos 2020 – 2050 y 2070 – 2100.	87
Figura 9.31 Caracterización máxima de las sequías, en meses, para los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en los periodos 2020–2050 y 2070–2100.	88
Figura 9.32 Clasificación municipal de la sensibilidad (S) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).	89
Figura 9.33 Clasificación municipal de la capacidad de adaptación (CA) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).	90
Figura 9.34 Clasificación municipal de la vulnerabilidad (V) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).	91
Figura 9.35 Clasificación municipal de la exposición (E) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).	92
Figura 9.36 Clasificación municipal del peligro (H) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).....	92
Figura 9.37 Clasificación municipal del riesgo (R) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).	93
Figura 9.38 Comparación espacial de la sensibilidad (S) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).	94
Figura 9.39 Comparación espacial de la capacidad de adaptación (CA) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).	95
Figura 9.40 Comparación espacial de la vulnerabilidad (V) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).	96

Figura 9.41 Comparación espacial del peligro (H) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).....	97
Figura 9.42 Comparación espacial de la exposición (E) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).	98
Figura 9.43 Comparación espacial del riesgo (R) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).....	99
Figura 9.44. Distribución porcentual del riesgo ante sequías con efectos del cambio climático para el estado de Michoacán.....	100
Figura 9.45 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Muy bajo.	101
Figura 9.46 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: bajo.....	105
Figura 9.47 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Medio.	108
Figura 9.48 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Alto.....	112
Figura 9.49 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Muy alto.	116

Índice de Ecuaciones

Ecuación 4.1. Evapotranspiración potencial	25
Ecuación 4.2 Vulnerabilidad.	27
Ecuación 4.3 Definición de riego.....	31
Ecuación 8.1 Factor de cambio mensual de temperatura entre periodo base y proyectada.	43
Ecuación 8.2 Proyección corregida de temperatura aplicada.	43
Ecuación 8.3 Factor de cambio mensual de precipitación entre periodo base y proyectado	44
Ecuación 8.4 Proyección corregida de precipitación.	44
Ecuación 8.5 Vulnerabilidad ante sequías.....	47
Ecuación 8.6. Riego ante sequías.....	47
Ecuación 9.1 Índice de vulnerabilidad.....	90
Ecuación 9.2 Índice de riesgo.	93

Índice de Tablas

Tabla 4.1 Proyecciones de aumento de temperatura global en los escenarios socioeconómicos (SSP).	21
Tabla 4.2 Evolución del concepto de vulnerabilidad y sus componentes según el IPCC (AR4, AR5 y AR6).....	28
Tabla 4.3 Modelos matemáticos para el cálculo de la vulnerabilidad.....	28
Tabla 4.4 Indicadores del Índice de vulnerabilidad.	29
Tabla 4.5 Matriz de indicadores de vulnerabilidad.	30
Tabla 4.6 Comparación de definiciones de riesgo y vulnerabilidad en los informes del IPCC (AR4, AR5 y AR6).	32
Tabla 4.7 Modelos matemáticos para el cálculo del riesgo.....	33
Tabla 4.8 Medidas de Mitigación.....	34
Tabla 4.9 Medidas de mitigación en diversos sectores.	35
Tabla 4.10 Criterios para la elección de medidas de adaptación.....	36
Tabla 8.1 Clasificación del nivel de riesgo.	47
Tabla 8.2 Relación entre intensidad de sequía, estado operativo y tipo de medida	49
Tabla 9.1 Clasificación climatológica de Köppen.....	54
Tabla 9.2 Criterio – Años continuos de información.	60
Tabla 9.3 Criterio – Último año de registro.	60
Tabla 9.4 Criterio – Pruebas estadísticas aprobadas.	60
Tabla 9.5 Criterio – Importancia de la estación.	60
Tabla 9.6 Resultados de la gestión de datos.	61
Tabla 9.7 Estaciones climatológicas observadas.....	62
Tabla 9.8 Estaciones climatológicas ficticias.....	63
Tabla 9.9 Modelos climáticos simulados para América Central del Norte.	67
Tabla 9.10 Caracterización SPEI de 12 meses.	74
Tabla 9.11 Caracterización máxima SPEI – 12.....	77
Tabla 9.12 indicadores de sensibilidad (S).....	89
Tabla 9.13 Indicadores de la capacidad de adaptación (CA)	90
Tabla 9.14 Indicadores del grado de exposición (E)	91
Tabla 9.15 Medidas de actuación para un nivel de riesgo muy bajo ante sequías.	102

Tabla 9.16 Medidas de actuación para un nivel de riesgo bajo ante sequías.	105
Tabla 9.17 Medidas de actuación para un nivel de riesgo medio ante sequías.	108
Tabla 9.18 Medidas de actuación para un nivel de riesgo alto ante sequías.	112
Tabla 9.19 Medidas de actuación para un nivel de riesgo muy alto ante sequías.	116

1 Introducción

El agua, como recurso hídrico, desempeña un papel crucial en el abastecimiento, la sostenibilidad, el desarrollo socioeconómico y la biodiversidad. Su importancia a través de factores climáticos, geográficos y ambientales, mantienen en equilibrio el ciclo del agua en el planeta Tierra.

En los últimos años, los desafíos que afectan a los recursos hídricos han generado gran preocupación entre investigadores y organizaciones. La escasez de agua, agravada por el cambio climático y los eventos climatológicos extremos, como las sequías y las variaciones en los patrones de precipitación, representa una amenaza para la sostenibilidad de los recursos hídricos. Esto impacta directamente en la economía, la actividad humana, los ecosistemas y las poblaciones.

Los desastres naturales asociados con eventos hidrometeorológicos, tales como la falta de precipitación, la evaporación y otros fenómenos relacionados con el clima, también han contribuido a la disminución de los recursos hídricos a nivel global.

Actualmente, las sequías representan un desafío constante, reflejo de cambios significativos en los patrones climáticos a lo largo del tiempo. Su análisis en diferentes regiones es esencial para evaluar y planificar actividades humanas, industriales y poblacionales, ya que permite comprender los contrastes climáticos y la variabilidad estacional.

El riesgo ante las sequías no depende únicamente de las condiciones climáticas; factores socioeconómicos, políticos y culturales de cada región también desempeñan un papel fundamental. La gestión adecuada del riesgo de sequías requiere planificación cuidadosa e implementación de medidas de actuación, mitigación, adaptación y gestión de los recursos hídricos. Estas acciones son esenciales para reducir el riesgo y prevenir que las regiones más afectadas sufran las consecuencias de la disminución de la precipitación.

En el estado de Michoacán, las alteraciones en los patrones climatológicos han planteado un desafío significativo en los últimos años. Estas variaciones están relacionadas con el riesgo ante las sequías, afectando la disponibilidad de recursos hídricos, la agricultura, la ganadería, la economía y los ecosistemas.

2 Problemática

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2021), en los últimos 50 años, las sequías, tormentas e inundaciones han sido las principales causas de pérdidas humanas y económicas. Entre 1970 y 2019, las catástrofes más destacadas en términos de impacto fueron: sequías con 650,000 eventos, tormentas con 577,232, inundaciones con 58,700 y temperaturas extremas con 55,736 eventos.

A lo largo de la historia de México, las sequías han sido un fenómeno recurrente, afectando la disponibilidad de agua, la economía, la agricultura y la vida cotidiana, especialmente en la zona norte y norte-centro. Entre 1930 y 1977, se registraron siete sequías severas, destacando los años 1925, 1935, 1957, 1960, 1962, 1969 y 1977 (J. Domínguez, 2016).

En Michoacán, se observaron cuatro grandes períodos de sequía durante el siglo XX, sin impactos graves, aunque en 1998 se vivió un año crítico. Entre 2003 y 2013, el año 2011 fue especialmente intenso, afectando más del 90% del territorio nacional, aunque la región Lerma mostró un grado de vulnerabilidad baja (Domínguez, 2016).

Actualmente (2024), el 84% del territorio de Michoacán está en sequía, afectando a 110 de los 113 municipios del estado. De estos, 63 municipios están en sequía extrema, 30 en sequía moderada y 8 en condiciones anormales (Gobierno de Michoacán, 2024).

3 Justificación

El análisis de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo asociado a las sequías a escala municipal en el estado de Michoacán es de vital importancia. Lo anterior, debido a que la mayoría de los municipios actualmente no cuentan con un instrumento denominado atlas de riesgo de sequías, ni tampoco, con programas de medidas preventivas y de mitigación de la sequía que alerten a la población sobre las acciones necesarias en caso de enfrentar riesgos por sequías. Esta falta de programas limita la capacidad de las comunidades y las instituciones para responder de manera efectiva a los impactos asociados con la disminución de los recursos hídricos.

Esta investigación se enfoca en esta problemática mediante un análisis de la amenaza de la sequía futura a escala municipal, utilizando indicadores de sequía que permitan estudiarla en diferentes escalas temporales. El estudio evalúa la vulnerabilidad de los municipios en diversos sectores clave, tales como la agricultura, la ganadería y la economía, proponiendo así, medidas concretas para mitigar los impactos.

Además, se identificarán los municipios con mayor susceptibilidad y riesgo ante las sequías, destacando aquellos que requieren atención prioritaria. Este enfoque permitirá proponer medidas de adaptación específicas para reducir la vulnerabilidad y fortalecer la capacidad de respuesta de las comunidades.

El objetivo principal de este análisis es proporcionar información precisa para los tomadores de decisiones y las instituciones gubernamentales, convirtiéndose en una herramienta de apoyo para el diseño de políticas públicas y estrategias que promuevan una gestión sostenible de los recursos hídricos. Al mismo tiempo, desde un enfoque social, se busca alertar y preparar a la población para enfrentar los riesgos asociados con las sequías.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Analizar el riesgo asociado a las sequías a escala municipal para el estado de Michoacán, mediante información histórica y escenarios de cambio climático a fin de proponer medidas de actuación para la población a corto y largo plazo.

4.2 Objetivos particulares

- Analizar la información meteorológica histórica para la caracterización de sequías para el estado de Michoacán.
- Generar series meteorológica proyectadas considerando los efectos del cambio climático para México a partir del análisis de la base de datos *Copernicus*.
- Generar los indicadores de sequías por medio del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), para condiciones históricas y escenarios futuros de cambio climático en el estado de Michoacán.
- Evaluar la vulnerabilidad ante sequías mediante la integración de indicadores sociales, económicos, ambiental y otros factores relevantes, utilizando umbrales diseñados para su aplicación en el análisis municipal.
- Analizar el riesgo de sequías en los municipios del estado de Michoacán mediante la identificación de las regiones con mayor vulnerabilidad ante la amenaza de la sequía.
- Proponer medidas de actuación frente al riesgo de sequía a escala municipal en el estado de Michoacán, con la implementación de estrategias de mitigación y adaptación ante las sequías, orientadas a la gestión y planificación a largo plazo.

5 Hipótesis

Bajo escenarios de cambio climático, el riesgo asociado a la ocurrencia de sequías en los municipios del estado de Michoacán aumentará respecto al periodo histórico debido a mayores niveles de amenaza y vulnerabilidad; no obstante, la implementación de medidas de actuación estratégicas permitirá reducir tanto la exposición como los impactos sobre la población a corto y largo plazo.

6 Marco teórico

6.1 Cambio climático

Los expertos en cambio climático definen a este fenómeno como el cambio que ocurre en la variabilidad climática a través del tiempo, ya sea natural o causada por la actividad humana (SEMARNART, 2009). La variabilidad climática se manifiesta en parámetros meteorológicos como la precipitación y la temperatura. Cuando se identifica un valor anormal en estos parámetros, se habla de una anomalía climatológica. Esta anomalía puede ser causada por la inestabilidad de la atmósfera y/o el océano, así como por actividades antropogénicas y la concentración de gases de efecto invernadero atrapados en la atmósfera (Martínez et al., 2004).

El cambio climático representa un desafío significativo para la humanidad, ya que provoca un desequilibrio en la sociedad y la naturaleza, lo que puede llevar a un colapso de los sistemas humanos y ecológicos (González & Meira, 2020). La biodiversidad contribuye a la regulación del agua y el aire, por lo que la extinción de seres vivos debido a la deforestación en diversas regiones es motivo de preocupación. Este fenómeno altera las condiciones de vida de las especies, que no logran adaptarse a estos cambios (Rodríguez et al., 2015).

6.1.1 Causas del cambio climático

De acuerdo con IPCC (2007), los cambios experimentados afectan glaciares y terrenos congelados, donde se ha incrementado el número de lagos glaciares y se ha observado una inestabilidad del terreno, así como cambios en los ecosistemas árticos y antárticos. La presencia anticipada de caudales primaverales, alimentados por glaciares, ocurre debido al aumento de las temperaturas. La primavera anticipada también ha provocado desplazamientos hacia los polos. Estos desplazamientos también se observan en sistemas marinos y de agua dulce, con el incremento de algas, peces y el aumento de temperaturas, lo que ha generado un desequilibrio en la geografía y los ecosistemas.

Los impactos del clima atípicos han afectado a varios sectores relacionados con las actividades humanas. Estos efectos también impactan la gestión agrícola debido a la perturbación de los ecosistemas causada por incendios y plagas. Además, las altas temperaturas tienen efectos secundarios en la salud (IPCC, 2007). La presencia de alteraciones climáticas ha provocado eventos como el fenómeno de El Niño, huracanes, y ondas de calor o frío con mayor frecuencia e intensidad (Martínez et al., 2004).

6.1.2 Gases Efecto Invernadero (GEI)

La presencia del fenómeno del efecto invernadero se originó con la formación de la atmósfera hace aproximadamente 4500 millones de años. A partir de hace unos 150,000 años, comenzaron a registrarse los primeros cambios significativos en el clima (Castro, 2012). Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) se presentaron por la acumulación de erupciones volcánicas, la vegetación y los océanos.

Los GEI son aquellos gases que contribuyen al calentamiento global que está relacionado con el cambio climático. Este fenómeno se produce debido al incremento antropogénico de estos gases en la atmósfera, considerando que provocan un calentamiento o enfriamiento del planeta (Martínez et al., 2004).

Durante la época de la Revolución Industrial, se presentó un incremento en las emisiones de algunos gases, principalmente dióxido de carbono y metano, lo que provocó alteraciones en la atmósfera, causando variabilidad climática y un aumento de la temperatura en la superficie terrestre (Vargas, 2009). El crecimiento de los asentamientos humanos y de la economía ha provocado un aumento en las emisiones GEI debido al uso de energías fósiles, especialmente en la agricultura a través de agroquímicos (Rodríguez et al., 2015). Sin embargo, las actividades antropogénicas, como la industria y el uso de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), han acelerado su aumento mediante la liberación de CO_2 , NO_2 , H_2O , CH_4 , O_3 y vapor de agua. Esto incrementa la concentración de gases en la atmósfera, provocando un aumento de la temperatura del planeta (SEMARNAT, 2009).

6.1.3 Calentamiento Global

El calentamiento global se define como el aumento de la temperatura en la Tierra debido a actividades humanas. Entre las principales causas se encuentran la intensificación del efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono (Isaza & Campo, 2007). La problemática del calentamiento global antropogénico se define como el desequilibrio termodinámico de la atmósfera terrestre (Castro, 2012).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2022), el calentamiento global se define como el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera. Estos gases absorben y emiten radiación térmica, reteniéndola en la atmósfera, lo que provoca un aumento de la temperatura media global.

Los efectos del calentamiento global incluyen la aceleración del deshielo de los glaciares, el aumento del nivel del mar, la reducción significativa de los ecosistemas, alteraciones en el ciclo

del agua, pérdida de fertilidad del suelo para actividades agrícolas y la aparición de fenómenos meteorológicos extremos (López & Pradel, 2021).

6.1.4 Escenarios de cambio climático en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados, Fase 6 (CMIP6)

De acuerdo con el informe el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2022), en los últimos años se ha enfatizado que, para comprender y enfrentar los efectos del cambio climático, no basta con considerar únicamente los forzamientos radiativos, representados por las Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés), expresadas en W/m^2 . También es fundamental incorporar el análisis de las condiciones sociales y económicas, es decir, evaluar qué tan preparada está la población para enfrentar estos efectos, lo cual se aborda mediante las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés).

Por esta razón, actualmente se combinan los escenarios RCP y SSP para obtener proyecciones climáticas más completas y realistas, que permitan anticipar no solo los cambios físicos en el clima, sino también la capacidad de las sociedades para adaptarse o mitigar dichos cambios. Las condiciones sociales, como el grado de marginación, la desigualdad o la disponibilidad de medidas de adaptación, juegan un papel clave en la capacidad de respuesta de cada sociedad, reflejándose en los planes, políticas y acciones que se implementan para enfrentar los diferentes escenarios climáticos (Castillo et al., 2017).

El posicionamiento de estos escenarios en función de los desafíos socioeconómicos para la mitigación y adaptación como se muestra en la **Figura 6.1**, donde representan los cinco escenarios socioeconómicos (SSP) y su nivel de dificultades para implementar acciones de mitigación y adaptación.

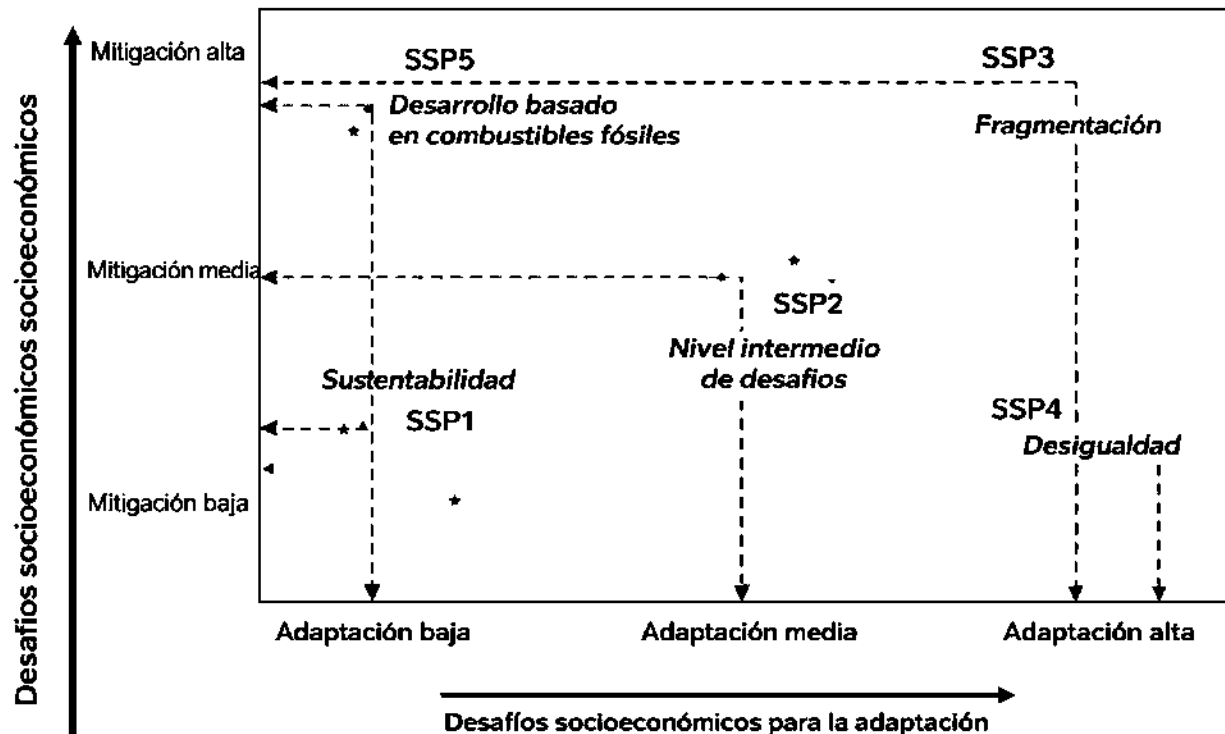


Figura 6.1 Posicionamiento de los Escenarios Socioeconómicos Compartidos (SSP).

Fuente: Tomando de Castillo et al. (2017).

De acuerdo con Castillo et al. (2017), los escenarios analizados corresponden a la combinación de los SSP y RCP, los cuales representan diferentes futuros posibles en función de las emisiones de gases de efecto invernadero, los modelos de desarrollo y la capacidad de respuesta social y política frente al cambio climático. El escenario SSP1-1.9 describe un desarrollo verde y sostenible, donde se prioriza la protección ambiental, la equidad social y la transición hacia energías limpias, con un enfoque claro en la fuerte mitigación de emisiones. Por su parte, el SSP1-2.6 se basa en una sustentabilidad moderada, en la que se adoptan medidas significativas para reducir emisiones y se priorizan las políticas climáticas, aunque sin alcanzar los niveles más ambiciosos. El escenario SSP2-4.5 corresponde a un nivel intermedio, donde las tendencias actuales continúan sin grandes transformaciones estructurales y se aplican algunas medidas de mitigación y adaptación, aunque insuficientes para limitar el calentamiento global de manera efectiva. En contraste, el SSP3-7.0 refleja un escenario de alta desigualdad y fragmentación global, caracterizado por un mundo dividido, con conflictos, barreras comerciales y escasa cooperación internacional, donde las emisiones aumentan considerablemente y las capacidades de adaptación son limitadas. Finalmente, el escenario SSP5-8.5 describe un desarrollo intensivo basado en combustibles fósiles, donde se prioriza el crecimiento económico impulsado por energías tradicionales, con mínimas acciones climáticas, representando la trayectoria con las mayores emisiones y el mayor nivel de

calentamiento global. Cada uno de estos escenarios muestra diferentes trayectorias de emisiones de CO₂, lo que permite explorar diversos futuros climáticos en función de las acciones humanas y las decisiones políticas globales, tal como se presenta en la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1 Proyecciones de aumento de temperatura global en los escenarios socioeconómicos (SSP).

Escenario	Corto plazo (2021 – 2040)		Medio plazo (2041-2060)		Largo plazo (2081-2100)	
	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)	Mejor estimación (°C)	Rango muy probable (°C)
SSP1 – 1.9	1.5	1.2 – 1.7	1.6	1.2 – 2.0	1.4	1.0 – 1.8
SSP1 – 2.6	1.5	1.2 – 1.8	1.7	1.3 – 2.2	1.8	1.3 – 2.4
SSP2 – 4.5	1.5	1.2 – 1.8	2.0	1.6 – 2.5	2.7	2.1 – 3.5
SSP3 – 7.0	1.5	1.2 – 1.8	2.1	1.7 – 2.6	3.6	2.8 – 4.6
SSP5 – 8.5	1.6	1.3 – 1.9	2.4	1.9 – 3.0	4.4	3.3 – 5.7

Fuente: Tomanda y adaptada de Castillo et al. (2017).

6.2 Sequías

Los expertos han definido la sequía como un fenómeno climático caracterizado por una disminución de la precipitación por debajo de lo normal. Las sequías no tienen epicentro ni trayectoria fija, y se presentan de manera irregular a lo largo del tiempo y el espacio. Como consecuencia, se produce una disminución en los niveles de los cuerpos de agua, lo que afecta tanto a las necesidades humanas como a los ecosistemas (Ortega, 2013).

El peligro natural de una sequía es que evoluciona lentamente y afecta a todos los regímenes climáticos. Cuando una sequía se prolonga durante un período largo, se produce una insuficiencia para satisfacer la demanda de la actividad humana (Hayes et al., 2011). Este fenómeno hidrometeorológico ha causado la pérdida de vidas humanas y materiales. Sus afectaciones se extienden a largo plazo, impactando negativamente las actividades agrícolas y ganaderas durante meses o incluso años (Bitrán et al., 2002).

Existen diferentes tipos de sequías: la agrícola, hidrológica, meteorológica y socioeconómicas, cada una con distintos impactos en los recursos hídricos y en la población. Sin embargo, en esta investigación nos enfocaremos en las sequías meteorológicas.

6.2.1 Monitor de sequía de México

El Monitor de Sequías de México (MSM, 2025) es un producto operativo elaborado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (CONAGUA, 2025), que describe periódicamente la evolución de la sequía en el país en términos de magnitud a extensión espacial, acompañado de una narrativa

de impactos. Es importante que mencionar que no es un sistema de pronóstico, sino de seguimiento y evolución de las condiciones actuales.

Metodológicamente, el MSM es una adaptación nacional del trabajo regional de Norteamérica (NADM, 2024), iniciando a partir de la colaboración entre México, Estado Unidos y Canadá. En México, el monitor se integra a partir de múltiples indicadores que combinan en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se complementan con el criterio técnico de climatológico y el consenso con usuarios y especialistas, con el fin de sistematizar la información en un solo mapa (Figura 6.2).

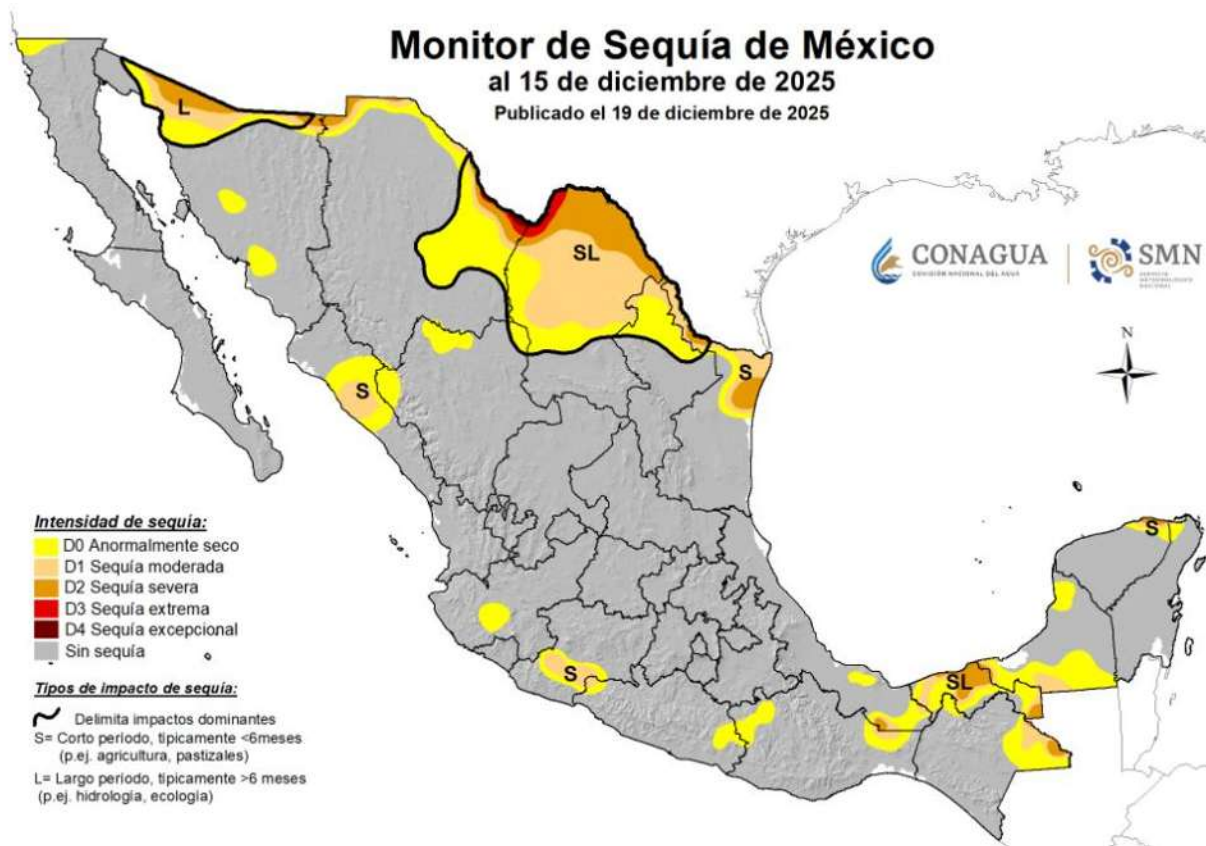


Figura 6.2. Monitor de sequías de México.
Fuente. Tomado de MSM (2025).

Para la clasificación geoespacial de la sequía, se utilizará el Monitor de Sequías de México (MSM, 2025), como se muestra en la **Figura 6.3**. La plataforma utiliza la metodología aplicada en el Monitor de Sequías de América del Norte. El Monitor de Sequía de América del Norte (NADM, 2024), es una colaboración entre México, Estados Unidos y Canadá que describe las condiciones de sequía en la región usando la metodología del USDM (2024), esta clasificación la describe el autor Svoboda et al. (2002) para el Monitor de Sequía de Norte América.

Intensidad de la Sequía			
	Rango	Clave	Categoría
	-0.8 - -0.5	D0	Anormalmente Seco
	-1.3 - -0.8	D1	Sequía Moderada
	-1.6 - -1.3	D2	Sequía Severa
	-2.0 - -1.6	D3	Sequía Extrema
	≤ -2.0	D4	Sequía Excepcional

Figura 6.3 Intensidad de la Sequía.
Fuente. Adaptado de MSM (2025).

6.2.2 Sequía meteorológica

La sequía meteorológica se caracteriza por la disminución de precipitación, inferior a lo normal en una localidad o región por periodos de meses o años. Las sequías meteorológicas presentan diferente impacto dependiendo de la zona. En regiones semiáridas y subhúmedas, son las que tienen un mayor impacto, con mayores afectaciones en la población ya que la demanda de precipitación es alta, caso contrario son las regiones húmedas, en estas zonas la disponibilidad de agua es mayor a la demanda por lo tanto las sequías no presentan mayores impactos negativos (Campos-Aranda, 2018a).

De acuerdo con Valiente (2001), tanto la precipitación como la evapotranspiración, son consideradas al definir el déficit hídrico. La evapotranspiración es una variable que forma parte del ciclo climático. Una sequía meteorológica se define como el resultado del exceso de la demanda atmosférica de humedad respecto a su aporte, donde la evapotranspiración es mayor a la precipitación (Rind et al., 1990).

6.2.3 Indicadores de sequías

De acuerdo con Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2016), los indicadores son variables utilizadas para analizar y describir las sequías basándose en información meteorológica, como temperaturas, precipitación, caudales fluviales y agua subterránea, etc. Estos indicadores constituyen representaciones numéricas que permiten determinar la gravedad de la sequía mediante datos climáticos e hidrométricos. Estos datos se conocen como índices y se utilizan para analizar cuantitativamente la sequía en un período determinado.

6.2.4 Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

La principal aplicación del Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), ha sido para la detección y estudio de las condiciones climatológicas de una sequía (OMM, 2016). Fue desarrollado por Vicente, Beguería y López en 2010 como un indicador multiescalar, sensible a los efectos del calentamiento global. Este indicador se basa en un balance hídrico donde interviene diversos parámetros como precipitación, temperatura, radiación, humedad etc., permitiendo así obtener la evapotranspiración producida por una sequía (Castillo-Castillo et al., 2017b). En México, la información climatológica reporta datos sobre precipitación y temperaturas, pero no incluye información sobre la evaporación (Navejas-Jiménez et al., 2011).

El proceso para la obtención de este índice desarrollado por Vicente-Serrano et al. (2010a), se realiza mediante un análisis de los datos ajustados a la función de densidad de probabilidad, con una mayor adaptación a la función log-logística. Este índice es una variable estandarizada, ya que su media es 0 y su desviación estándar 1, lo que facilita la comparación con otros valores. Además, este índice se adapta a las series de datos en diferentes escalas temporales (1 mes, 6 meses, 12 meses y 24 meses) en cualquier región del mundo.

6.2.4.1 Evapotranspiración potencial

En el ciclo hidrológico, la evapotranspiración se define como la suma de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas (Navejas-Jiménez et al., 2011). Esta variable cuantifica la demanda de agua, incluyendo los cambios meteorológicos, y considera la demanda hídrica de los cultivos mediante la evaporación y la transpiración directa del suelo (Navejas-Jiménez et al., 2011). La disponibilidad de agua en el suelo para el cultivo se determina a partir de la radiación solar que llega a la superficie del suelo (FAO, 2021).

Las variables necesarias para la obtención del SPEI incluyen la evapotranspiración potencial (ETP). Para calcular la ETP, se requieren variables como la temperatura, la precipitación, la radiación solar, la velocidad del viento, entre otras. Existen varias metodologías para calcular la ETP, pero uno de los métodos más utilizados es el de Hargreaves & Samani (1982).

En este caso, la evapotranspiración se estimó mediante la **Ecuación 6.1** empírica de Hargreaves & Samani (1982), la cual aproxima la demanda evaporativa atmosférica a partir de variables terminas y de radiación extraterrestre:

$$ET_o = 0.0023 (T_{med} + 17.8) \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_o$$

Ecuación 6.1. Evapotranspiración potencial

Fuente. Tomado de Hargreaves & Samani (1982)

Donde:

ET_o : evaporación potencial (mm día⁻¹)

T_{med} : temperatura media diaria (°C)

T_{max} : temperatura máxima diaria (°C)

T_{min} : temperatura mínima diaria (°C)

R_o : radiación extraterrestre media diaria (MJ m⁻² día⁻¹)

6.2.5 Caracterización de sequías

Evaluar las sequías en un periodo temporal específico es clave para comprender y gestionar este fenómeno climático. Por lo tanto, es fundamental analizar su frecuencia, es decir, con qué regularidad se presenta este fenómeno; y su severidad o magnitud, que mide el grado de intensidad y qué tan prolongadas son. Este tipo de análisis permite estimar la probabilidad de que se presenten eventos de sequía y comprender qué tan extensos pueden llegar a ser en una región (Byun & Wilhite, 1999).

De acuerdo con Valiente (2001), para la caracterización de un episodio de sequías, se intervienen las siguientes propiedades:

- **Duración:** Es el intervalo de tiempo entre los instantes de entrada y salida del periodo de sequía lo cual se puede considerar meses o años consecutivos, donde comienza un déficit y donde finaliza la demanda de recurso.
- **Severidad o magnitud:** Es la acumulación del déficit que se encuentra por debajo del umbral de referencia durante un episodio de sequía.
- **Intensidad:** Es la máxima diferencia entre la curva de referencia durante un episodio seco, conocida como el punto más crítico que está definido por un umbral.
- **Extensión:** Es el área de la superficie total donde se presentó el déficit.

La representación gráfica de las definiciones anteriores se muestra en la **Figura 6.4**.

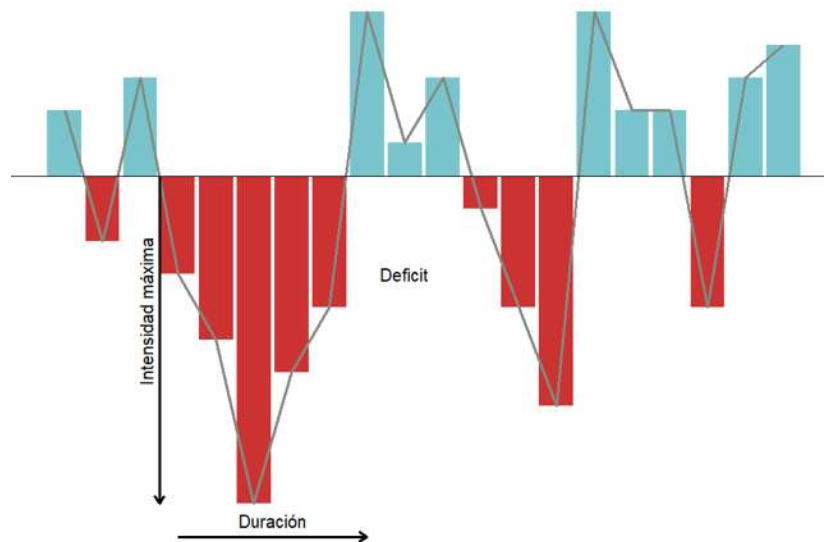


Figura 6.4 Caracterización de un periodo de sequía.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Índice de riesgo ante sequías

El IPCC (2022), define que el riesgo climático se entiende como el potencial de consecuencia adversas que surgen de las interacciones dinámicas entre los peligros relacionados con el clima, la exposición y la vulnerabilidad del sistema estado. En el caso de las sequías, esto implica que los impactos (daños y pérdidas) se materializan cuando un peligro de sequías coincide con elementos expuestos y con alta vulnerabilidad, por ellos, el riesgo se estima integrando la vulnerabilidad con los componentes que determinan la ocurrencia e intensidad del evento y la exposición.

6.3.1 Vulnerabilidad ante la sequía

En 1992, el IPCC definió la vulnerabilidad como el grado de incapacidad de hacer frente a las condiciones del cambio climático y el daño provocado en un sistema, teniendo en cuenta su sensibilidad y su capacidad de adaptarse a nuevas condiciones climáticas (Balica et al., 2009). Por lo que se considera como las condiciones más vulnerables de una región (Ortega-Gaucin et al., 2018).

Sin embargo, en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC (2022), la vulnerabilidad (**Figura 6.5**) se conceptualiza como el grado en que un sistema es propenso o susceptible a impactos adversos del cambio climático, en función de sus características intrínsecas y condiciones socioambientales. Esta vulnerabilidad está determinada por la sensibilidad del sistema ante los estímulos climáticos y por sus limitaciones en la capacidad de adaptación, es decir, en su habilidad para anticipar, afrontar, responder y ajustarse a los efectos del cambio climático, moderando daños potenciales y facilitando procesos de recuperación y adaptación.

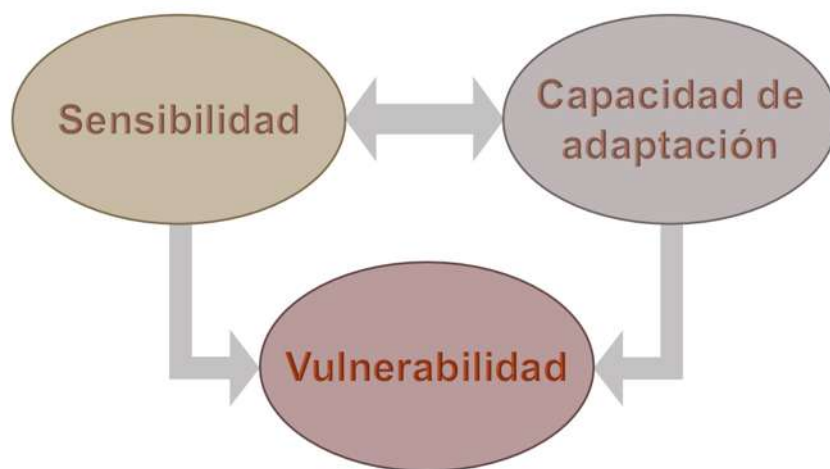


Figura 6.5 Diagrama de concepto de vulnerabilidad
Fuente. Adaptada de IPCC (2022).

En la **Ecuación 6.2** se presenta la formulación empleada para la estimación de la vulnerabilidad, en la cual se identifican explícitamente los factores que la componen.

$$V = f(S, CA)$$

Ecuación 6.2 Vulnerabilidad.
Fuente. Adaptada de IPCC (2022).

En el IPCC (2022), los indicadores para evaluar las condiciones climáticas se definen en dos aspectos:

- **Sensibilidad (S):** es el grado en que un sistema humano y natural se ve afectado por la variabilidad y el cambio climático. Refleja que tanto responden sus componentes ante un evento extremo y está asociado a condiciones que incrementan la susceptibilidad, como desigualdad, pobreza, dependencia de actividades climáticas, estructura demográfica y brechas de género u otras determinantes sociales.
- **Resiliencia o capacidad de adaptación (CA):** habilidad de los sistemas humanos y naturales para anticipar, absorber, afrontar y recuperarse de los impactos del cambio climático, así como para ajustar procesos y estructuras a fin de reducir daños, aprovechar

oportunidades y facilitar la transformación cuando sea necesaria. Esta condiciona por factores sociales, institucionales, económicos, culturales y político, incluyendo el acceso a recursos, gobernanza, capital humano, infraestructura y criterios de equidad.

En la **Tabla 6.2** se presentan las ecuaciones empleadas para la estimación de la vulnerabilidad, así como las definiciones conceptuales de sus componentes, de acuerdo con el IPCC.

Tabla 6.2 Evolución del concepto de vulnerabilidad y sus componentes según el IPCC (AR4, AR5 y AR6)

	AR4	AR5	AR6
	(IPCC, 2007)	(IPCC, 2014)	(IPCC, 2022)
	$V = f(E, S, CA)$	$V = f(S, CA)$	$V = f(S, CA)$
Vulnerabilidad	Es el grado en que un sistema es susceptible o incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos	Es la propensión o predisposición para verse afectado negativamente	Las características y condiciones de un sistema que lo hacen susceptibles a sufrir efectos adversos y limitan su capacidad de afrontar, responder y adaptarse al cambio climático
Exposición	Exposición en la naturaleza y grado en que un sistema está expuesto variaciones climáticas significativas		
Sensibilidad	Grado en que un sistema se ve afectado por estímulos climáticos	Es el grado en que un sistema a especie resulta afectado de forma adversas o beneficiosas, por la variabilidad o el cambio climático	Es el grado en que un sistema humano y natural de ajustarse al cambio climático para moderar daños potenciales, aprovechar oportunidades o afrontar consecuencias (factores de desigualdad, género, raza, ingresos)
Capacidad de adaptación	Habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático, moderar daños potenciales, aprovechar oportunidades o hacer frente a consecuencias	Es la capacidad de los sistemas y las personas para adaptarse al cambio climático, reduciendo daños, aprovechando oportunidades y enfrentando sus consecuencias.	Es la capacidad de los sistema humanos y naturales de ajustarse al cambio climático para moderar daños potenciales, aprovechar oportunidad o afrontar consecuencias (factores sociales, institucionales, culturas, políticos y de equidad)

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la investigación de Castellano (2021), presenta los modelos matemáticos más utilizados mundialmente para la obtención de la vulnerabilidad, considerando indicadores como la exposición, la sensibilidad y la resiliencia o capacidad de adaptación, tal como se muestran en la **Tabla 6.3**.

Tabla 6.3 Modelos matemáticos para el cálculo de la vulnerabilidad.

Autor	Descripción	Indicadores	Fórmula
Webb & Harinarayan (1999)	Analizó la vulnerabilidad ante de desnutrición y el desarrollo.	H = peligro o amenaza, CA = Capacidad de Adaptación.	$V = H - CA$
IPCC (2001)	Incorporó la definición operativa de la vulnerabilidad.	CA = Capacidad de Adaptación,	$V = CA - (S + E)$

Continúa

Luers et al. (2003)	Analizó la vulnerabilidad en los sistemas socioeconómico.	S = Sensibilidad, E = Exposición. SE = Sensibilidad al estrés, ERA = Estado relativo al umbral, POE = Probabilidad de ocurrencia de estrés.	$V = \frac{SE}{ERA \times POE}$
Me-Bar & Valdez (2005)	Incorporó el modelo utilizado por Zarafshani et al. (2012), donde evalúa la vulnerabilidad de la producción agrícola.	P = parámetro, W = Peso asignado a cada parámetro, C = es la suma de todos los parámetros derivado.	$V_i = \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{k_i} (P_j * W_j)$
Burg (2008)	Propuso el índice de vulnerabilidad crónica (IVC) para el análisis de una vulnerabilidad alimentaria.	E = Exposición al riesgo, I = Incapacidad para hacer frente.	$V = E + I$
Fontaine & Steinemann (2009)	Desarrolló a partir de la propuesta por el IPCC (2001) del para el análisis de una vulnerabilidad ante sequías.	E = Exposición, S = Sensibilidad, CA = Capacidad de Adaptación.	$V = \frac{E + S}{CA}$
(IPCC, 2014)	Modificó la definición de vulnerabilidad propuesta por el IPCC (2001).	S = Sensibilidad, CA = Capacidad de Adaptación.	$V = S - CA$
Ortega-Gaucin et al. (2018)	Propuso un índice de vulnerabilidad global ante sequías, desglosado en tres componentes: vulnerabilidad económica, social y ambiental, para permitir un análisis detallado a escala municipal.	IVG = índice de Vulnerabilidad Global, IVS = Índice de Vulnerabilidad Social, IVA = Índice de Vulnerabilidad Ambiental, IVE = Índice de Vulnerabilidad Económica.	$IVG = \frac{IVE}{3} + \frac{IVS}{3} + \frac{IVA}{3}$

Fuente. Adaptada de Castellano (2021).

6.3.1.1 Indicadores de vulnerabilidad

Existen distintas metodologías para el cálculo de la vulnerabilidad, ya que se manifiesta de manera diferente en diversas escalas y regiones. Los indicadores se utilizan para evaluar los efectos de la sequía en distintas regiones sociales (Mussetta et al., 2017). Por lo tanto, no existen guías universales que sean utilizadas para evaluar la vulnerabilidad (Mussetta et al., 2017). Por todo lo anterior, la evaluación de la vulnerabilidad depende de la información obtenida a partir de las estadísticas de las zonas de estudio.

Los indicadores se definen como las características geográficas, topográficas, meteorológicas, económicas, sociales, de infraestructura, salud, educación, seguridad, entre otras, con las que cuentan las regiones.

Las variables que propone Heltberg & Bonch-Osmolovskiy (2011), para el cálculo de vulnerabilidad como se muestra en la **Tabla 6.4**.

Tabla 6.4 Indicadores del Índice de vulnerabilidad.

Índice de Vulnerabilidad		
Índice		Indicadores
Exposición	Meteorológicos	Desviación estándar de la temperatura promedio mensual. Rango de temperatura media mensual máxima y mínima.

Continúa

Fuente. Adaptada de Heltberg & Bonch-Osmolovskiy (2011).

Tabla 6.5 Matriz de indicadores de vulnerabilidad.

Continua

Social	Población en condiciones de pobreza (\$).	Viviendas sin agua entubada (%).	Ingreso per cápita anual (dólares).
	Población sin derechohabiencia a servicios de salud (%)	Vivienda sin drenaje ni excusados (%)	Beneficio del Programa de Oportunidades (%).
	Población analfabeta (%)	Vivienda sin energía (%)	Beneficio del programa Liconsa (%).
		Vivienda con pisos de tierra (%)	Años promedio de escolaridad (adim.).
			Superficie reforestada (ha).
Ambiental	Grado de explotación de las cuencas (adim.).	Deforestación (% de área crítica forestada).	Áreas naturales protegidas (% de área).
	Grado de explotación de los acuíferos (adim.).	Superficie afectada por incendios forestales (ha).	

Fuente. Adaptada de Ortega-Gaucin et al. (2018).

6.3.2 El riesgo ante sequías

De acuerdo con Maskrey (1993), el riesgo se define como un fenómeno de origen natural o antropogénico que provoca un cambio significativo en el medio ambiente de una región determinada, la cual es vulnerable a dicho fenómeno.

En términos cuantitativos, el riesgo puede conceptualizarse como la interacción de tres componentes: el peligro (H) asociado a la ocurrencia e intensidad de un evento potencialmente dañino, la exposición (E) entendida como la presencia de personas, infraestructura o vienen en zonas susceptibles de verse afectadas, y vulnerabilidad (V) de dichos elementos expuestos, relacionada con su sensibilidad y su capacidad de adaptación. En concordancia, el IPCC (2022), define el riesgo como el potencial de consecuencias adversas para los sistemas humanos y ecológicos, derivado de la interacción entre peligro, exposición y vulnerabilidad, reconociendo la diversidad de valores y elementos expuestos. Con base en este enfoque, la relación conceptual se formaliza en la **Ecuación 6.3**.

$$R = f(H, V, E)$$

Ecuación 6.3 Definición de riesgo.

Fuente. Adaptada de IPCC (2022).

Entonces, se puede decir que el riesgo es la posibilidad de que ocurran daños o pérdidas en personas, comunidades o sus bienes debido a eventos perturbadores. Y que la amenaza es la probabilidad de que esos eventos ocurran en un lugar específico (Guevara et al., 2006). tal como se muestra en la **Figura 6.6**.

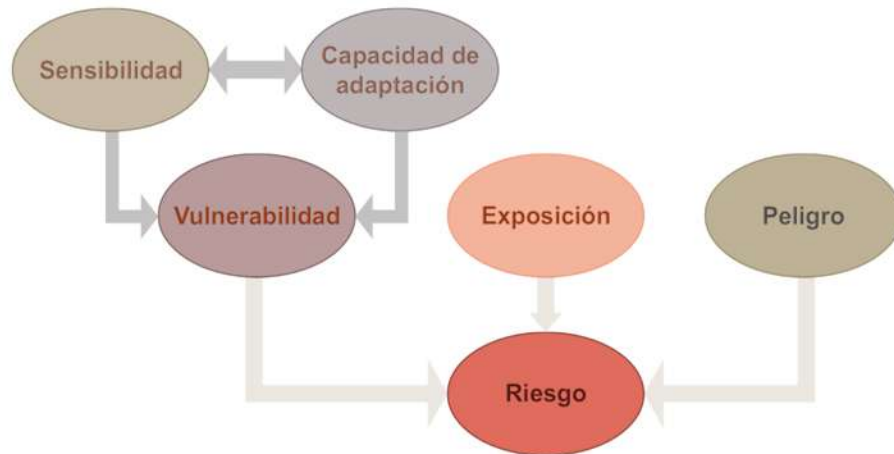


Figura 6.6 Definición del riesgo.
Fuente. Adaptada de IPCC (2022).

En la **Tabla 6.6** se presentan las ecuaciones empleadas para la estimación del riesgo, así como las definiciones conceptuales de sus componentes, de acuerdo con el IPCC.

Tabla 6.6 Comparación de definiciones de riesgo y vulnerabilidad en los informes del IPCC (AR4, AR5 y AR6).

AR4		AR5	AR6
(IPCC, 2007)		(IPCC, 2014)	(IPCC, 2022)
		$R = f(H, E, V)$	$R = f(H, E, V)$
Riesgo	No utiliza el concepto del riesgo	Se deriva de la interacción de los peligros relacionados con el clima con la vulnerabilidad y la exposición de los sistemas humanos y naturales	El potencial de consecuencia adversas para los sistemas humanos y ecológicos, reconociendo la diversidad de valores y objetos asociados
Vulnerabilidad	Es el grado en que un sistema es susceptibilidad o incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos	Es la propensión o predisposición para verse afectado negativamente	Las características y condiciones de un sistema que lo hacen susceptibles a sufrir efectos adversos y limitan su capacidad de afrontar, responder y adaptarse al cambio climático
Exposición	Exposición en la naturaleza y grado en que un sistema está expuesto variaciones climáticas significativas	Presencia de personas, medios de vida, ecosistemas, infraestructura o bienes en lugares	Es la presencia de personas, medios de vida, especies o ecosistemas, servicios, infraestructuras o bienes económicos, sociales o culturales en lugares y contextos que podrían verse afectados negativamente.
Peligro	(No utiliza el concepto). Es la posibilidad de que ocurra un fenómeno físico, natural o humano, capaz de provocar pérdidas de vidas, daños a la salud, afectaciones en bienes, infraestructura, medios de vida, servicios y recursos ambientales.	Fenómeno o tendencia climática con potencial dañino	El potencial de ocurrencia de un fenómeno físico, evento o tendencia relacionados con el clima que pueden causare impactos adversos

Fuente. Elaboración propia.

Los modelos matemáticos para la obtención del riesgo consideran variables como el peligro y la vulnerabilidad. En el trabajo de Castellano (2021), (Tabla 6.7) presenta los modelos más utilizados a nivel mundial y que han sido aceptados por el IPCC (2014).

Tabla 6.7 Modelos matemáticos para el cálculo del riesgo.

Autor	Formula	Indicadores
Yen (1970)	$R = 1 - P(X \leq x)^n$	Probabilidad acumulada, n el número de años.
UNDRO (1979)	$R_t = E \times RS = E \times (A \times V)$	R_t = riesgo total, E = Exposición, RS = Riesgo Especifico, A = Amenaza, V = Vulnerabilidad.
Romieu et al. (2010)	$R_{ahd} = H_{ahd} \times E_{ad} \times V_{ahd}$	R_{ahd} = Riesgo, E = Exposición, V = Vulnerabilidad. Donde “ h ” es el tipo de peligro y “ a ” es la región geográfica afectada por el peligro, “ d ” es un día determinado en un periodo de tiempo cuando se produce el desastre.
Burg (2008)	$R = V + H$	R = Riesgo, V = Vulnerabilidad, H = amenaza.
Ortega-Gaucin et al. (2018)	$IR = P \times IVG$	IR = Índice de Riesgo por Sequías, P = Probabilidad de ocurrencia de sequía, IVG = Índice de Vulnerabilidad Global ante Sequías.

Fuente. Adaptada de Castellano (2021).

6.4 Medidas de adaptación y mitigación

Después de evaluar el peligro, la vulnerabilidad y la exposición a fenómenos perturbadores, es crucial crear escenarios de riesgo que muestren geográficamente los efectos de la sequía. Esto ayuda a planificar y priorizar acciones de mitigación y prevención de desastres (Guevara et al., 2006).

Las sociedades han lidiado con los impactos del clima y el tiempo desde tiempos anteriores. No obstante, se requerirán acciones adicionales de adaptación para disminuir los efectos negativos previstos del cambio y la variabilidad climática, independientemente de las medidas de mitigación que se adopten en los próximos años. Además, otros factores de estrés pueden agravar la vulnerabilidad a la sequía (IPCC, 2007).

Las mediciones de la eficacia y eficiencia de las entidades gubernamentales, junto con la disponibilidad de recursos para implementar medidas de mitigación, son cruciales para controlar el riesgo frente a desastres naturales y situaciones de emergencia (Casillas, 2023). Las evidencias del cambio climático indican que las alteraciones en el clima son inevitables, incluso si se dejan de emitir Gases de Efecto Invernadero (GEI). La temperatura global seguirá aumentando debido a los gases ya atrapados en la atmósfera. Por lo tanto, aunque la mitigación sigue siendo importante,

la adaptación a estos cambios climáticos se vuelve esencial. La sociedad debe prepararse para enfrentar y adaptarse a los impactos del cambio climático (González & Meira, 2020).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2013), algunas medidas de mitigación para disminuir los efectos negativos ante sequías se clasifican en estructurales, no estructurales, recreativas, preventivas y opcionales **Tabla 6.8**.

Tabla 6.8 Medidas de Mitigación.

Medidas de mitigación		
Rama	Descripción	Medidas
Estructurales	Son aquellas que ayudan a controlar, almacenar y distribuir agua para la optimización de los recursos hídricos en época de sequía. Son estructuras costosas y no son la solución para evitar las sequías.	Construcción de presas, tanques de almacenamiento, sistemas de abastecimiento, plantas de tratamientos de agua negra, perforación de pozos, canales revestidos y sistemas de irrigación.
No estructurales	Son medidas preventivas para la adaptación antes y durante los periodos de sequías y disminuir sus efectos negativos.	Medidas socioeconómicas, legales e implementación de reglamentos sobre el uso del agua.
Recreativas	Son medidas que se implementan durante el periodo de sequía, e implementa que la comunidad actúe ante el fenómeno.	Medidas sobre la limitar la dotación de agua hacia la comunidad y la agricultura, implementación de programas de emergencias para agricultores y ganaderos, redistribuir el agua a las diferentes actividades, teniendo como prioridad el consumo doméstico.
Preventivas	Se implanta antes de época de sequía por medio de la cultura del agua.	Reducción de la cantidad de agua para la agricultura y ganadería, implementación de programas de supervisión de contaminantes en ríos.
Opcionales	Para la reducción de los efectos negativos de la sequía.	Abastecimiento de agua en sitios más alejados, desalinización de agua del mar y lluvia artificial

Fuente. Adaptado de CONAGUA (2013).

La definición del término “mitigar” va más allá del solo "aliviar". Se trata de reducir la vulnerabilidad de una zona, ayudándola a ser más capaz de adaptarse y enfrentar los efectos de los cambios ambientales, ya sean naturales o provocados por el hombre. El objetivo es fortalecer a la comunidad, haciéndola más resiliente y autónoma, y mejor preparada para manejar los riesgos (Maskrey, 1993).

El Grupo Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático (IPCC, 2007), proporciona algunas medidas de mitigación en los distintos sectores (**Tabla 6.9**).

Tabla 6.9 Medidas de mitigación en diversos sectores.

Sector	Tecnologías y prácticas de mitigación.	Políticas, medidas e instrumentos
Suministro de energía	Mejorar el suministro y la distribución de energía, usar gas en lugar de carbón, y optar por energías renovables y nucleares. También es importante combinar calor y electricidad y utilizar tecnologías para capturar y almacenar dióxido de carbono.	Reducción de subvenciones a los combustibles fósiles, impuestos al carbono sobre estos combustibles, aranceles para tecnologías de energía renovable, requisitos de energías renovables, y apoyo financiero a los productores.
Transporte	Mejorar la eficiencia de los vehículos, usar híbridos y diésel más limpios, y optar por biocombustibles. Fomentar el transporte público, trenes, y medios no motorizados como bicicletas y caminar es crucial. También es esencial planificar el uso del suelo y el transporte, y desarrollar biocombustibles de segunda generación, aeronaves más eficientes, y vehículos eléctricos e híbridos con baterías avanzadas.	Mejorar la eficiencia del combustible y usar biocombustibles en el transporte por carretera, cumplir con normativas de emisiones de CO ₂ , aplicar impuestos a vehículos y combustibles, y tarifas para carreteras y estacionamientos. Además, influir en la movilidad con regulaciones del uso del suelo, planificación de infraestructuras, y promover transporte público y no motorizado.
Edificios	Optimización en iluminación con luz natural y bombillas eficientes, usar aparatos eléctricos, calefacción y refrigeración más eficaces, y mejorar quemadores de cocina y aislamiento. También podemos diseñar sistemas solares para calefacción y refrigeración, emplear fluidos de refrigeración alternativos y reciclar gases fluorados. Los edificios comerciales pueden incorporar tecnologías como sensores inteligentes y energía solar fotovoltaica.	Programas de liderazgo del sector público, y en particular compras
Industria	Mejorar la eficiencia de equipos eléctricos, recuperar calor y energía, reciclar materiales, controlar emisiones de gases distintos al CO ₂ con tecnologías industriales específicas, y promover la eficiencia energética avanzada, incluyendo la captura y almacenamiento de dióxido de carbono en sectores como la fabricación de cemento, amoníaco y hierro, además del uso de electrodos inertes en la producción de aluminio.	Suministro de información de referencia, normas de calidad operativa, incentivos fiscales, permisos comerciales y acuerdos voluntarios.
Agricultura	Mejorar la gestión de tierras agrícolas para almacenar más carbono en el suelo, restaurar suelos y tierras, mejorar la aplicación de fertilizantes para reducir emisiones de óxido nitroso, promover cultivos especializados como alternativas a combustibles fósiles, y aumentar tanto la eficiencia energética como el rendimiento de los cultivos.	Incentivos financieros y regulaciones para mejorar la gestión de tierras, conservar el carbono en el suelo, y promover el uso eficiente de fertilizantes y la irrigación.
Bosques	Plantar árboles, gestionar bosques de forma sostenible, reducir la deforestación, usar productos forestales para biocombustibles en lugar de fósiles, mejorar especies para más biomasa y captura de carbono, y avanzar en teledetección para evaluar captura de carbono en vegetación y suelos, y cambios en uso del suelo.	Incentivos financieros para expandir bosques, reducir deforestación y gestionar tierras, junto con regulaciones sobre uso del suelo y su cumplimiento.
Desechos	Captura de metano en vertederos, quemar residuos para energía, compostar desechos orgánicos, tratar aguas residuales, reciclar y reducir desechos, y utilizar biocubiertas y biofiltros para gestionar mejor el metano.	Incentivos financieros para mejorar la gestión de residuos y aguas residuales, promoción de energías renovables mediante incentivos u obligaciones, y regulación de la gestión de residuos.

Fuente. Adaptado de IPCC (2007).

La sociedad enfrenta la necesidad de adaptarse a los efectos adversos de las sequías cuando no se implementan medidas de mitigación. La adaptación implica tomar medidas y realizar ajustes en sistemas humanos o naturales en respuesta a los impactos a las sequías, tanto previstos como actuales, los cuales pueden resultar en daños (ENCC, 2013).

Considerando la vulnerabilidad actual, se pueden sugerir medidas de adaptación para minimizar el impacto de la sequía (Martínez et al., 2004). Es crucial reconocer los riesgos climáticos para fortalecer las acciones de adaptación y mitigación, pasando de la urgencia a una acción efectiva y oportuna. La implementación de estas medidas depende de factores como la gobernanza, los recursos financieros, el conocimiento, la capacitación y la tecnología disponibles (IPCC, 2022).

En la **Tabla 6.10**, se presentan los criterios para la elección de medidas de adaptación de acuerdo con las Estrategia Nacional del Cambio Climático ENCC (2013), considerando aspectos como ambientales, sociales y económicos.

Tabla 6.10 Criterios para la elección de medidas de adaptación

Criterio	Descripción
Atención a población más vulnerable.	Brindar apoyo a las comunidades que son más susceptibles a los impactos del cambio climático.
Transversalidad con políticas, programas o proyectos	Concientizar con los diversas políticas y programas relacionados con el cambio climático, como la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) y otros programas a nivel estatal, municipal y sectorial.
Fomentar la prevención	Preparación anticipada para la adaptación, enfocándose en la prevención antes que en la respuesta reactiva.
Sustentabilidad en el aprovechamiento y uso de los recursos naturales.	Fomentar el uso sostenible de recursos naturales como el agua, el suelo y los recursos bióticos.
Conservación de los ecosistemas y su biodiversidad	Preservación y restauración de ecosistemas y sus servicios para mejorar la resiliencia al cambio climático y detener el deterioro ambiental.
Participación de la población objetivo y fortalecimiento de capacidad	Participación en todas las etapas del proceso, aportando su conocimiento y experiencia, y se apropia de la medida.
Fortalecimiento de capacidades para la adaptación	Fortalecimiento de las capacidades individuales, grupales y en redes para adaptarse al cambio climático.
Factibilidad	Capacidad institucional, financiera, política, normativa, técnica y social necesaria para implementarla y mantener su efectividad a largo plazo.
Costo-beneficio	El costo bajo en relación con su efectividad y los beneficios que proporciona para reducir la vulnerabilidad.
Coordinación entre sectores	Promover la coordinación entre diversos sectores e instituciones de los tres niveles de gobierno, la academia y la sociedad civil.
Flexibilidad	Adaptación sobre las necesidades específicas y genera beneficios bajo cualquier escenario de cambio climático.
Monitoreo y evaluación	Planes para monitorear y evaluar su impacto, utilizando indicadores estratégicos centrados en su cumplimiento y efectividad.

Fuente. Adaptado de ENCC (2013).

7 Antecedentes

En primer lugar, Cáceres (2001), implementó una metodología en la microcuenca Los Naranjos, en Honduras, para evaluar la vulnerabilidad a desastres naturales como las sequías, considerando diez tipos de vulnerabilidad: social, ideológica, cultural, física, ecológica, técnica, económica, institucional, política y educativa.

Posteriormente, Gómez (2003), evaluó el impacto y los niveles de vulnerabilidad en comunidades locales en la cuenca del río Agua Caliente en Nicaragua. Este estudio utilizó indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, y propuso estrategias para reducir la vulnerabilidad mediante una mejor coordinación entre instituciones y comunidades.

A escala estatal, en Michoacán, Cerano-Paredes et al. (2013), analizó el Parque Nacional Pico de Tancítaro, en cual es clave para los acuíferos del oeste de Michoacán, identificando sequías severas y el impacto de la erupción del volcán Parícutín en 1943.

Años más tarde, Shiferaw et al. (2014), estudiaron los efectos de la sequía en la agricultura y la economía del África, una región altamente susceptible a este fenómeno, afectando la salud y el desarrollo. Se evaluaron estrategias de gestión con un enfoque en soluciones tecnológicas, institucionales y políticas.

Por otro lado, Udmale et al. (2014), analizaron los impactos de la sequía en comunidades agrícolas de Maharashtra, India, revelando que la sequía reduce el rendimiento agrícola, provoca pérdidas de empleo e ingresos y genera problemas sociales y ambientales. A pesar de conocer opciones de adaptación, éstas no son ampliamente adoptadas y las medidas gubernamentales resultan insuficientes.

Posteriormente, Ortiz & Ortega (2015), evaluaron la agricultura en Michoacán, región que enfrenta alto riesgo de sequía meteorológica. Con más de 30 años de datos de precipitación, evidenciaron que el cambio climático podría dañar significativamente la economía agrícola local.

Asimismo, Herrera & Briones (2016), estudiaron las percepciones locales en Tancítaro, Michoacán, sobre amenazas hidrometeorológicas como heladas, granizadas y sequías, identificando su impacto en la producción de aguacate.

Otro trabajo relevante es el de Ortega-Gaucin et al. (2016), quienes evaluaron la vulnerabilidad ante sequías en Sonora a partir de indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, identificando municipios más vulnerables económica, social y ambientalmente.

En la misma línea, Pineda-Pablos & Salazar-Adams (2016), revisaron las principales estrategias contra la sequía en México, destacando su impacto en infraestructura y gestión del agua.

Por su parte, Arreguín-Cortés et al. (2016), analizaron la sequía de 2010-2012 en México, impulsando un cambio hacia la prevención y gestión del riesgo con la creación del Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose) y nuevas estructuras legales e institucionales.

Más adelante, Castillo-Castillo et al. (2017a), estudiaron la sequía en la cuenca del río Fuerte, en el noroeste de México, entre 1961 y 2012, utilizando SPI y SPEI. Encontraron un aumento en la frecuencia, intensidad y duración de las sequías en las últimas décadas.

A escala nacional, Ortiz-Gómez et al. (2018a), analizaron la evolución de las sequías en Zacatecas, México, entre 1961 y 2012. Identificaron periodos secos como 1982-1983, 1998-2000 y 2010-2012. El SPI detectó menos eventos en escalas cortas, mientras que SPEI y RDI captaron más eventos extremos.

A escala nacional, en conjunto con el Instituto Mexicano de Tecnología del agua y Ortega-Gaucin et al. (2018), analizaron la vulnerabilidad, por medio de los índices de vulnerabilidad ambiental, social y económica, para obtener la vulnerabilidad global a escala municipal. Representó los estados y municipios más vulnerables a la sequía, localizados en el norte de México caracterizados por ser zonas áridas y al sur del país presentando una alta vulnerabilidad a la sequía.

En el mismo año, Campos-Aranda (2018b), estudió 32 registros de precipitación anual en San Luis Potosí para clasificar climas (árido, semiárido, subhúmedo y húmedo) y detectar sequías meteorológicas, cuantificando su frecuencia e intensidad.

Por otro lado, Wang et al. (2019), analizaron las sequías severas en Estados Unidos, destacando la de 2012 como la de mayor intensidad en los últimos años, y resaltaron la evolución de medidas de mitigación y adaptación en la gestión del recurso hídrico.

En India, Ojha et al. (2021), estudiaron la sequía meteorológica en la cuenca del río Punpun entre 1991 y 2020. Identificaron que los periodos 2004-2006 y 2009-2010 fueron críticos, con mayor intensidad y duración de sequías después de 2004.

Asimismo, Su et al. (2021), evaluaron el impacto del cambio climático en las sequías en China utilizando modelos climáticos CMIP6 y CMIP5. El análisis con SPEI a 12 meses mostró que en escenarios de mayores emisiones aumentará la frecuencia e intensidad, especialmente en las cuencas del Yangtsé y el río Perla.

Un trabajo más reciente, Castellano (2021), desarrolló una metodología para evaluar vulnerabilidad, exposición y riesgo por sequía en las áreas metropolitanas de Monterrey y Guadalajara, concluyendo que estas áreas son muy sensibles a las sequías y que la metodología es aplicable a otras zonas urbanas.

En la evaluación de las sequías, Isia et al. (2022), estudió las sequías en Sarawak, Malasia, mediante los índices *SPI* y *SPEI*. Este estudio examinó periodos de sequía usando datos mensuales de precipitación y temperatura. Ambos índices detectaron variaciones temporales de sequía en diferentes escalas. El *SPEI* identificó sequías más severas a largo plazo y moderadas a corto plazo, destacando la importancia de la temperatura.

En Etiopía, Worku (2024), analizó la sequía en la zona semiárida de Borana desde 1981 hasta 2018, usando SPI y SPEI. Identificó años secos como 1984, 1985, 1992, 1999, 2000, 2001 y 2011, revelando sequías moderadas a extremas.

Por su parte, Zhou et al. (2023), evaluó las sequías meteorológicas a nivel global y proyectó su riesgo futuro para 2021-2100 bajo escenarios SSP. Encontró que el riesgo aumentará significativamente, especialmente en Asia, el Mediterráneo, América Central y África ecuatorial.

Otro trabajo importante, Wang et al. (2023), proyectó un aumento del riesgo de sequías para 2050 debido al cambio climático y al desarrollo socioeconómico, destacando la Amazonia y el centro-oeste de EE. UU. como regiones altamente vulnerables.

Asimismo, Martínez-Sifuentes et al. (2023), analizaron el cambio climático en la cuenca del río Sardinias, Durango, evaluando evapotranspiración y caudales bajo diferentes escenarios SSP.

Por otro lado, Ramírez-Sánchez & Fajardo-Montiel (2024), realizaron un análisis de cambio climático en los bosques de México, evaluando temperatura, precipitación, sequías, humedad del suelo y vegetación mediante proyecciones regionales basadas en el IPCC AR6.

En Uzbekistán, Rakhmatova et al. (2024), analizaron el efecto del cambio climático en las sequías mediante conjuntos multimodelo CMIP5 y CMIP6. El SPEI confirmó una intensificación de las sequías, sirviendo como base para la planificación hídrica y socioeconómica.

A escala estatal, Flores (2022), aplicó una metodología para evaluar vulnerabilidad y riesgo ante el cambio climático en Morelia, Michoacán, evidenciando su alta vulnerabilidad y la necesidad de implementar medidas de adaptación.

Finalmente, Khazaei (2025), evaluó las sequías en Teherán mediante proyecciones de modelos CMIP6 bajo escenarios SSP-RCP, mostrando que serán más frecuentes, prolongadas y severas, resaltando la necesidad de estrategias de gestión basadas en modelos climáticos confiables.

Por último, Velázquez-Zapata & Dávila-Ortiz (2025), analizaron las regiones hidrológicas de México, evaluando la frecuencia y severidad de las sequías meteorológicas mediante proyecciones CMIP6 y el SPI bajo escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

8 Materiales y métodos

La metodología propuesta para el desarrollo de este trabajo de investigación se establece en la **Figura 8.1**.

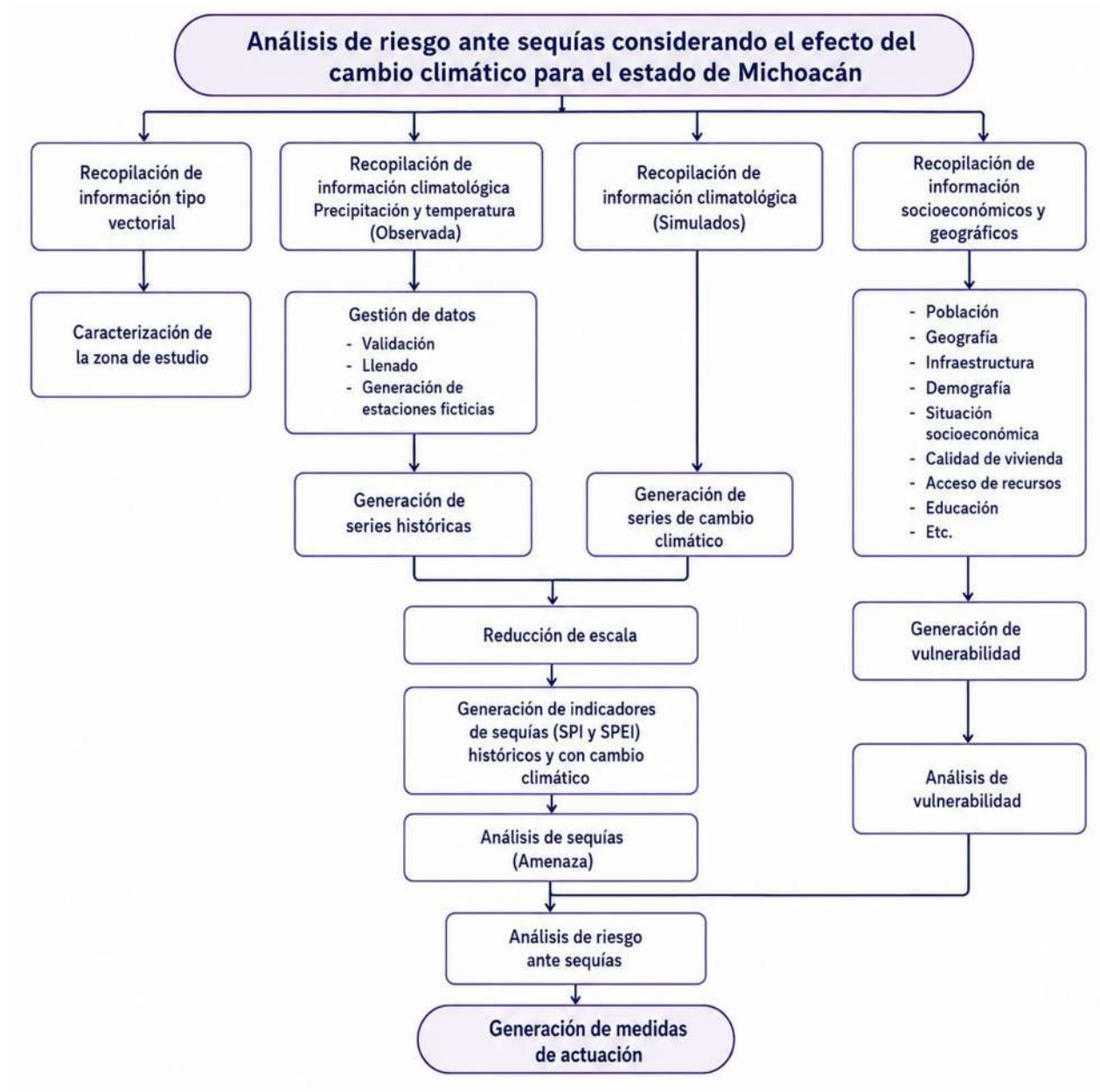


Figura 8.1 Metodología aplicada.
Fuente: Elaboración propia.

8.1 Gestión de datos

Para el desarrollo de esta investigación, se propone la recopilación de información climatológica disponible en la zona de estudio. Esta recopilación de datos incluirá información meteorológica de dos tipos:

- 1. Información climatológica observada:** Estos datos son obtenidos a través de estaciones meteorológicas y otros sistemas de monitoreo que registran las condiciones climáticas reales en las diferentes regiones.

Información climatológica simulada: Se utilizarán modelos climáticos con información simulada. Estos modelos permiten proyectar los cambios en las condiciones climáticas futuras bajo diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otras variables ambientales.

8.1.1 Información climatológica observada

La información climatológica se compone de registros históricos detallados de la zona de estudio, obtenidos de la base de datos del Sistema de Información Hidrológica (SIH, 2025) administrada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025). Esta base de datos es una herramienta que recopila y almacena datos climatológicos históricos. Entre los datos se incluyen registros de precipitación, evapotranspiración y temperatura máxima, mínima y media.

8.1.1.1 Preselección de estaciones

Para llevar a cabo el análisis en la zona de estudio, es necesario seleccionar y validar un conjunto de estaciones meteorológicas. Para esta selección, se consideraron los siguientes criterios: los años continuos de información, el año final de servicio y la proximidad al centro de gravedad de la cabecera municipal.

8.1.1.2 Selección de estaciones

La aplicación de estas pruebas permitirá detectar y, en su caso, corregir inconsistencias en los registros, garantizando así la confiabilidad de la información empleada en los análisis posteriores. Entre las pruebas estadísticas que se utilizarán se incluyen las siguientes:

- Pruebas de independencia
 - Límites de Anderson (Anderson, 1942).
- Pruebas de homogeneidad
 - t – Student (OMM, 1966);
 - Cramer (OMM, 1966);
 - Secuencias (Mather, 1975);
 - Helmert (Doorembos, 1976).

No obstante, la información meteorológica en México presenta con frecuencia inconsistencias en las series de datos, principalmente asociadas a la presencia de registros faltantes, los cuales pueden originarse por fallas operativas, problemas de mantenimiento o interrupciones en el funcionamiento de las estaciones meteorológicas. En consecuencia, resulta necesario aplicar técnicas de estimación de datos que permitan disponer de registros continuos, consistentes y estadísticamente confiables para su uso en los análisis posteriores.

8.1.1.3 Estimación de datos faltantes

El método de Inverso de la Distancia Euclidiana al Cuadrado (IDW) (Li et al., 2018), se utiliza para estimar valores de datos faltantes basándose en la proximidad de estaciones cercanas. Este método asigna mayor peso a los puntos más cercanos a la ubicación del dato faltante, permitiendo así una estimación más precisa. El uso de *IDW* facilita la generación de series continuas de datos meteorológicos.

8.1.1.4 Generación de estaciones ficticias

Para los municipios que no cuentan con estaciones meteorológicas, se generará una estación ficticia ubicada en las localidades. Esta estación ficticia se creará mediante extrapolación por el método *IDW* (Li et al., 2018), utilizando datos de estaciones cercanas para obtener que cada municipio cuenten con información meteorológica completa y continua.

8.1.2 Información climatológica proyectada

Para la extracción y análisis de la información climática se utiliza la plataforma *Copernicus Climate Change Service* (C3S), que cuenta con un Atlas Climático Interactivo (Copernicus, 2025). Esta herramienta permite visualizar y trabajar con distintos modelos climáticos acoplados que forman parte del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), un esfuerzo

internacional coordinado por el World Climate Research Programme (WCRP), cuyo objetivo es mejorar la comprensión del sistema climático global y sus posibles cambios futuros (IPCC, 2022).

En este estudio, el modelo seleccionado para el análisis corresponde al multimodelo (o ensamble multimodelo). El multimodelo se define como la integración de las simulaciones de varios modelos climáticos con el propósito de obtener una representación más robusta de las señales climáticas y reducir la incertidumbre asociada a usar un solo modelo, al incorporar la variabilidad entre modelos (Tebaldi & Knutti, 2007).

Para la información proyectada se consideran los periodos 2020 – 2050 (corto plazo) y 2070 – 2100 (largo plazo), bajos los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5. Para el análisis comparativo, se utiliza como periodo histórico 1850 – 2020, lo que permite evaluar los cambios en función de las concentraciones pasadas y futuras de GEI, en particular las emisiones de CO₂.

8.1.2.1 Reducción de escala

La información climatológica se somete a un tratamiento mediante la reducción de escala (downscaling). Este proceso tiene como objetivo ajustar la información climatológica simulada para que se aproxime a la observada. Para lograr esto, se emplea una variedad de métodos estadísticos, entre los cuales destaca el método Delta (delta downscaling).

Sea X una variable climática, ya sea precipitación (P) o temperatura (T). el método Delta estima, para cada mes m , el cambio entre un periodo futuro y un periodo base a partir del método climático, y transfiere dicho cambio a la serie observadas del periodo base (Kilsby et al., 2007). En este trabajo, el ajuste se realiza mediante un esquema aditivo para temperaturas (**Ecuación 8.1** y **Ecuación 8.2**) y multiplicativo para precipitación (**Ecuación 8.3** y **Ecuación 8.4**)

Para variables tipo temperatura como es (T_{max} , T_{min} , T_{media}):

$$\Delta T_m = \bar{T}_{fut,m}^{mod} - \bar{T}_{base,m}^{mod}$$

Ecuación 8.1 Factor de cambio mensual de temperatura entre periodo base y proyectada.

Fuente. Tomado y modificado de Rasmussen et al. (2012).

Y la serie futura corregida se obtiene como:

$$T_{fut}^{\Delta}(t) = T_{base}^{obs}(t) - \Delta T_{m(t)}$$

Ecuación 8.2 Proyección corregida de temperatura aplicada.

Fuente. Tomada y modificado de Rasmussen et al. (2012).

Donde:

$T_{fut}^{\Delta}(t)$: temperatura corregida (escenario futuro) en el tiempo t .

$T_{base}^{obs}(t)$: temperatura observada en el periodo base, en el tiempo t .

$\Delta T_{m(t)}$: cambio (delta) mensual de temperaturas para mes m (en °C).

$\bar{T}_{fut,m}^{mod}$: promedio mensual de temperatura del modelo en el periodo futuro, para el mes m .

$\bar{T}_{base,m}^{mod}$: promedio mensual de temperatura del modelo en el periodo base, para el mes m .

$m(t)$: función que asigna el instante t el mes calendario correspondiente (1 a 12).

t : índice temporal

Para la precipitación, el método Delta puede aplicarse de forma multiplicativa:

$$\Delta P_m = \frac{\bar{P}_{fut,m}^{mod}}{\bar{P}_{base,m}^{mod}}$$

Ecuación 8.3 Factor de cambio mensual de precipitación entre periodo base y proyectado

Fuente. Tomado y modificado de Rasmussen et al. (2012).

$$P_{fut}^{\Delta}(t) = P_{base}^{obs}(t) - \Delta P_{m(t)}$$

Ecuación 8.4 Proyección corregida de precipitación.

Fuente. Tomado y modificado de Rasmussen et al. (2012).

Donde:

$P_{fut}^{\Delta}(t)$: precipitación corregida (escenario futuro) en el tiempo t (mm).

$P_{base}^{obs}(t)$: precipitación observada en el periodo base, en el tiempo t (mm).

$\Delta P_{m(t)}$: cambio (delta) mensual de precipitación para mes m (mm).

$\bar{P}_{fut,m}^{mod}$: promedio mensual de temperatura del modelo en el periodo futuro, para el mes m .

$\bar{P}_{base,m}^{mod}$: promedio mensual de precipitación del modelo en el periodo base, para el mes m .

8.2 Indicadores de sequías

8.2.1 Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

Se propone utilizar el indicador de sequías *SPEI* para el análisis de sequías mediante el software RStudio. Para este propósito, se empleará la paquetería “spei” desarrollada por Vicente-Serrano et al. (2010b) junto con un conjunto de paqueterías adicionales que complementarán el análisis. El cálculo y la evaluación del *SPEI* se realizará a partir de series de 30 años consecutivos de información, con el fin de contar con una base temporal suficientemente representativa para la estimación e interpretación del índice.

8.2.1.1 Caracterización de sequías

La evaluación de las sequías se centrará en aspectos clave como la duración de los eventos, su intensidad, severidad y la extensión de su impacto en las diferentes regiones. Para llevar a cabo este análisis, se aplicará una metodología específica diseñada para calcular y analizar estos parámetros como es el caso de Mckee et al. (1993), Kavalieratou et al. (2012), Campos-Aranda (2013), Ortiz-Gómez et al. (2018b), eNúñez-López et al. (2007) y Byun & Wilhite (1999).

8.3 Índice de riesgo ante sequías

Para el cálculo del riesgo, se desarrolló en secuencia de etapas orientadas a la construcción de índices compuestos. Siguiendo el marco conceptual del IPCC (2022).

La metodología se estructura de forma jerárquica y secuencial en dos etapas: a) estimación del índice de vulnerabilidad (V) y b) estimación del índice de riesgos (R).

A continuación, se describen los pasos empleados para la obtención de la vulnerabilidad y el riesgo ante sequías.

- 1. Recopilación de información:** Se recopilaron y organizaron variables de carácter ambiental, meteorológico, social, económico, educativo y de salud, entre otras, ajustadas a la disponibilidad y características de la zona de estudio.
Los indicadores se recopilaron con base en la información disponible de la zona de estudio y en la metodología propuesta por Flores (2022) y en combinación con parámetros establecidos por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Ortega-Gaucin et al., 2018), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) en conjunto con el Panorama Sociodemográfico de México 2020 (INEGI, 2020) y el Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo (INEGI, 2017)(INEGI, 2017)(INEGI, 2017). Estos documentos proporcionan información necesaria para el análisis detallado para evaluación de la vulnerabilidad.
- 2. Selección de indicadores:** Se realizó un análisis de correlación de Pearson con el propósito de identificar relaciones lineales entre los indicadores y detectar posibles redundancias de información. A partir de los coeficientes de correlación, se identificaron los pares (o grupos) de variables con mayor asociación. Se consideró alta correlación cuando el coeficiente fue mayor a 0.95 ($|r| \geq 0.95$). En estos casos, los indicadores altamente correlacionados se eliminaron para evitar duplicidad de información o, cuando fue metodológicamente pertinente, se integraron en un solo indicador mediante una variación compuesta.

3. **Estandarización de los indicadores:** Dado que los indicadores presentan distintas unidades y escalas, se realizó la estandarización de las variables antes de su integración en índices compuestos, con el fin de asegurar su comparabilidad entre ellos. (J. Rodríguez & Ugalde, 2021).

4. **Ponderación de los indicadores:** Una vez depurados y estandarizados los indicadores, se aplicó Análisis de Componentes Principales.

El **Análisis de Componentes Principales** (PCA, por sus siglas en inglés).

Varios autores como son Lozares et al. (1991), Martín et al. (1994), Pérez et al. (2009), Domínguez et al. (2010), mencionan que es una técnica de estadística multivariada, de carácter descriptivo, ampliamente utilizado cuando se trabaja con grandes conjuntos de datos. Su objetivo es reducir la dimensionalidad, transformando un conjunto de **p** variables originales en un número menor de nuevas variables llamadas componentes principales, construidas como combinaciones lineales de las variables originales, y ordenadas de forma que los primeros componentes concentren la mayor proporción de la variabilidad (información) del sistema.

El PCA permite reducir la información esencial del conjunto de variables, Sin embargo, cuando existen variables altamente relacionadas, tienden a aportar prácticamente la misma información, generando redundancia y colinealidad. Esto dificulta identificar que variables “aportan más”, porque se mueven juntas, y pueden producir sobrerrepresentación de una misma dimensión si se incluyen varias variables casi equivalentes en un índice compuestos. Por lo contrario, variables con baja correlación entre si suelen representar dimensiones distintas del fenómeno (información independiente), por lo que aporta masa un índice: amplía el contenido informativo sin duplicarlo. En cambio, incorporar indicadores altamente correlacionados suele añadir poca información nueva y puede introducir “ruido” en la construcción e interpretación del índice.

Para la investigación, se utilizará el software RStudio y la paquetería "FactoMineR" (Lê et al., 2008) para obtener la contribución de las diferentes variables que componen la vulnerabilidad. Esta herramienta permitirá analizar cómo cada variable afecta a los resultados principales.

5. **Ajuste de los índices.** El autor Ortega-Gaucin et al. (2018), propone con el propósito de categorizar los índices de vulnerabilidad, se realiza un ajuste a una distribución de probabilidad beta. Esta elección se justifica porque el índice toma valores en el intervalo de (0,1) y, además, la distribución beta es flexible para describir formas sesgadas, características comunes en indicadores normalizados. El procedimiento se realizó siguiendo la metodología propuesta por Iyengar & Sudarshan (1982) mencionada por Ortega-Gaucin et al. (2018).
6. **Clasificación de índices.** Con el fin de facilitar la interpretación espacial de los índices, los calores se clasifican en cinco categorías mediante el uso de percentiles, siguiendo un criterio de participación en intervalos de 20 puntos conforme a la **Tabla 8.1**. Este enfoque

permite representar el riesgo de forma estandarizada y comparable. La clasificación ha sido aplicada en trabajo similares como es en Ortega-Gaucin et al. (2018).

Tabla 8.1 Clasificación del nivel de riesgo.

	Clasificación	Valor de percentil
	Muy baja	$0 < I < 20$
	Baja	$20 < I < 40$
	Media	$40 < I < 60$
	Alta	$60 < I < 80$
	Muy alta	$80 < I < 100$

Fuente: Adaptada de Ortega-Gaucin et al. (2018).

8.3.1 Cálculo del Índice de vulnerabilidad

La vulnerabilidad (V) se estimó en función de la sensibilidad (S) y la capacidad de adaptación (CA), conforme a la **Ecuación 8.5**. Para la aplicación del índice, se obtuvieron ponderaciones (m, n) mediante el *PCA*, con el fin de representar la contribución relativa de cada indicador en la construcción del índice.

$$V = f(m S + n (1 - CA))$$

Ecuación 8.5 Vulnerabilidad ante sequías.

8.3.2 Cálculo del Índice de riesgo por sequías

Una vez estimada la vulnerabilidad (V), se procedió al cálculo del riesgo (R) (**Ecuación 8.6**), definido como una función integrada de los componentes de exposición (E), peligro (H) y vulnerabilidad (V). Para la construcción del índice, se derivaron ponderaciones (i, j, k) mediante *PCA*, con el fin de reflejar la contribución relativa de cada componente en el valor final del riesgo.

$$R = f(i H + j V + k E)$$

Ecuación 8.6. Riesgo ante sequías.

8.4 Medidas de actuación

Las medidas de actuación ante el cambio climático en la gestión del agua son clave porque permiten pasar de una gestión reactiva, que responde cuando el problema ya ocurrió, a una gestión preventiva y adaptativa que reduce daños antes de que se conviertan en una crisis. El objetivo no es solo “tener agua”, sino asegurar la seguridad hídrica de las personas, proteger la biodiversidad y sostener las actividades socioeconómicas de acuerdo con la jerarquía de usos. Además, estas medidas son fundamentales porque el cambio climático puede alterar los caudales, la recarga y disponibilidad de los acuíferos, y condiciones como la temperatura y la precipitación, afectando directamente la cantidad y la calidad del agua disponible. También son esenciales para enfrentar eventos extremos (sequías, olas de calor y avenidas) mediante el análisis de la exposición y la vulnerabilidad, considerando su probabilidad de ocurrencia, intensidad e impacto. Finalmente, se requiere seguimiento y ajustes continuos para mejorar la respuesta, aumentar la resiliencia y fortalecer la gestión del agua ante escenarios climáticos inciertos. (CHJ, 2025).

En particular, para el riesgo de sequías (uno de los impactos más relevantes asociados al cambio climático), en los Planes de Especiales de Sequías (CHJ, 2025), la aplicación de medidas se organiza a partir de un esquema de fases definido con base en indicadores de estado. Se considera normalidad cuando no hay sequía declarada y el sistema hídrico se mantiene dentro de rangos esperados; mientras los indicadores se encuentren por encima del umbral de prealerta, el sistema permanece en condición. A medida que los indicadores se deterioran y cruzan umbrales, se activan fases sucesivas de prealerta, alerta y emergencia, lo que permite escalar la respuesta de manera gradual. Esta lógica puede observarse en la evolución temporal de la intensidad de sequía mostrada en la **Figura 8.2**, donde se distinguen los cambios entre estados conforme varía el indicador.

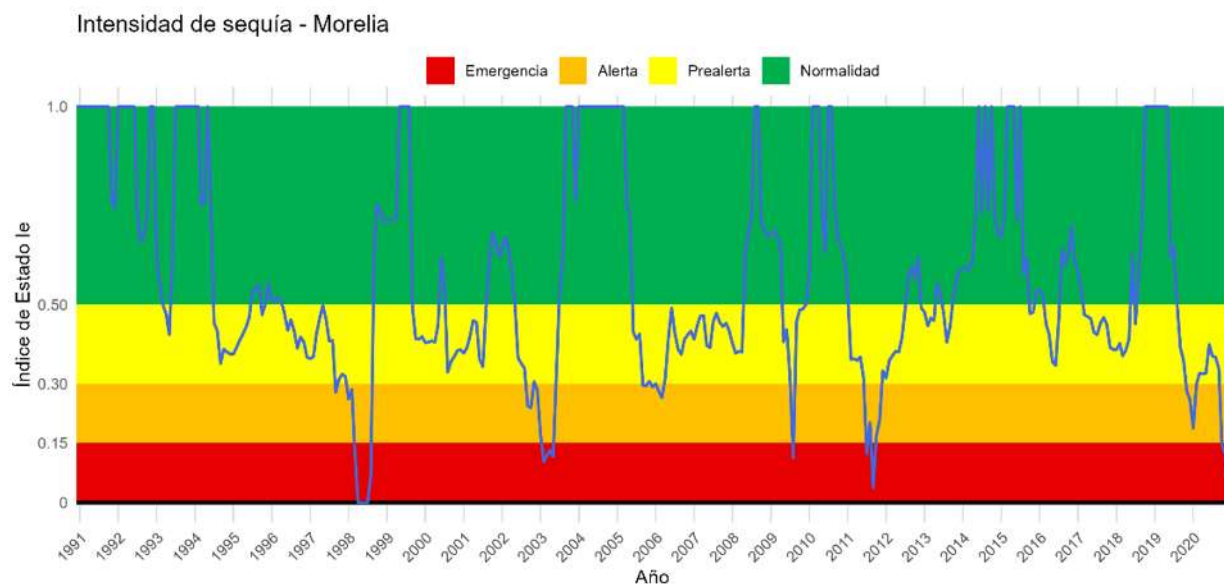


Figura 8.2 Serie temporal del indicador de sequía con umbrales de normalidad, prealerta, alerta y emergencia.

Bajo este enfoque, las medidas se clasifican, de acuerdo con SEMARNAT & IMTA (2014), en estratégicas, tácticas y de emergencia. Las medidas estratégicas corresponden a acciones de largo plazo en el contexto hidrológico; suelen ser institucionales e infraestructurales, con efectos que se sostienen por más de dos años, e incluyen la planificación hidrológica, la construcción de infraestructura para almacenar o regular el agua, la elaboración de normativas y la gestión de usos del recurso. Las medidas tácticas se orientan al corto plazo; son planificadas y autorizadas previamente, con una duración aproximada de algunos meses hasta dos años, y se aplican principalmente durante las fases de prealerta y alerta para contener los efectos inmediatos de la sequía. Por su parte, las medidas de emergencia son acciones de muy corto plazo, implementadas durante semanas o meses, destinadas a atender el déficit hídrico en etapas avanzadas; se ajustan según la gravedad y la extensión del impacto en la cuenca.

La implementación de medidas se vincula directamente con la intensidad de la sequía, asociando cada estado con un objetivo operativo y un tipo de respuesta. En condiciones de normalidad, el énfasis se centra en la planificación, por lo que predominan las medidas estratégicas orientadas a reducir vulnerabilidades estructurales. En prealerta, el objetivo se desplaza hacia el control y la información, activando medidas tácticas que buscan anticipar el agravamiento de la situación, mejorar la preparación institucional y promover un uso más eficiente del agua. En alerta, el objetivo principal es la conservación del recurso, intensificando medidas tácticas enfocadas en disminuir presiones sobre el sistema y proteger los usos prioritarios. Finalmente, en emergencia, se aplican restricciones y acciones de respuesta inmediata, predominando medidas de emergencia para reducir impactos severos en el abastecimiento, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. Esta relación entre intensidad, estado, objetivos y tipología de medidas se resume en la **Tabla 8.2**.

Tabla 8.2 Relación entre intensidad de sequía, estado operativo y tipo de medida

Tipología de las Medidas preventivas y de Mitigación					
Intensidad de sequía	D0 Anormalmente Seco	D1 Sequía Moderada	D2 Sequía Severa	D3 Sequía Extrema	D4 Sequía Excepcional
Indicador SPI	-0.5 a -0.7	-0.8 a -1.2	-1.3 a -1.5	-1.6 a -2.0	<-2.0
Estado	Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencias	
Objetivo	Planificación	Control- Información	Conservación	Restricciones	Restricciones
Tipo de medida	Estratégicas		Tácticas	Emergencia	

Medida de largo
plazo (meses o años).
Antes de la que la
sequía comience.

Medida de corto
plazo (semanas o
meses). Cuando
apenas comienza la
sequía.

Medida muy corto
plazo (días o
semanas). Cuando la
sequía ya está muy
avanzada..

En términos operativos, este escalamiento permite que el sistema no dependa únicamente de decisiones reactivas, sino de un esquema que anticipa escenarios y ajusta la respuesta conforme evoluciona la condición hidrológica. Por ello, el seguimiento de indicadores y la evaluación continua de impactos son componentes esenciales para actualizar medidas, corregir estrategias y fortalecer la resiliencia del territorio frente a condiciones climáticas cada vez más inciertas.

9 Resultados

9.1 Ámbito de estudio

El estado de Michoacán, situado en la región occidental de México, se extiende sobre una superficie de 58,599 km², representando aproximadamente el 3% del territorio nacional. Michoacán se caracteriza por su diversidad geográfica y cultural. El estado está constituido por en 113 municipios **Figura 9.1**, con la capital del estado es la ciudad de Morelia.

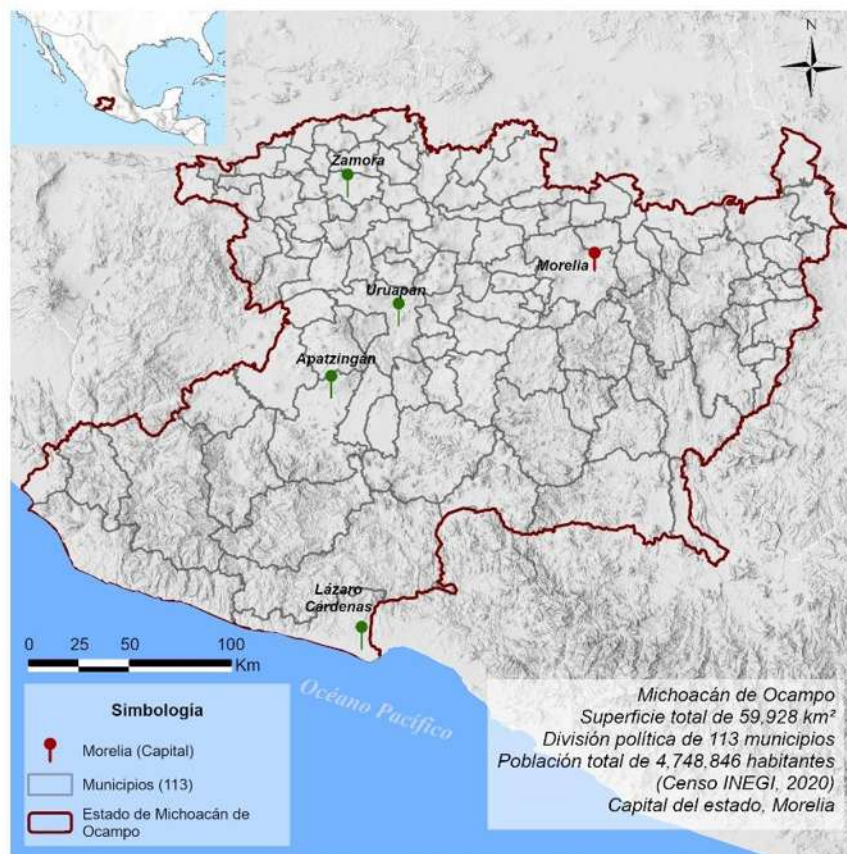


Figura 9.1 Micro localización del estado de Michoacán.

Distribución espacial de la población en los 113 municipios del estado de Michoacán (**Figura 9.2**), clasificada en cinco rangos de habitantes. Destaca Morelia como el núcleo con mayor población, seguido por municipios de alta concentración poblacional como Uruapan, Zamora, Apatzingán y Lázaro Cárdenas, los cuales conforman polos regionales que concentran población y, por ende, mayor presión potencial sobre la demanda de servicios e infraestructura.

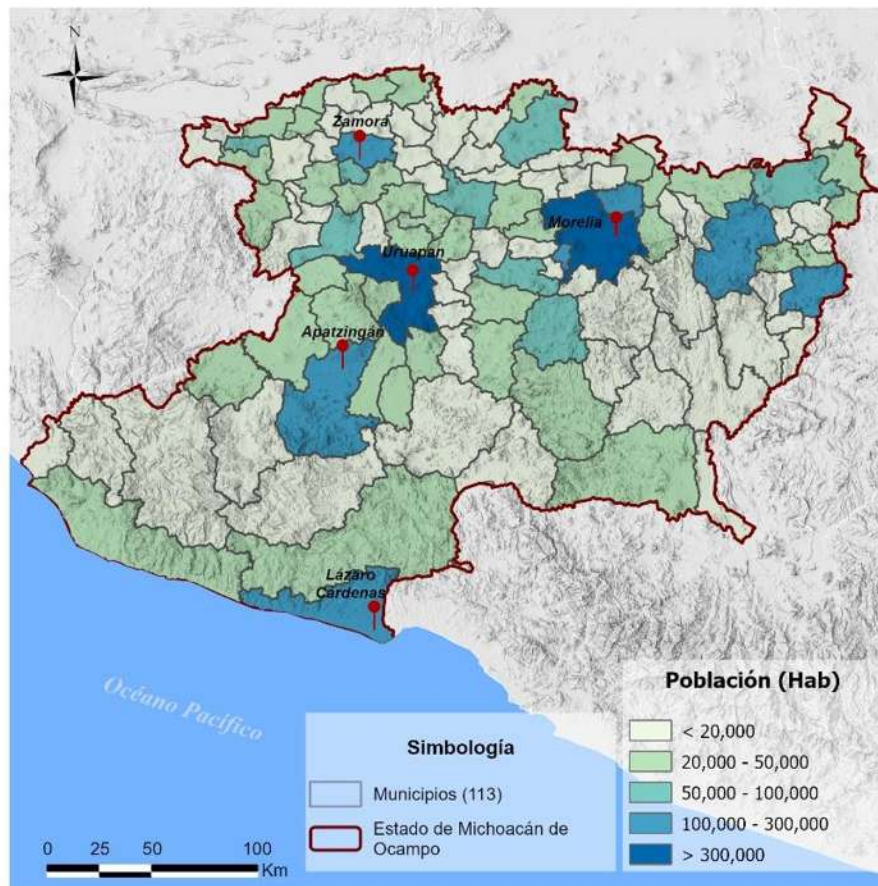


Figura 9.2 Población total por municipio en el estado de Michoacán.

Las regiones de Michoacán comparten atributos que les confieren una identidad única, característica por el Imperio Purépecha que se extendió al centro del estado, y generalmente se subdividen basándose en criterios socioeconómicos y la cultura geografía (Mercado et al., 2005) ver **Figura 9.3**.

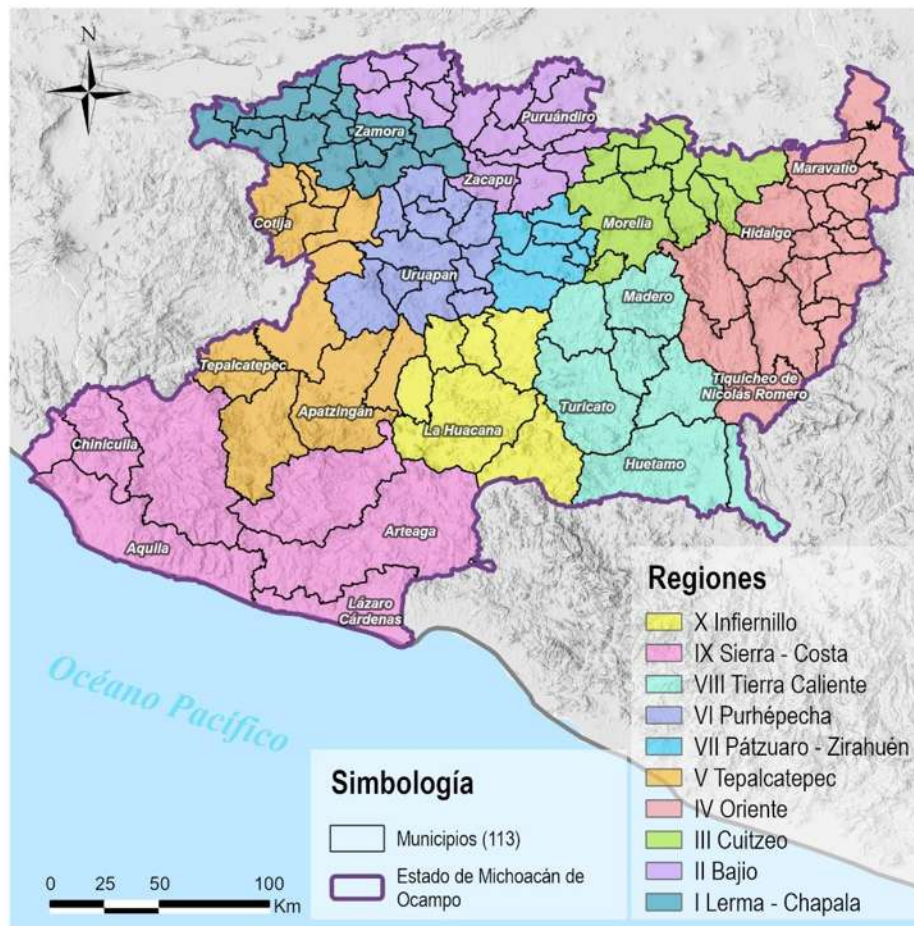


Figura 9.3 Regiones socioeconómicas y administrativas del estado de Michoacán.

Fuente. Adaptado de Gobierno de Michoacán (2021).

La topografía de Michoacán **Figura 9.4** es muy variada e incluye sierras, mesetas, valles, llanuras y franja costera. Algunos rasgos destacados son:

- **Sierra Madre del Sur:** Montañas altas y abruptas en el sur.
- **Eje Neovolcánico:** Volcanes y mesetas elevadas en el norte, como el Parícutín.
- **Depresión del Balsas:** Valles y cuencas en el centro del estado.
- **Costa del Pacífico:** Playas, acantilados y manglares.
- **Valle de Morelia-Queréndaro:** Terreno llano entre montañas.
- **Mesetas y Valles:** Áreas fértiles para la agricultura y ganadería.

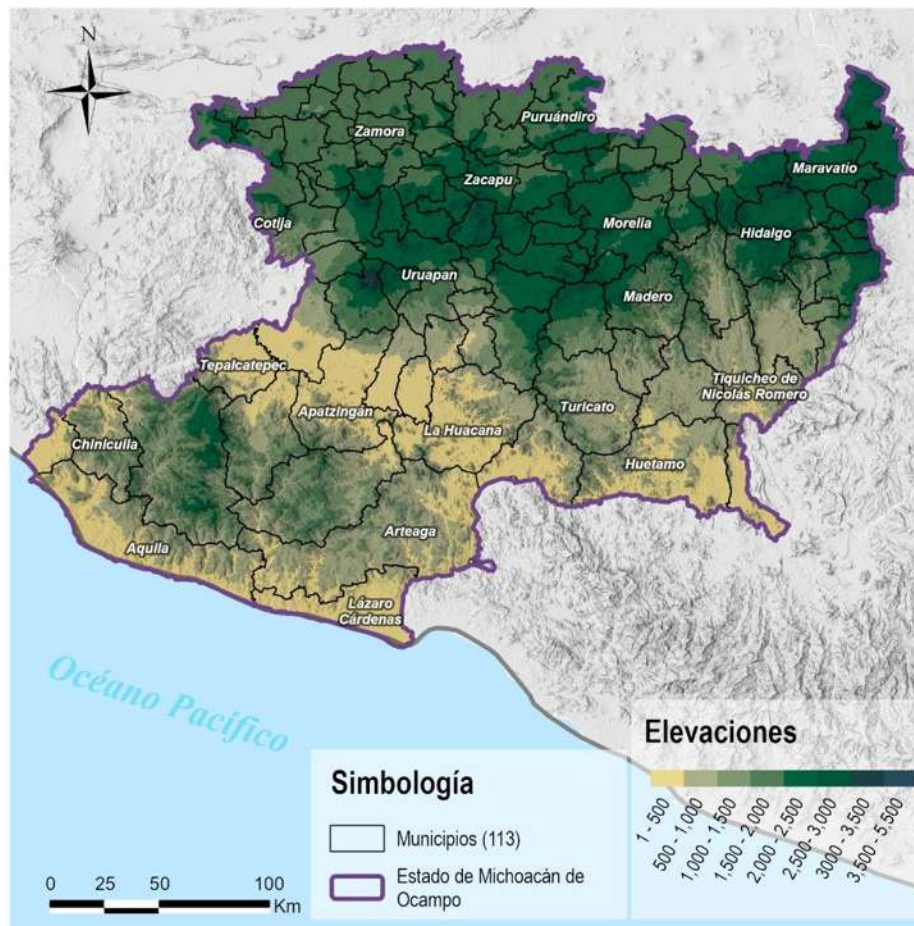


Figura 9.4 Topografía de Michoacán.

El estado de Michoacán se caracteriza por su clima cálido semihúmedo en la costa del pacífico y en la Sierra Madre del Sur y, en la zona boscosa del eje Neovolcánico por su clima templado subhúmedo (**Figura 9.5**). Lo anterior, con base en la clasificación climática de Köppen (Köppen, 2011), teniendo como producto cuartos climas característicos en Michoacán como se muestra en la **Tabla 9.1**.

Tabla 9.1 Clasificación climatológica de Köppen.

Clima	Definición
Aw	Clima Tropical
Bsh	Clima Cálido Semiárido
Cwb	Clima Templado con inviernos secos
Cwc	Clima Templado subhúmedo con veranos fríos

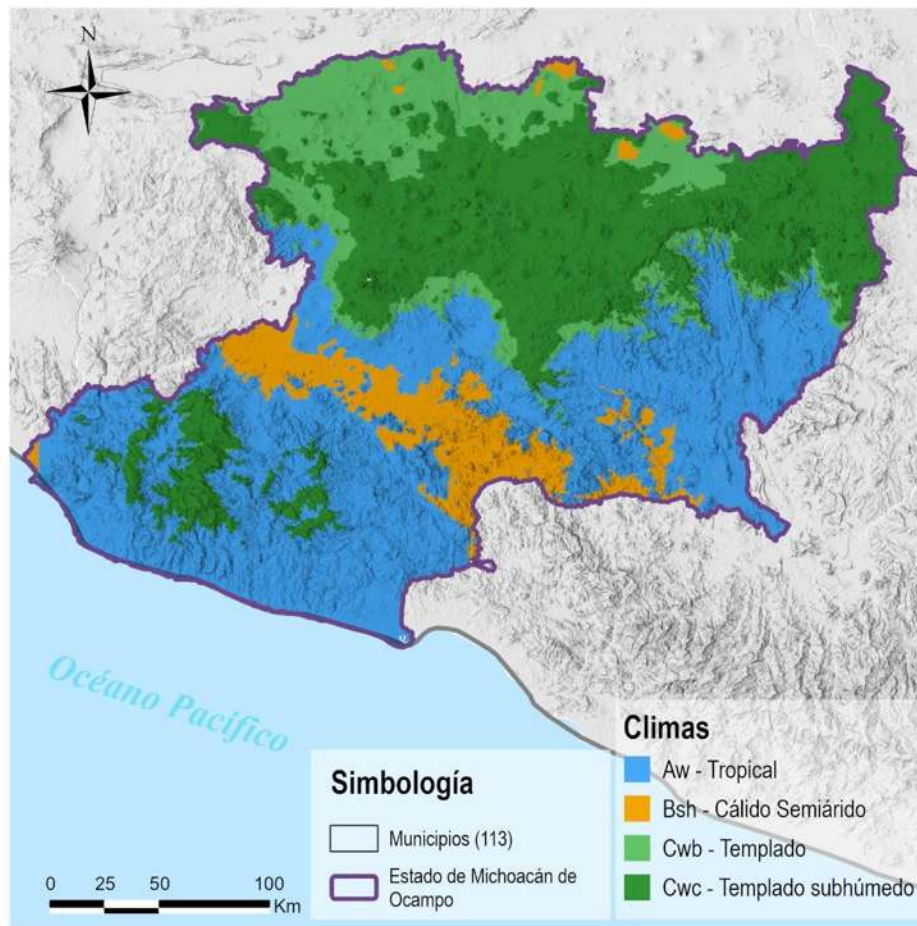


Figura 9.5 Tipo de clima en el estado de Michoacán.

En el estado de Michoacán presenta una precipitación pluvial media anual de entre 700 – 1200 mm, con menos presencia en la Región Tierra Caliente y en el norte del estado, tal como se aprecia en la **Figura 9.6**.

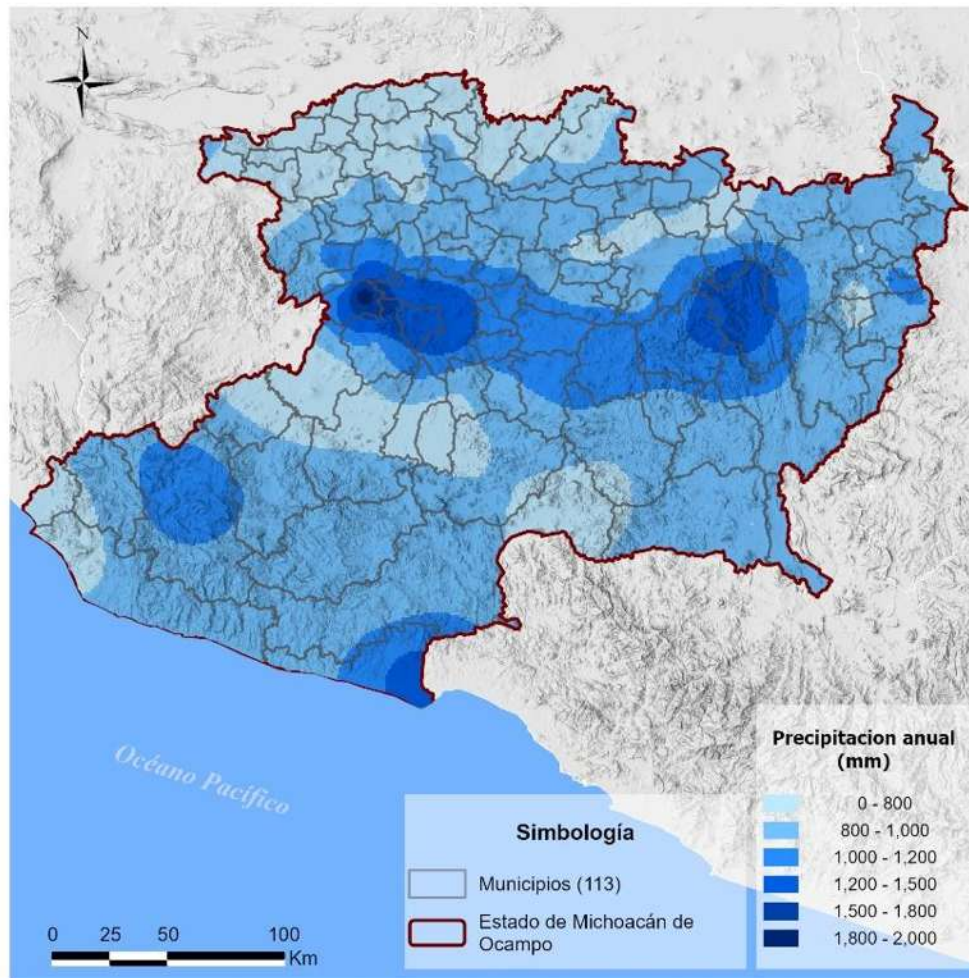


Figura 9.6 Precipitación media anual en el estado de Michoacán.

En las temperaturas promedio (medidas en grados centígrados (°C)) (**Figura 9.7**), se observa un gradiente espacial marcado. Los valores más bajos se concentran en el norte y noroeste del estado, con rangos aproximados de 15 – 18 °C y 18 – 21 °C. Hacia la franja central predominan temperaturas intermedias de 21 – 24 °C. En contraste, el sur y suroeste, así como la zona costera, presentan las temperaturas promedio más altas, principalmente entre 24 – 27 °C y con núcleos que alcanzan 27 – 30 °C. En conjunto, el patrón indica un aumento de la temperatura promedio desde las regiones del norte hacia las zonas del centro y costa.

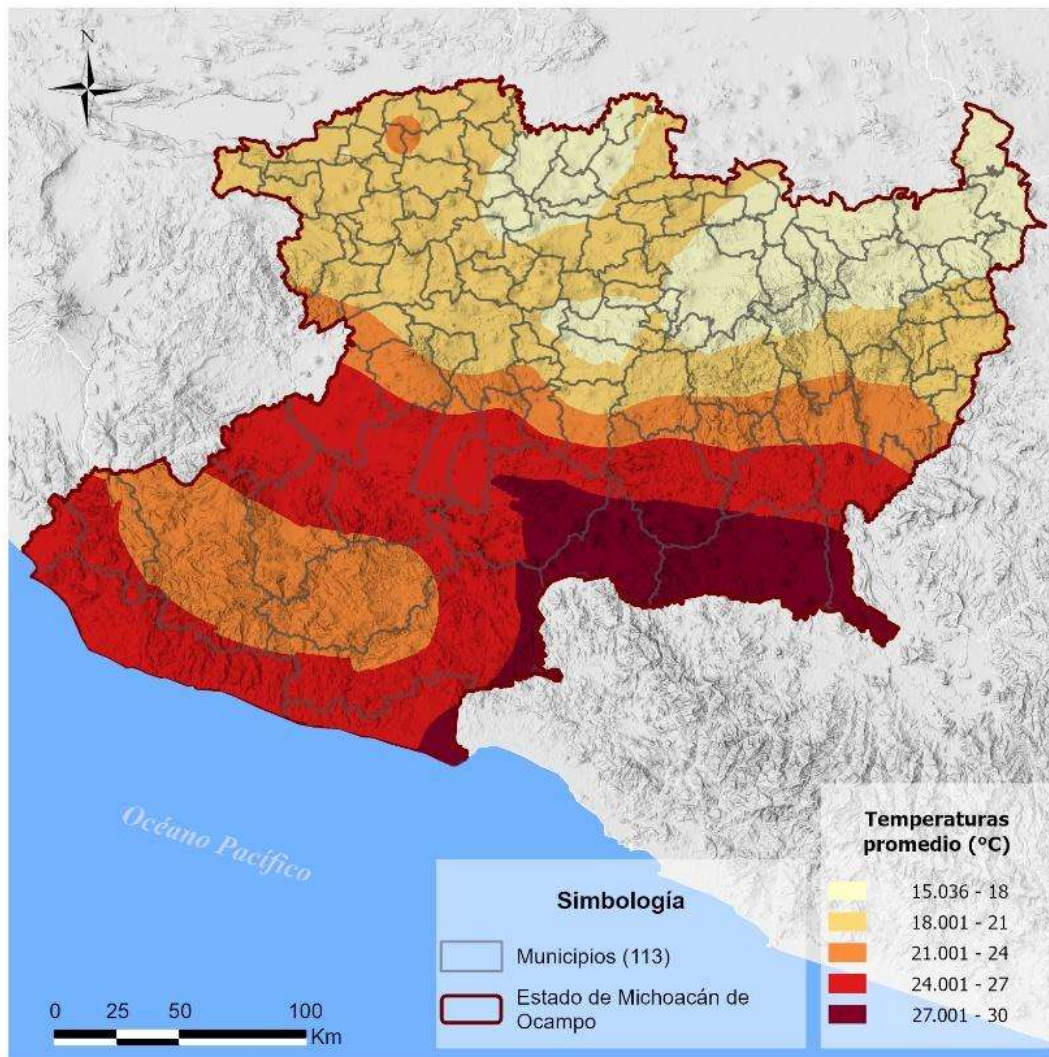


Figura 9.7. Temperaturas promedio del estado.

La evapotranspiración anual (mm) (**Figura 9.8**), representada mediante una escala de colores que va de 1,600 - 1,700 mm en tonos verdes (valores más bajos) hasta 2,100 – 2,200 mm en tonos rojo (valores más altos). Se observa un patrón claro en el territorio: las menores evapotranspiraciones predominan hacia el norte y noroeste, en la zona central aparecen valores intermedios (1,800 – 2,000 mm), y hacia el sur se incrementan los valores, destacando una zona de máximos en el sureste del estado.

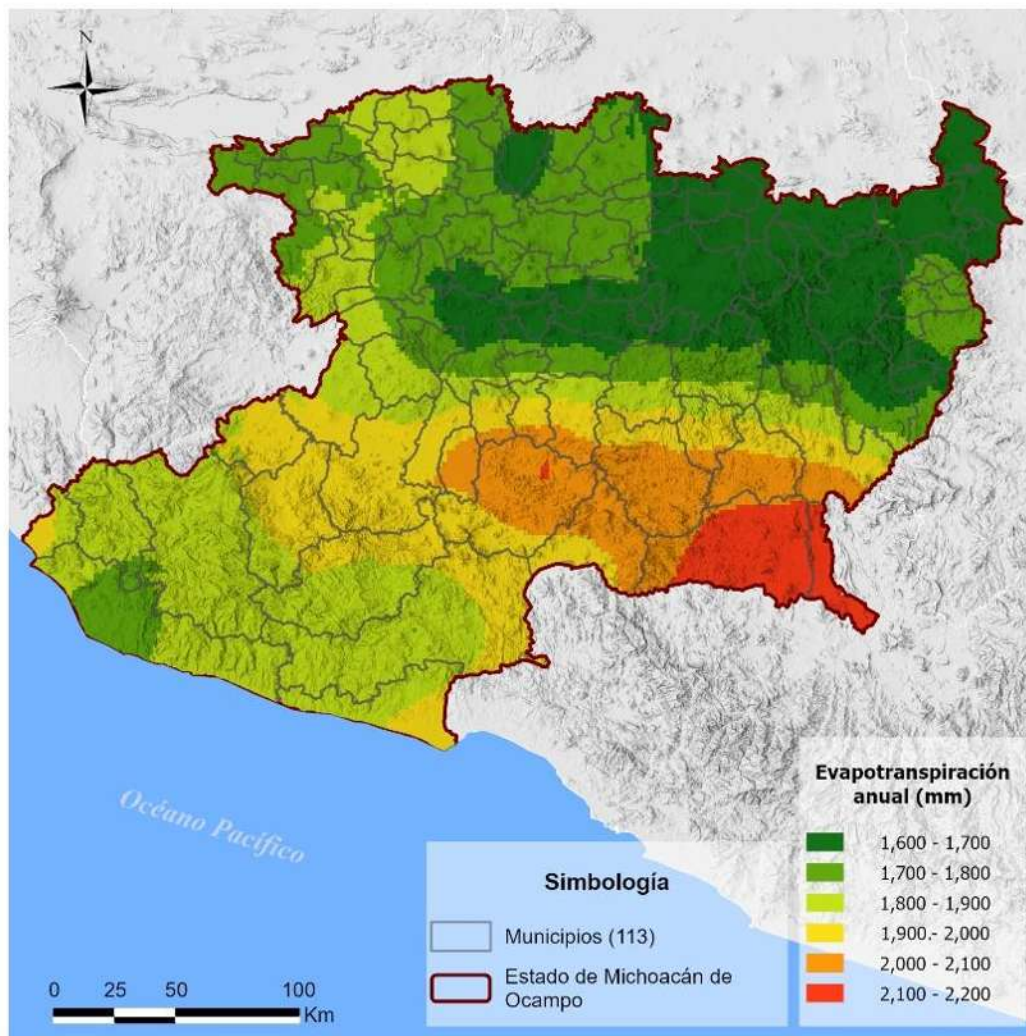


Figura 9.8 Evapotranspiración anual (mm) en estado.

Por otro lado, la hidrografía y regiones hidrológicas (**Figura 9.9**), sintetiza la organización del territorio del estado de Michoacán, en función de sus principales unidades de drenaje y elementos hídricos. El estado se encuentra influenciado principalmente por dos grandes regiones: la Región Hidrológica Balsas, que domina la porción centro – Sur, y la región Lerma – Santiago, presente en el norte. Dentro de este marco, se identifican los ríos principales donde destacan asociados a la región Lerma el Lago de Chapala y el Balsas, que atraviesa el estado y concentra importantes obras de regulación, así como la distribución espacial de los cuerpos de agua (Cuitzeo y Pátzcuaro) y la localización de presas relevantes. En conjunto, el mapa permite visualizar de forma unificada las relaciones entre las regiones hidrológicas, la red fluvial y los principales almacenamientos superficiales del estado.

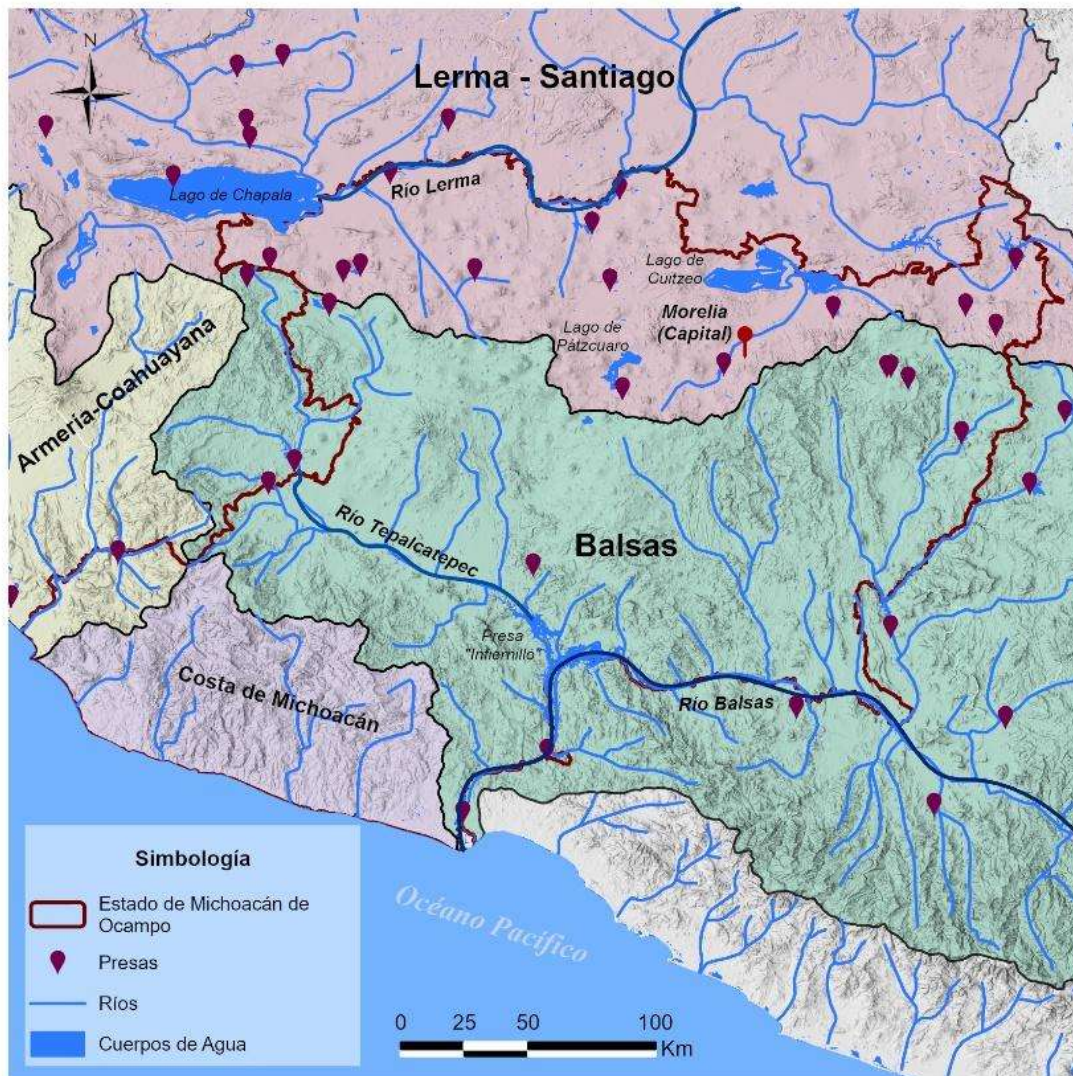


Figura 9.9 Hidrografía y regiones hidrológicas del estado de Michoacán.

9.2 Información climatológica observada o medida

9.2.1 Selección de estaciones meteorológicas

El estado de Michoacán dispone de datos climatológicos que incluyen precipitación, temperaturas máxima, mínima y media, así como evapotranspiración. Se analizaron 235 estaciones

climatológicas, a las cuales se les realizaron pruebas de homogeneidad e independencia para verificar la consistencia de los datos, obteniendo los resultados mostrados en la **Tabla 9.6**.

Los criterios que se aplicaron para la selección de datos son: los años continuos de información (**Tabla 9.2**), últimos años de registro (**Tabla 9.3**), pruebas de estadísticas aprobadas (**Tabla 9.4**). De acuerdo con los criterios previamente mencionados se clasifican las estaciones por medio de su importancia y se concentra en la **Tabla 9.5**.

Tabla 9.2 Criterio – Años continuos de información.

Años continuos de información			
Criterio	Valor	Rango	
30>	3	<	30
15-30	2	30	15
0-15	1	15	0

Tabla 9.3 Criterio – Último año de registro.

Año final de Servicio			
Criterio	Valor	Rango	
2023-1983	3	2023	1983
1982-1943	2	1982	1943
1942-1903	1	1942	1903

Tabla 9.4 Criterio – Pruebas estadísticas aprobadas.

Pruebas aprobadas			
Criterio	Valor	Rango	
5	5	5	4
4	4	4	3
3	3	3	2
2	2	2	1
1	1	1	0
0	0	0	

Tabla 9.5 Criterio – Importancia de la estación.

Importancia de la estación			
Criterio	Importancia	Rango	
11 - 08	Primera	11	8
08 - 04	Segunda	8	4
04 - 00	Tercera	4	0

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

Tabla 9.6 Resultados de la gestión de datos.

ID	Clasificación	ID	Clasificación	ID	Clasificación	ID	Clasificación	ID	Clasificación
C16001	Segunda	C16049	Primera	C16096	Primera	C16144	Primera	C16212	Primera
C16002	Primera	C16050	Primera	C16097	Primera	C16145	Segunda	C16213	Primera
C16003	Primera	C16051	Primera	C16098	Segunda	C16146	Primera	C16216	Tercera
C16004	Primera	C16052	Segunda	C16099	Segunda	C16147	Primera	C16217	Tercera
C16005	Primera	C16053	Primera	C16100	Primera	C16148	Primera	C16219	Segunda
C16006	Primera	C16054	Primera	C16101	Primera	C16149	Primera	C16220	Primera
C16007	Primera	C16055	Segunda	C16102	Primera	C16150	Tercera	C16221	Tercera
C16008	Segunda	C16056	Primera	C16103	Primera	C16151	Primera	C16222	Tercera
C16009	Segunda	C16057	Primera	C16104	Primera	C16152	Primera	C16223	Tercera
C16010	Primera	C16058	Primera	C16105	Segunda	C16153	Segunda	C16224	Primera
C16011	Primera	C16059	Primera	C16106	Primera	C16154	Segunda	C16225	Primera
C16012	Primera	C16060	Primera	C16107	Primera	C16155	Primera	C16227	Primera
C16013	Primera	C16061	Segunda	C16108	Primera	C16156	Primera	C16228	Primera
C16014	Primera	C16062	Primera	C16109	Segunda	C16157	Primera	C16229	Segunda
C16015	Segunda	C16063	Primera	C16110	Primera	C16158	Primera	C16230	Primera
C16016	Primera	C16064	Primera	C16111	Primera	C16159	Primera	C16231	Primera
C16017	Primera	C16065	Primera	C16112	Segunda	C16161	Tercera	C16232	Primera
C16018	Primera	C16066	Primera	C16113	Primera	C16162	Primera	C16233	Primera
C16019	Tercera	C16067	Primera	C16114	Segunda	C16163	Primera	C16234	Primera
C16020	Primera	C16068	Primera	C16115	Primera	C16164	Primera	C16235	Primera
C16021	Tercera	C16069	Tercera	C16116	Primera	C16165	Primera	C16236	Tercera
C16022	Primera	C16070	Primera	C16117	Primera	C16168	Segunda	C16237	Segunda
C16023	Primera	C16071	Primera	C16118	Segunda	C16169	Primera	C16238	Segunda
C16024	Primera	C16072	Segunda	C16119	Segunda	C16171	Primera	C16239	Primera
C16025	Primera	C16073	Primera	C16120	Primera	C16174	Primera	C16240	Primera
C16026	Primera	C16074	Primera	C16121	Primera	C16175	Primera	C16241	Segunda
C16027	Segunda	C16075	Primera	C16122	Segunda	C16178	Primera	C16242	Tercera
C16028	Primera	C16076	Primera	C16123	Primera	C16183	Tercera	C16243	Tercera
C16029	Primera	C16077	Primera	C16124	Primera	C16185	Segunda	C16244	Primera
C16030	Primera	C16078	Primera	C16125	Primera	C16186	Primera	C16245	Primera
C16031	Primera	C16079	Segunda	C16126	Primera	C16187	Tercera	C16247	Primera
C16032	Segunda	C16080	Primera	C16127	Primera	C16188	Segunda	C16248	Primera
C16033	Primera	C16081	Primera	C16128	Primera	C16189	Tercera	C16250	Primera
C16034	Primera	C16082	Primera	C16129	Primera	C16190	Segunda	C16251	Primera
C16035	Segunda	C16083	Tercera	C16131	Tercera	C16191	Primera	C16252	Segunda
C16036	Primera	C16084	Primera	C16132	Primera	C16192	Primera	C16253	Segunda
C16037	Primera	C16085	Primera	C16133	Primera	C16193	Tercera	C16254	Primera
C16038	Primera	C16086	Primera	C16134	Segunda	C16194	Primera	C16255	Primera
C16039	Primera	C16087	Primera	C16135	Primera	C16195	Tercera	C16257	Tercera
C16040	Segunda	C16088	Segunda	C16136	Primera	C16196	Tercera	C16258	Primera
C16041	Primera	C16089	Primera	C16137	Primera	C16197	Primera	C16259	Tercera
C16043	Primera	C16090	Primera	C16138	Primera	C16198	Tercera	C16261	Primera

Continúa

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

C16044	Primera	C16091	Primera	C16139	Primera	C16199	Primera	C16264	Primera
C16045	Primera	C16092	Primera	C16140	Primera	C16203	Tercera	C16512	Primera
C16046	Segunda	C16093	Primera	C16141	Primera	C16204	Tercera	C16513	Primera
C16047	Primera	C16094	Primera	C16142	Primera	C16206	Tercera	C16514	Primera
C16048	Primera	C16095	Primera	C16143	Segunda	C16208	Primera	C16515	Segunda

De acuerdo con los resultados obtenidos en la **Tabla 9.6**. Se completaron los datos faltantes en cada serie utilizando la clasificación de estaciones por el método IDW. Obtenidas las series completas, se continuo con análisis a escala municipal para selección de estaciones, seleccionando un total de 65 **Figura 9.10**, lo que es equivalente a 65 municipios que cuentan con información climatológica observada **Tabla 9.7**.

Tabla 9.7 Estaciones climatológicas observadas.

ID	Municipio	Estación	X	Y	ID	Municipio	Estación	X	Y
1	Acuitzio	C16001	253909	2157711	68	C16088	Peribán	771274	2160508
2	Aguililla	C16003	737236	2072818	69	C16065	La Piedad	811004	2251582
3	Álvaro Obregón	C16091	286508	2193220	70	C16103	Purépero	812219	2204817
4	Angamacutiro	C16159	212601	2228087	71	C16104	Puruándiro	236912	2223210
6	Apatzingán	C16007	778744	2112714	72	C16096	Queréndaro	303216	2193364
8	Aquila	C16102	656604	2044279	75	C16053	Los Reyes	764191	2166033
10	Arteaga	C16151	786294	2031600	76	C16174	Sahuayo	738046	2219377
12	Buenavista	C16011	753762	2125674	77	C16113	San Lucas	311799	2053814
15	Coalcomán de Vázquez Pallares	C16154	695001	2075997	79	C16146	Salvador Escalante	213167	2153360
17	Contepec	C16175	371848	2210723	80	C16121	Senguio	358303	2182476
18	Copándaro	C16023	268243	2201078	82	C16123	Tacámbaro	241711	2125184
19	Cotija	C16043	744048	2191126	85	C16125	Tangancicuaro	792654	2201588
27	Chucándiro	C16034	255462	2200636	86	C16224	Tanhuato	778658	2244904
31	Epitacio Huerta	C16233	364423	2228517	87	C16127	Taretan	193404	2140517
33	Gabriel Zamora	C16089	814438	2121137	88	C16512	Tarímbaro	271805	2187747
34	Hidalgo	C16020	337161	2178079	89	C14177	Tepalcatepec	724761	2125198
35	La Huacana	C16062	204467	2099001	92	C16132	Tiquicheo de Nicolás Romero	317026	2090661
36	Huandacareo	C16250	261958	2211868	95	C16194	Tocumbo	759940	2180396
37	Huaniqueo	C16050	237762	2202275	97	C16133	Turicato	245258	2108517
38	Huetamo	C16051	299848	2060609	98	C16258	Tuxpan	344493	2161221
41	Irimbo	C16213	345054	2178866	99	C16163	Tuzantla	334449	2124351
42	Ixtlán	C16054	772531	2232036	101	C16136	Tzitzio	298196	2166418
43	Jacona	C16162	779945	2209998	102	C16165	Uruapan	809650	2147181
44	Jiménez	C16057	212459	2205255	103	C16029	Venustiano Carranza	743924	2227946
45	Jiquilpan	C16197	740632	2213106	104	C16095	Villamar	751175	2208667
49	Madero	C16140	260808	2145560	105	C16093	Vista Hermosa	767490	2246847
50	Maravatío	C16078	348993	2200263	106	C16141	Yurécuaro	783677	2251169
52	Lázaro Cárdenas	C16227	796885	1996130	107	C16142	Zacapu	207180	2192355

Continúa

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

55	Múgica	C16026	805015	2101990	108	C16048	Zamora	784315	2212188
61	Ocampo	C16079	360159	2165892	110	C16145	Zinapécuaro	308668	2196872
63	Panindícuaro	C16084	211216	2211092	112	C16192	Zitácuaro	353648	2147093
64	Parácuaro	C16085	791884	2119718	113	C16086	José Sixto Verduzco	228774	2247429
66	C16087	Pátzcuaro	226111	2160051					

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, 48 municipios no cuentan con información climatológica por lo que se generan estaciones ficticias el centro de gravedad en la cabecera municipal **Figura 9.10**, aplicando el método IDW, este análisis se realizó por regiones como se muestra en la **Figura 9.3**, generando series continuas de información climatológica en los municipios faltantes **Tabla 9.8**.

Tabla 9.8 Estaciones climatológicas ficticias.

ID	Municipio	X	Y	ID	Municipio	X	Y
5	Angangueo	365328	2169922	53	Morelia	274421	2174360
7	Aporo	352113	2175677	54	Morelos	247337	2213504
9	Ario	218804	2132105	56	Nahuatzen	194164	2175987
11	Briseñas	754695	2243013	57	Nocupétaro	272431	2107232
13	Carácuaro	277181	2102168	58	Nuevo Parangaricutiro	803638	2147945
14	Coahuayana	640601	2066288	59	Nuevo Urecho	198367	2121650
16	Coeneo	229283	2193828	60	Numarán	191788	2242476
20	Cuitzeo	276246	2208050	62	Pajacuarán	754400	2226223
21	Charapan	788444	2175137	65	Paracho	809782	2175048
22	Charo	285572	2184830	67	Penjamillo	197825	2220859
23	Chavinda	765917	2214193	73	Quiroga	232001	2177316
24	Cherán	190271	2179338	74	Cojumatlán de Régules	724751	2225878
25	Chilchota	801904	2197082	78	Santa Ana Maya	288348	2213455
26	Chinicuila	671850	2074819	81	Susupuato	352128	2125184
28	Churintzio	806803	2230812	83	Tancitaro	777112	2140215
29	Churumuco	221150	2065236	84	Tangamandapio	768674	2208438
30	Ecuandureo	793256	2231831	90	Tingambato	200001	2159548
32	Erongarícuaro	214560	2168319	91	Tingüindín	763392	2184546
39	Huiramba	244289	2163008	93	Tlalpujahua	377095	2190391
40	Indaparapeo	291023	2190278	94	Tlazazalca	809845	2210920
46	Juárez	349485	2136230	96	Tumbiscatío	777106	2052196
47	Jungapeo	344322	2154981	100	Tzintzuntzan	229845	2172473
48	Lagunillas	246549	2164972	109	Zináparo	186623	2233344
51	Marcos Castellanos	706937	2211019	111	Ziracuaretiro	194363	2149485

Fuente: Elaboración propia

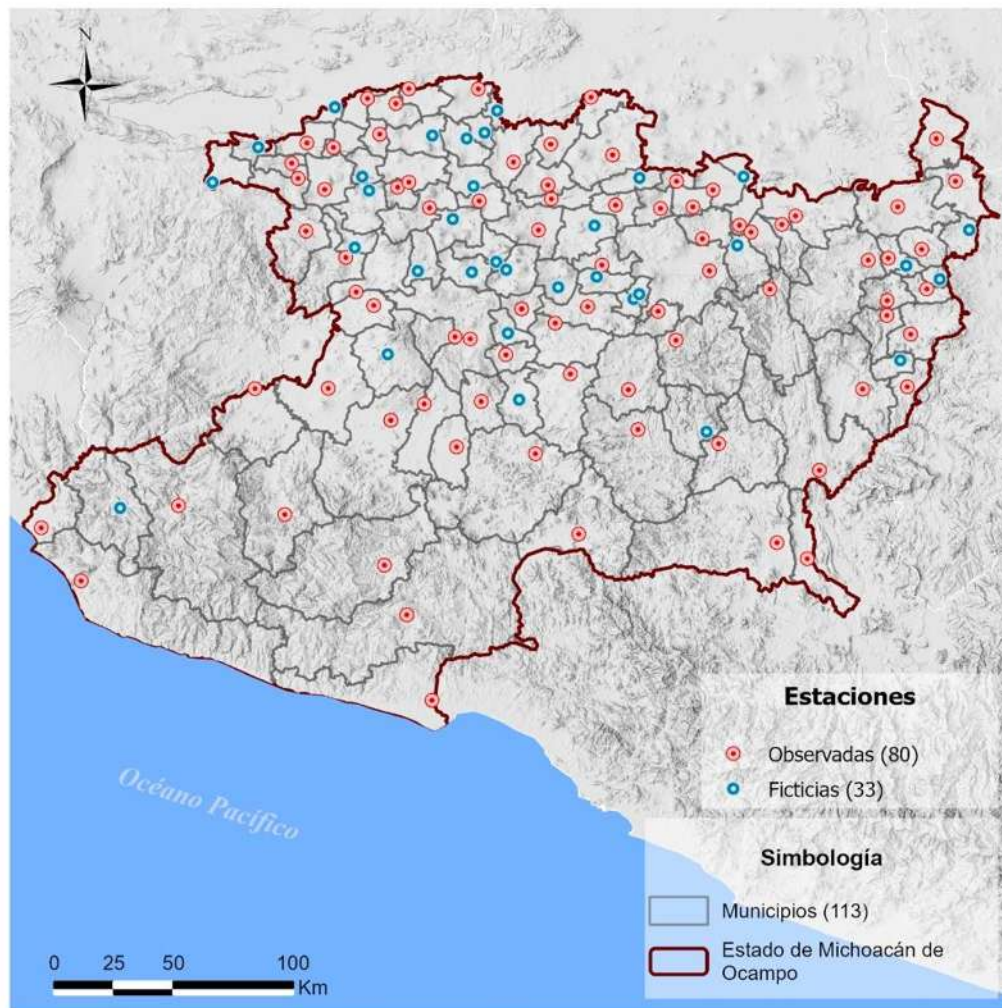


Figura 9.10 Estaciones climatológicas seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia.

9.2.2 Análisis climático observado

Para caracterizar el clima observado en el área de estudio, se analizaron registros de precipitación y temperatura (máxima, media y mínima) de la estación C16055 del municipio de Morelia. Con estos datos se elaboraron dos representaciones (**Figura 9.11**), la evolución anual de la precipitación y temperatura, que permite identificar la variación interanual y posibles años en condiciones relativamente más húmedas o secas y (**Figura 9.12**) el ciclo climático mensual, que resume el comportamiento promedio del año.

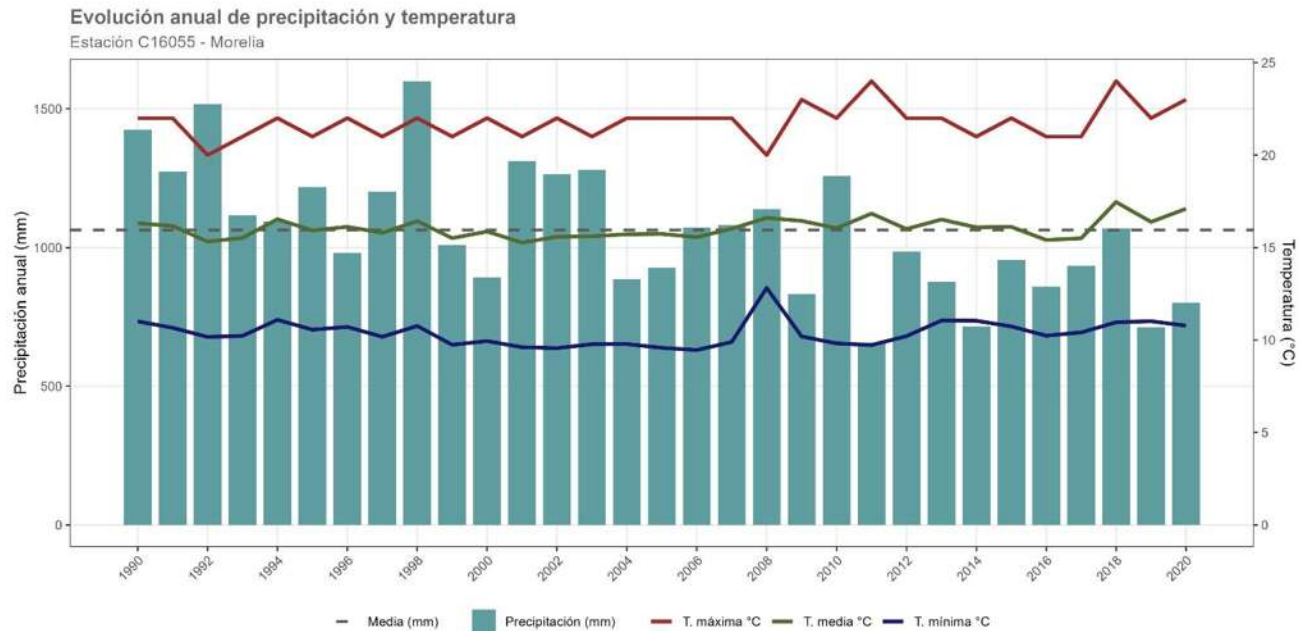


Figura 9.11 Precipitación anual y temperatura media, máxima y mínima

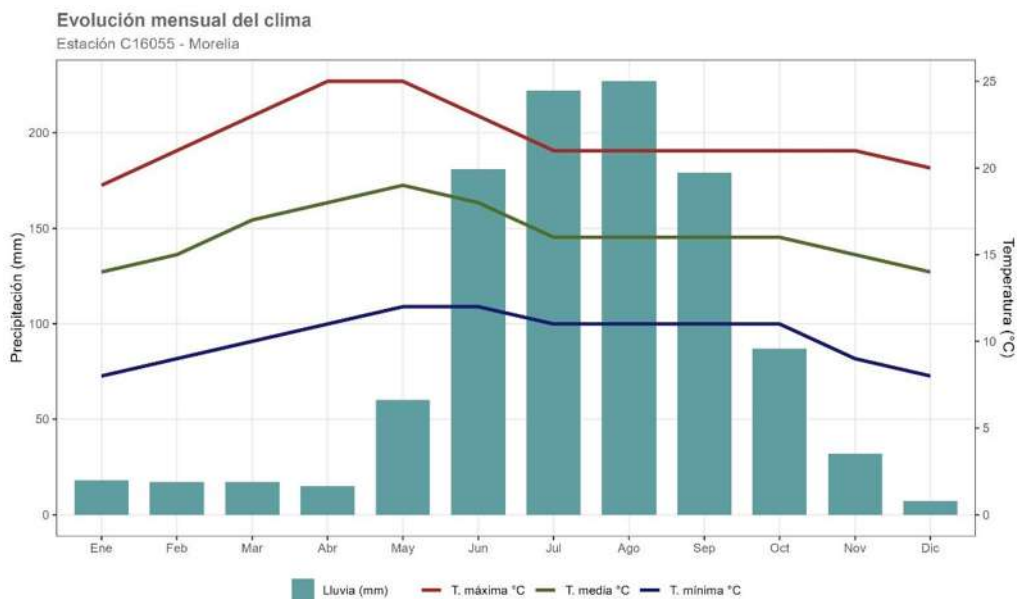


Figura 9.12 Climatología mensual observada de precipitación y temperatura.

En las siguiente graficas se observa la evolución anual de la precipitación en conjunto con la evapotranspiración (**Figura 9.13**), así como su comportamiento respecto a la media del periodo. En términos generales, la precipitación presenta una variabilidad interanual más marcada (**Figura 9.14**), mientras que la evapotranspiración muestra un patrón más estable, lo que permite identificar años con condiciones climáticas.

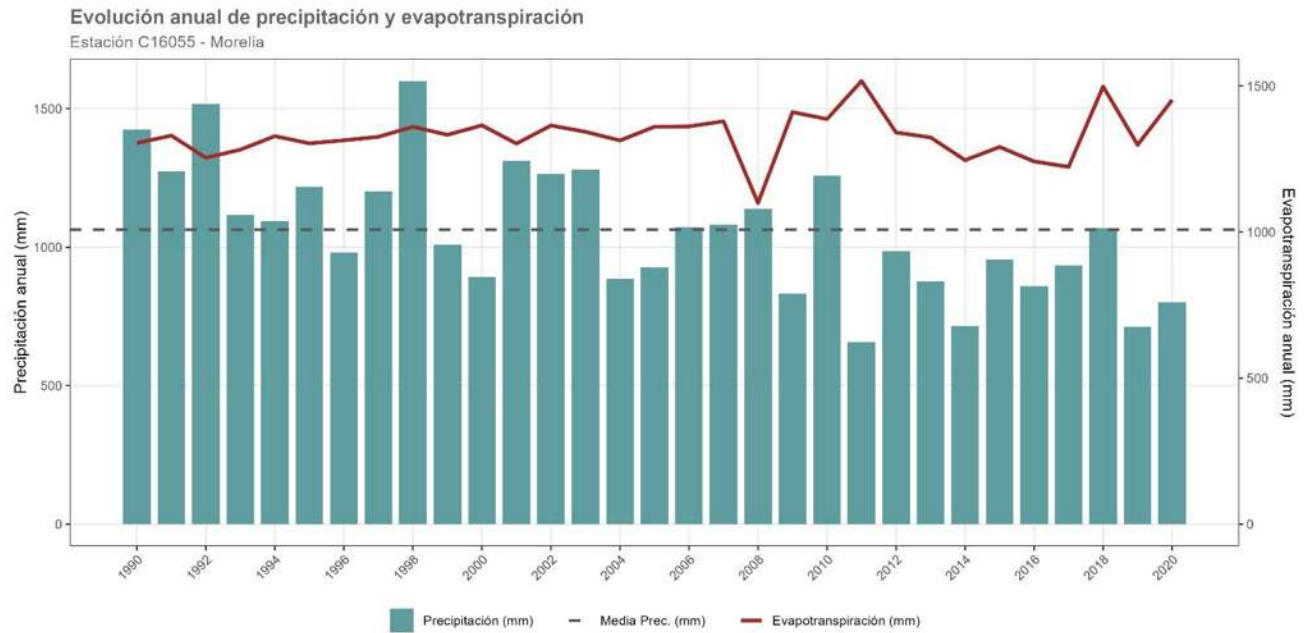


Figura 9.13 Precipitación anual y evapotranspiración

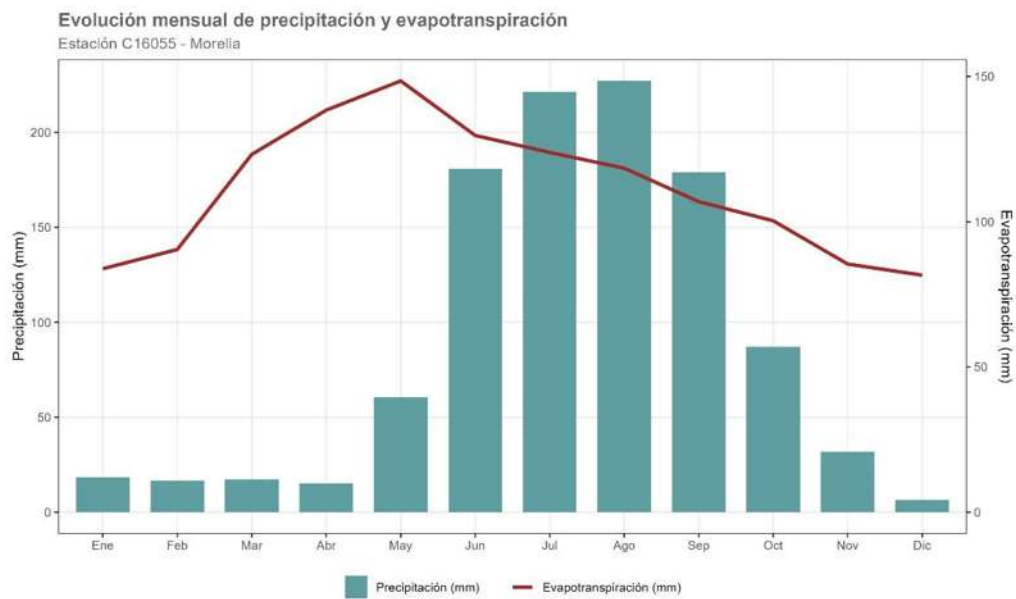


Figura 9.14 Climatología mensual de precipitación y evapotranspiración

9.3 Información climatológica simulada

De acuerdo con la metodología propuesta, se analizaron los modelos adaptados a partir de modelos regionales acoplados a la región de América Central del Norte, derivados de modelos regionales acoplados, tal como se muestra en la **Tabla 9.9**. A partir de este conjunto de modelos se construyó el ensamble multimodelo para los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5.

Tabla 9.9 Modelos climáticos simulados para América Central del Norte.

Modelos climáticos simulados	
AS-RCEC_TaiESM1_rli1p1f1	IPSL_IPSL-CM6A-LR_rli1p1f1
AWI_AWI-CM-1-1-MR_rli1p1f1	KIOST_KIOST-ESM_rli1p1f1
CCCR-IITM_IITM-ESM_rli1p1f1	MIROC_MIROC-ES2L_rli1p1f2
CCCma_CanESM5_rli1p1f1	MIROC_MIROC6_rli1p1f1
CMCC_CMCC-CM2-SR5_rli1p1f1	MOHC_HadGEM3-GC31-LL_rli1p1f3
CMCC_CMCC-ESM2_rli1p1f1	MOHC_HadGEM3-GC31-MM_rli1p1f3
CNRM-CERFACS_CNRM-CM6-1-HR_rli1p1f2	MOHC_UKESM1-0-LL_rli1p1f2
CNRM-CERFACS_CNRM-CM6-1_rli1p1f2	MPI-M_MPI-ESM1-2-LR_rli1p1f1
CNRM-CERFACS_CNRM-ESM2-1_rli1p1f2	MRI_MRI-ESM2-0_rli1p1f1
CSIRO-ARCCSS_ACCESS-CM2_rli1p1f1	NCAR_CESM2-WACCM_rli1p1f1
EC-Earth-Consortium_EC-Earth3-CC_rli1p1f1	NCC_NorESM2-MM_rli1p1f1
INM_INM-CM4-8_rli1p1f1	NIMS-KMA_KACE-1-0-G_rli1p1f1
INM_INM-CM5-0_rli1p1f1	NOAA-GFDL_GFDL-ESM4_rli1p1f1
	NUIST_NESM3_rli1p1f1

Con los modelos regionales acoplados se elaboró una representación temporal bajo los dos escenarios de análisis. En cada panel, las líneas delgadas muestran las simulaciones de los modelos individuales, mientras que la línea gruesa corresponde al ensamble multimodelo, el cual resume el comportamiento medio del conjunto. Esta comparativa permite reconocer la tendencia central y, al mismo tiempo, la dispersión entre modelos y la incertidumbre asociada a las proyecciones.

En primer lugar, se presenta la evolución de la precipitación anual (**Figura 9.15**) estimada por los modelos regionales. Se aprecia una marcada variabilidad interanual en las series individuales; en contraste, el multimodelo atenúa dicha fluctuación y facilita la identificación de la señal general del ensamble a lo largo del periodo de estudio.

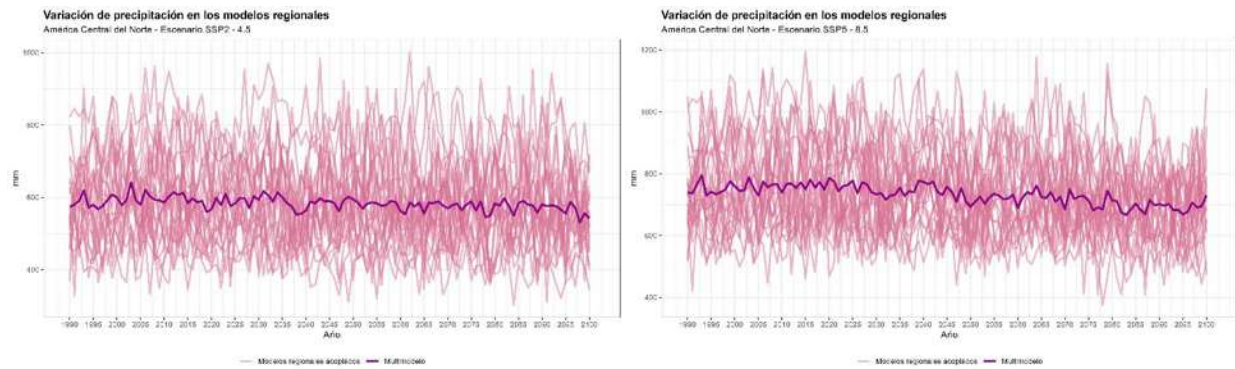


Figura 9.15 Variación de la precipitación anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte

En el caso de las temperaturas máximas proyectadas (**Figura 9.16**). En ambos escenarios se aprecia una tendencia ascendente del multimodelo a lo largo del periodo, lo cual surge un incremento progresivo.

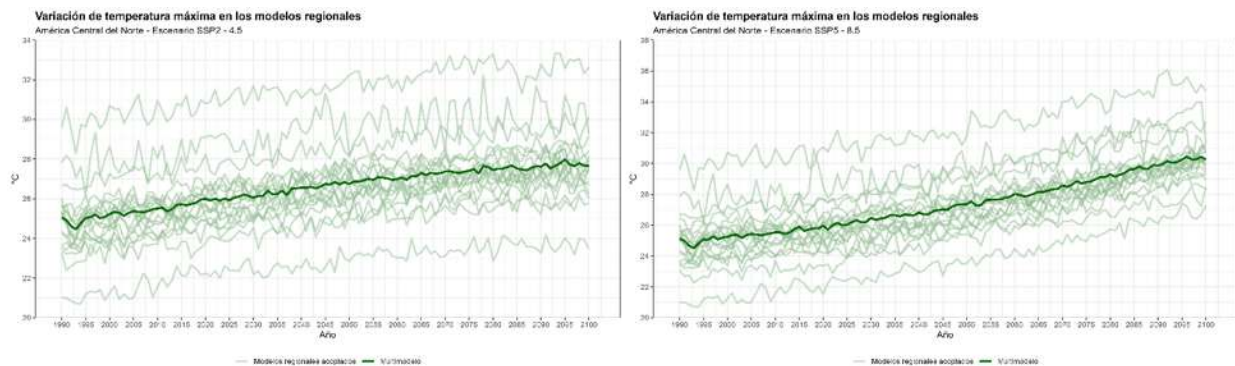


Figura 9.16 Variación de las temperaturas máximas anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte.

Para las temperaturas mínimas (**Figura 9.17**), se muestra una tendencia intensificándose.

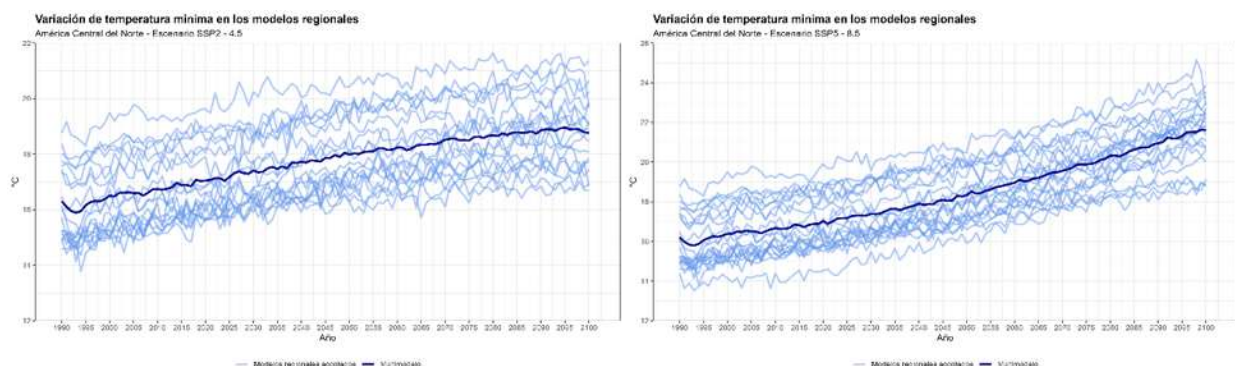


Figura 9.17 Variación de las temperaturas mínimas anual proyectada por el ensamble de modelos regionales (SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5) para América Central del Norte.

9.3.1 Corrección del sesgo.

Continuando con la metodología, se estimaron los factores de cambio (deltas) mensuales para cada variable climática, a partir del ensamble multimodelo bajo los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5. Estos deltas se obtuvieron comparando, para cada mes m , el comportamiento promedio del periodo base de referencia con el de dos horizontes futuros: corto plazo (2020 – 2050) y largo plazo (2070 – 2100). Con ellos, se cuenta con un conjunto de deltas que resumen el cambio proyectado de manera mensual, manteniendo la estacional climática.

Los deltas calculados constituyen el insumo principal del método Delta para la corrección del sesgo, que permite transferir el cambio proyectado por los modelos hacia las series observadas, siguiendo las expresiones presentadas. En este sentido, las gráficas incluidas muestran la variación mensual estimadas de: a) precipitación (en mm) para ambos escenarios y periodos de análisis (**Figura 9.15**) y b) temperatura media (en °C) en los mismos horizontes temporales (**Figura 9.16**). Estas figuras se incorporan como soporte metodológico para documentar los deltas derivados del ensamble y su uso posterior en la generación de series corregidas.

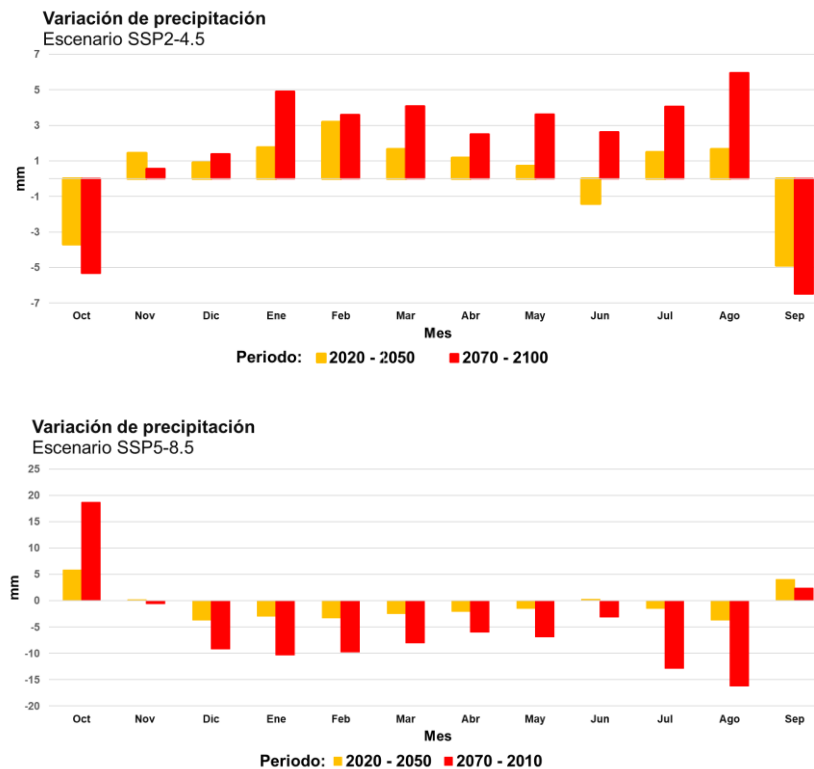


Figura 9.18 Deltas mensuales de precipitación para los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 en dos horizontes de proyección (2020 – 2050 y 2070 – 2100)

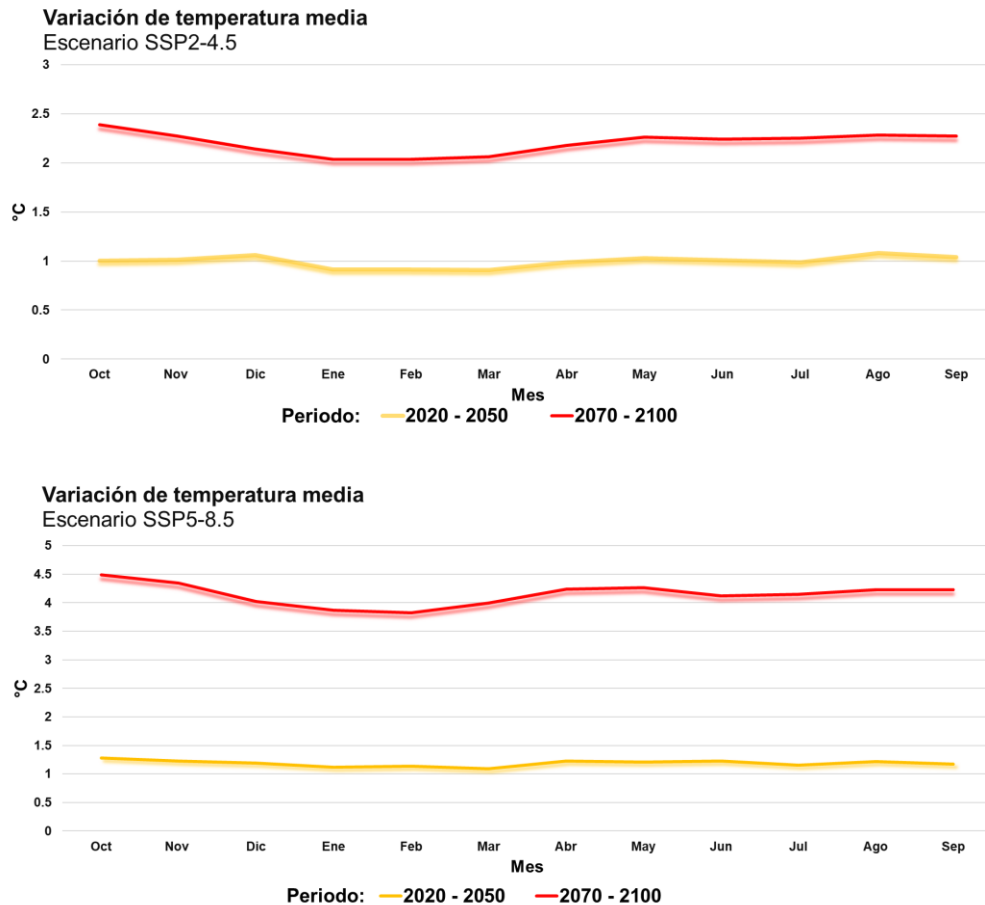


Figura 9.19 Deltas mensuales de temperatura media para los escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 en dos horizontes de proyección (2020 – 2050 y 2070 – 2100)

A continuación, se presentan las gráficas de variación climática anual, integrando el periodo base (1990 - 2020) y la información proyectada (2020 – 2100) bajo los escenarios SSP2 – 4.5 (**Figura 9.20**) y SSP5 – 8.5 (**Figura 9.21**). En los gráficos se muestra la precipitación anual mediante barras y el comportamiento de las temperaturas mínimas, media y máximas mediante líneas, con el fin de visualizar de forma comparativa la evolución temporal de las variables climáticas en ambos escenarios.

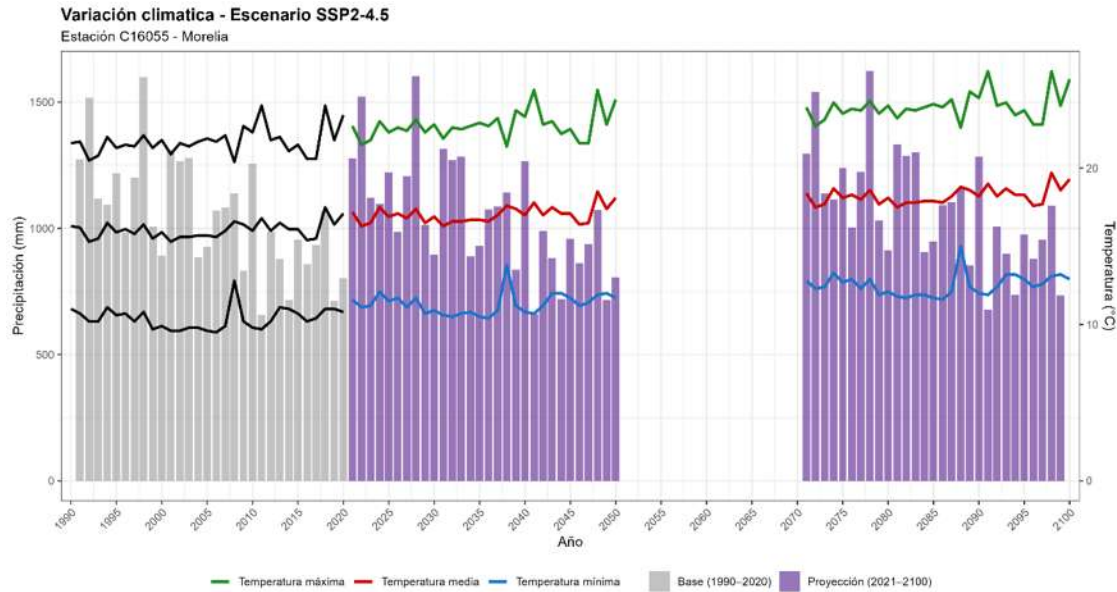


Figura 9.20 Precipitación y temperatura anuales: periodo base y proyección SSP2 – 4.5.

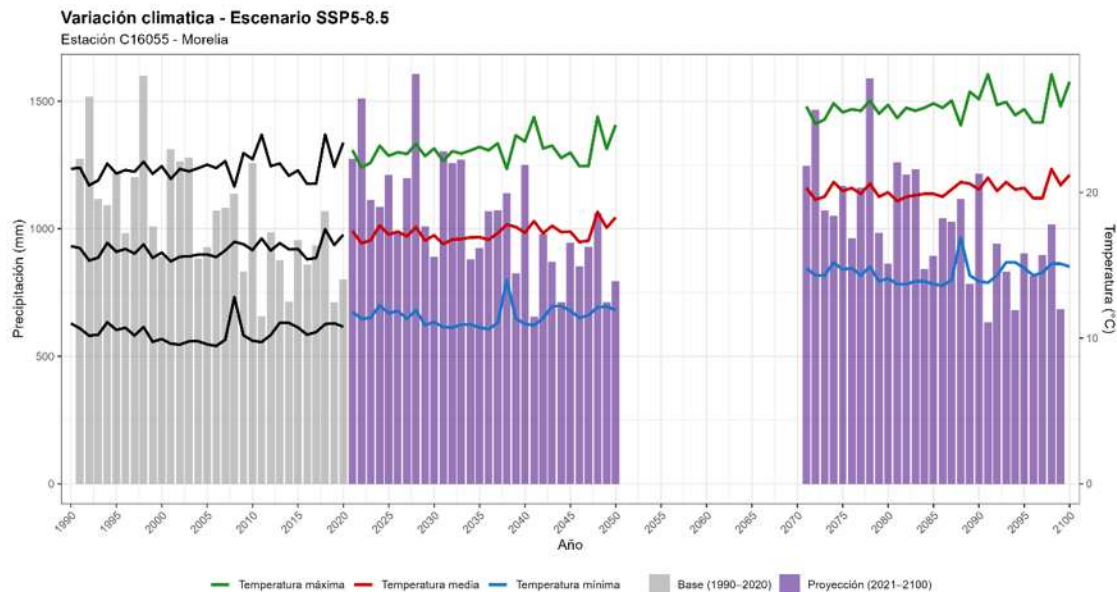


Figura 9.21 Precipitación y temperatura anual: periodo base y proyección SSP5 – 8.5.

9.4 Índice de sequías

Como parte de la metodología, se obtuvieron las series del SPEI a escala de 12 meses (SPEI – 12), empleando la información correspondiente y al periodo histórico 1990 – 2020.

El SPEI – 12 permite representar el comportamiento de las condiciones de humedad a escala anual. En la **Figura 9.22** se presenta la serie temporal del SPEI – 12, donde se observan periodos con valores positivos (humedad) y valores negativos (secos), lo que facilita identificar la alternancia de episodios húmedos y secos a lo largo del tiempo.

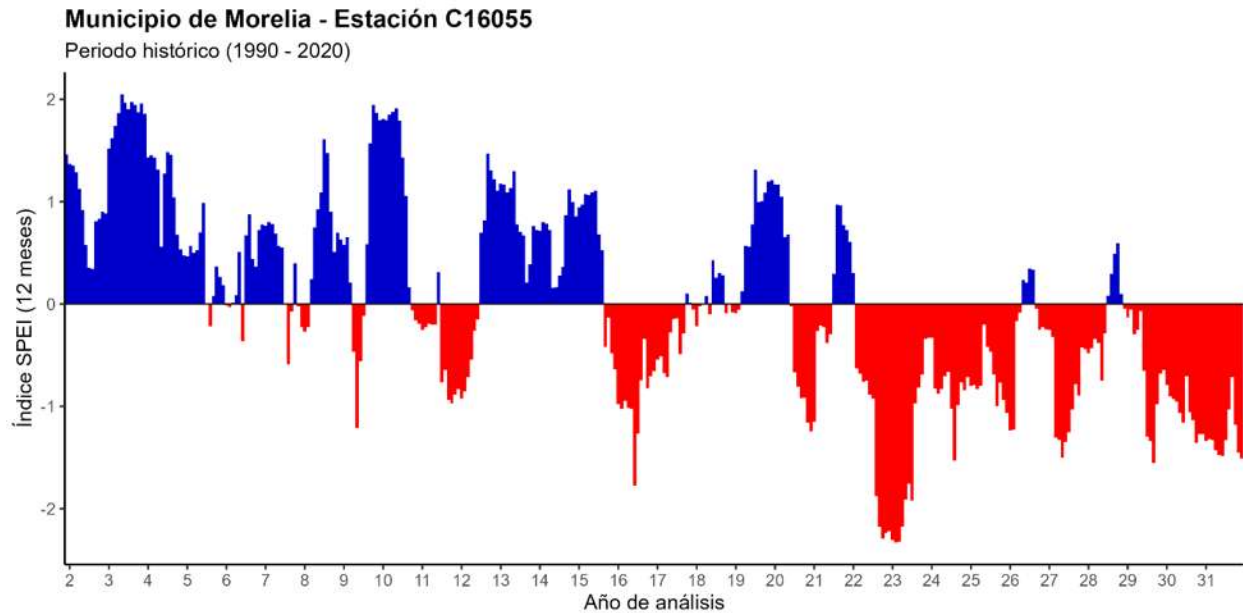
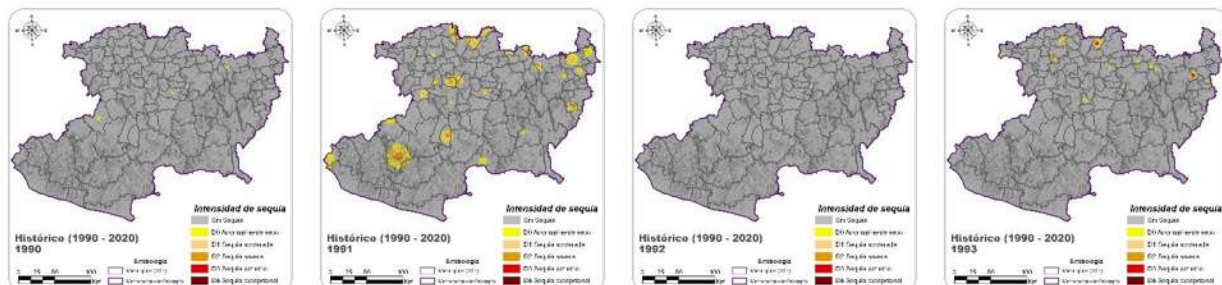


Figura 9.22 Comportamiento del SPEI – 12 meses

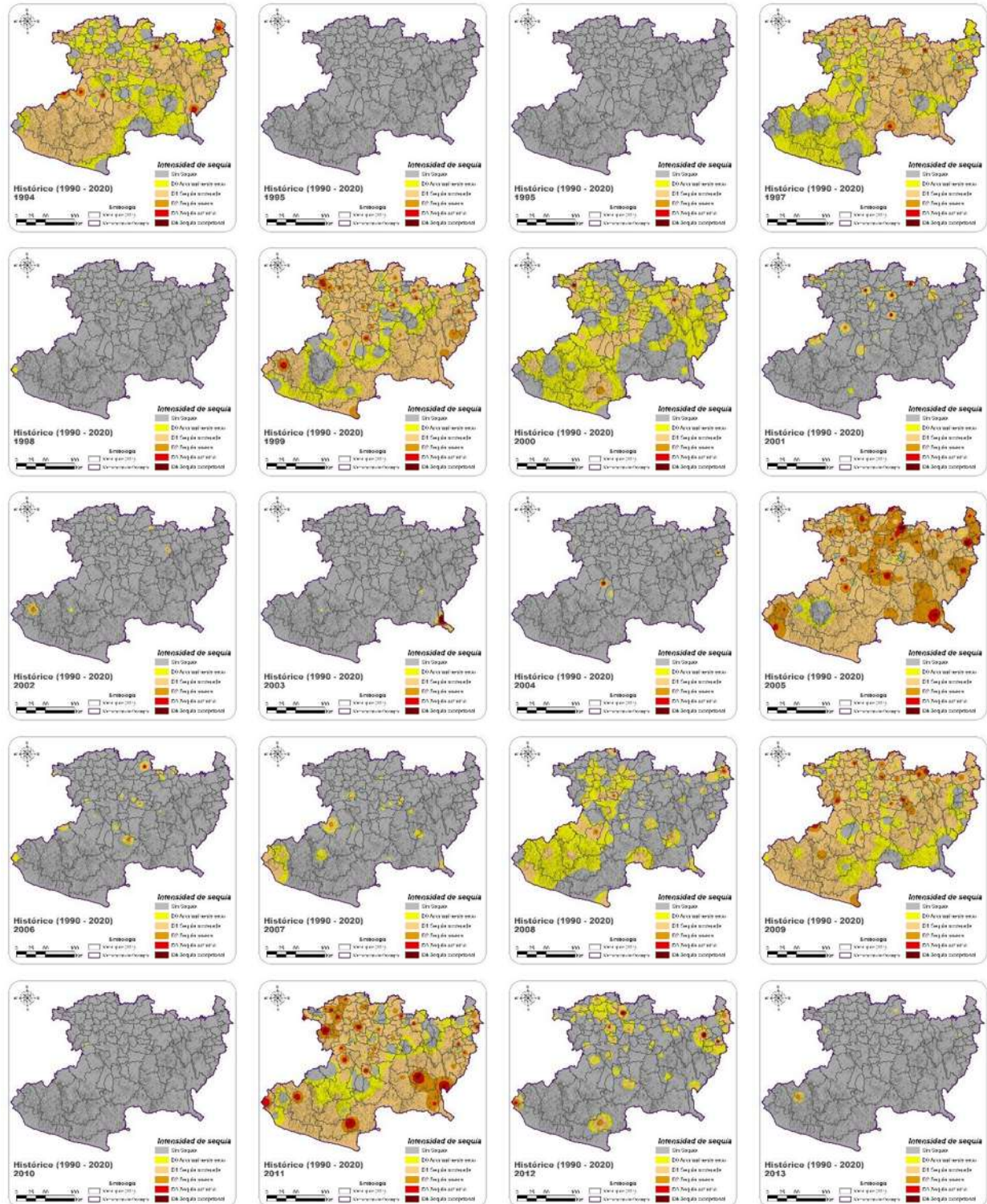
9.4.1 Distribución espacial de las sequías históricas

Para la distribución espacial de las sequías se realizó por medio del índice SPEI – 12. Se analizaron 30 años de datos continuos para el periodo histórico. Se muestra en la **Figura 9.23** para el periodo 1990 – 2020.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos



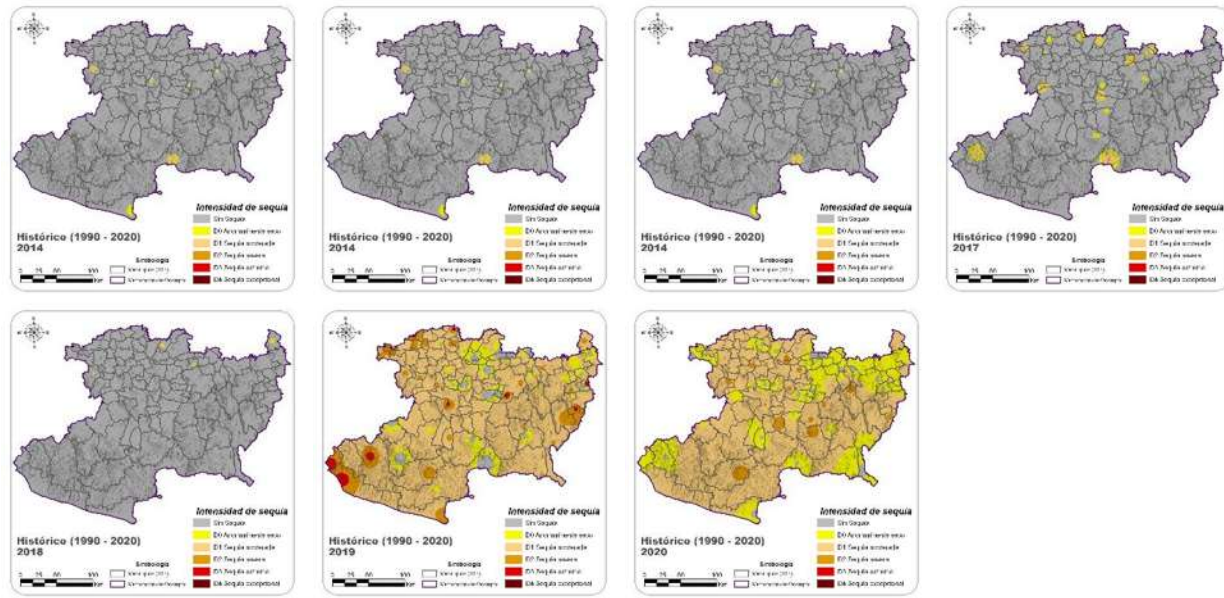


Figura 9.23 Comparativa SPEI - 12 meses (1990-2020).

9.4.2 Caracterización de sequías meteorológicas históricas

Mediante el análisis del indicador de sequía SPEI – 12 meses, se presentaron las duraciones, intensidad y magnitud media en la **Tabla 9.10** y su mapeo geoespacial del estado de Michoacán en la **Figura 9.24**.

Tabla 9.10 Caracterización SPEI de 12 meses.

ID	Municipio	Estación	Numero de eventos	Duración media	Intensidad media	Magnitud media
1	Acuitzio	C16001	8	9	-1.3	-12
2	Aguililla	C16003	9	9	-1.3	-11
3	Álvaro Obregón	C16091	7	11	-1.4	-15
4	Angamacutiro	C16159	9	9	-1.3	-12
5	Angangueo	EF01	8	10	-1.3	-13
6	Apatzingán	C16007	8	11	-1.3	-14
7	Aporo	EF02	8	12	-1.2	-15
8	Aquila	C16102	8	10	-1.2	-13
9	Ario	C16515	8	10	-1.2	-13
10	Arteaga	C16151	8	11	-1.2	-14
11	Briseñas	EF03	11	8	-1.1	-10
12	Buenavista	C16011	9	10	-1.2	-12
13	Carácuaro	C16187	10	8	-1.2	-11
14	Coahuayana	C16195	9	10	-1.1	-13
15	Coalcomán de Vázquez Pallares	C16154	12	8	-1.2	-9
16	Coeneo	EF11	10	9	-1.2	-11

Continua

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

17	Contepec	C16175	8	11	-1.2	-14
18	Copándaro	C16023	7	13	-1.2	-16
19	Copándaro	C16027	10	10	-1.1	-11
20	Cotija	C16043	8	11	-1.2	-13
21	Charapan	EF04	9	11	-1.1	-13
22	Charo	EF05	10	9	-1.1	-11
23	Chavinda	EF06	11	7	-1.2	-9
24	Cherán	EF07	11	8	-1.2	-10
25	Chilchota	EF08	7	11	-1.2	-15
26	Chinicuila	EF09	10	9	-1.2	-11
27	Chucándiro	C16034	8	11	-1.2	-14
28	Churintzio	EF10	13	7	-1.1	-9
29	Churumuco	C16035	9	9	-1.2	-11
30	Ecuandureo	EF13	8	9	-1.3	-13
31	Epitacio Huerta	C16233	7	11	-1.4	-15
32	Erongarícuaro	EF14	15	7	-1.1	-8
33	Gabriel Zamora	C16089	5	17	-1.3	-22
34	Hidalgo	C16020	9	10	-1.1	-12
35	La Huacana	C16062	10	8	-1.2	-11
36	Huandacareo	C16250	7	11	-1.2	-15
37	Huaniqueo	C16050	9	10	-1.2	-13
38	Huetamo	C16051	9	10	-1.2	-12
39	Huiramba	EF15	11	8	-1.1	-9
40	Indaparapeo	C16105	9	11	-1.2	-14
41	Irimbo	C16213	7	12	-1.2	-16
42	Ixtlán	C16054	10	8	-1.2	-11
43	Jacona	C16162	10	8	-1.2	-10
44	Jiménez	C16057	11	8	-1.2	-9
45	Jiquilpan	C16197	9	10	-1.1	-12
46	Juárez	EF16	8	9	-1.3	-12
47	Jungapeo	C16206	8	11	-1.2	-13
48	Lagunillas	EF17	11	8	-1.2	-10
49	Madero	C16140	12	7	-1.2	-9
50	Maravatío	C16078	9	9	-1.2	-12
51	Marcos Castellanos	EF18	9	10	-1.1	-12
52	Lázaro Cárdenas	C16227	10	8	-1.3	-10
53	Morelia	C16055	11	8	-1.1	-9
54	Morelos	EF19	8	8	-1.3	-12
55	Múgica	C16026	11	9	-1.2	-10
56	Nahuatzen	EF20	9	10	-1.2	-12
57	Nocupétaro	EF21	9	10	-1.1	-12
58	Nuevo Parangaricutiro	C16259	9	10	-1.1	-13
59	Nuevo Urecho	EF22	9	9	-1.2	-11
60	Numarán	EF23	12	7	-1.2	-8
61	Ocampo	C16079	10	8	-1.1	-10
62	Pajacuarán	C16083	5	15	-1.3	-20
63	Panindícuaro	C16084	10	9	-1.2	-11
64	Parácuaro	C16085	10	8	-1.1	-10
65	Paracho	EF24	7	12	-1.3	-16
66	Pátzcuaro	C16087	7	12	-1.3	-15
67	Penjamillo	C16243	10	9	-1.2	-11
68	Peribán	C16088	8	9	-1.3	-12
69	La Piedad	C16065	7	11	-1.3	-15
70	Purépero	C16103	12	7	-1.2	-9
71	Puruándiro	C16104	7	11	-1.2	-14
72	Queréndaro	C16096	11	9	-1.1	-11
73	Quiroga	C16118	10	8	-1.2	-11
74	Cojumatlán de Régules	EF12	9	8	-1.2	-11
75	Los Reyes	C16053	10	11	-1.1	-13

Continúa

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

76	Sahuayo	C16174	10	9	-1.1	-11
77	San Lucas	C16113	10	7	-1.2	-10
78	Santa Ana Maya	EF25	12	7	-1.2	-9
79	Salvador Escalante	C16146	9	11	-1.1	-13
80	Senguio	C16121	7	10	-1.2	-13
81	Susupuato	C16122	7	11	-1.3	-15
82	Tacámbaro	C16123	9	10	-1.2	-13
83	Tancítaro	EF26	8	11	-1.2	-14
84	Tangamandapio	EF27	9	10	-1.3	-12
85	Tangancícuaro	C16125	13	7	-1.1	-8
86	Tanhuato	C16224	7	11	-1.3	-15
87	Taretan	C16127	9	9	-1.3	-12
88	Tarímbaro	C16512	9	10	-1.3	-13
89	Tepalcatepec	C14177	10	8	-1.2	-11
90	Tingambato	C16203	7	15	-1.2	-18
91	Tingüindín	EF28	10	9	-1.2	-11
92	Tiquicheo de Nicolás Romero	C16132	10	8	-1.2	-11
93	Tlalpujahua	EF29	7	13	-1.2	-16
94	Tlazazalca	EF30	11	7	-1.2	-9
95	Tocumbo	C16194	12	7	-1.2	-9
96	Tumbiscatío	C16242	11	8	-1.1	-10
97	Turicato	C16133	12	8	-1.2	-9
98	Tuxpan	C16258	10	7	-1.3	-10
99	Tuzantla	C16163	11	8	-1.2	-10
100	Tzintzuntzan	EF31	9	8	-1.3	-11
101	Tzitzio	C16136	12	8	-1.2	-9
102	Uruapan	C16165	8	10	-1.2	-13
103	Venustiano Carranza	C16029	11	10	-1.1	-11
104	Villamar	C16095	11	7	-1.2	-10
105	Vista Hermosa	C16093	10	8	-1.2	-11
106	Yurécuaro	C16141	8	9	-1.4	-12
107	Zacapu	C16142	7	12	-1.2	-15
108	Zamora	C16048	9	11	-1.2	-13
109	Zináparo	EF32	8	12	-1.1	-15
110	Zinapécuaro	C16145	8	12	-1.3	-15
111	Ziracuaretiro	EF33	9	10	-1.2	-13
112	Zitácuaro	C16192	8	13	-1.2	-16
113	José Sixto Verduzco	C16086	11	7	-1.3	-10

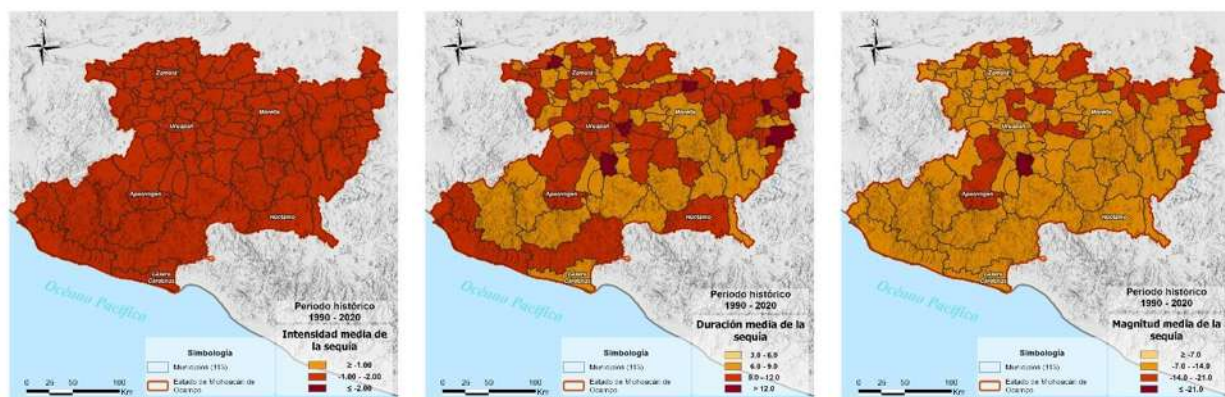


Figura 9.24 Caracterización media SPEI – 12 meses.

9.4.2.1 Caracterización de sequías históricas máximas

La evaluación de las sequías considerando su duración, intensidad y magnitud máximas es fundamental para entender el comportamiento de la sequía y severidad. La duración máxima permite identificar los periodos más prolongados de déficit (**Tabla 9.11**). Por su parte, la intensidad máxima refleja el déficit más crítico, facilitando la identificación de los momentos y regiones con mayor riesgo. La severidad máxima, al integrar ambos factores, proporciona el impacto total de la sequía (**Figura 9.25**).

Tabla 9.11 Caracterización máxima SPEI – 12.

ID	Municipio	Estación	Duración media	Intensidad media	Magnitud media
1	Acuitzio	C16001	15	-0.7	-3
2	Aguililla	C16003	21	-0.8	-2
3	Álvaro Obregón	C16091	19	-1	-7
4	Angamacutiro	C16159	13	-0.9	-5
5	Angangueo	EF01	18	-0.9	-3
6	Apatzingán	C16007	20	-1	-7
7	Aporo	EF02	33	-0.8	-3
8	Aquila	C16102	19	-0.8	-2
9	Ario	C16515	26	-0.8	-3
10	Arteaga	C16151	31	-0.9	-4
11	Briseñas	EF03	16	-0.7	-2
12	Buenavista	C16011	29	-0.8	-3
13	Carácuaro	C16187	20	-0.8	-3
14	Coahuayana	C16195	31	-0.8	-2
15	Coalcomán de Vázquez Pallares	C16154	18	-0.9	-3
16	Coeneo	EF11	16	-0.8	-3
17	Contepec	C16175	27	-0.8	-3
18	Copándaro	C16023	27	-0.8	-3
19	Copándaro	C16027	24	-0.8	-3
20	Cotija	C16043	30	-0.9	-4
21	Charapan	EF04	24	-0.8	-3
22	Charo	EF05	23	-0.8	-3
23	Chavinda	EF06	16	-0.8	-3
24	Cherán	EF07	16	-0.8	-3
25	Chilchota	EF08	30	-0.8	-2
26	Chinicuila	EF09	23	-0.8	-3
27	Chucándiro	C16034	25	-0.9	-4
28	Churintzio	EF10	14	-0.8	-3
29	Churumuco	C16035	23	-1	-4
30	Ecuandureo	EF13	20	-0.9	-3
31	Epitacio Huerta	C16233	24	-1	-5
32	Erongarícuaro	EF14	14	-0.7	-2
33	Gabriel Zamora	C16089	25	-1	-6
34	Hidalgo	C16020	29	-0.7	-3
35	La Huacana	C16062	12	-0.9	-4
36	Huandacareo	C16250	15	-0.7	-4
37	Huaniqueo	C16050	24	-0.8	-2
38	Huetamo	C16051	16	-0.9	-5
39	Huiramba	EF15	26	-0.8	-2
40	Indaparapeo	C16105	19	-0.9	-4
41	Irimbo	C16213	36	-0.8	-3

Continúa

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

42	Ixtlán	C16054	16	-1	-3
43	Jacona	C16162	20	-0.8	-3
44	Jiménez	C16057	18	-0.8	-2
45	Jiquilpan	C16197	25	-0.8	-2
46	Juárez	EF16	16	-1	-4
47	Jungapeo	C16206	25	-0.8	-2
48	Lagunillas	EF17	14	-0.8	-3
49	Madero	C16140	24	-0.9	-3
50	Maravatío	C16078	21	-0.9	-3
51	Marcos Castellanos	EF18	19	-0.8	-2
52	Lázaro Cárdenas	C16227	12	-0.9	-3
53	Morelia	C16055	16	-0.7	-2
54	Morelos	EF19	15	-0.7	-2
55	Múgica	C16026	26	-1	-4
56	Nahuatzen	EF20	15	-1	-5
57	Nocupétaro	EF21	28	-0.8	-3
58	Nuevo Parangaricutiro	C16259	28	-0.8	-3
59	Nuevo Urecho	EF22	16	-0.9	-3
60	Numarán	EF23	13	-0.8	-3
61	Ocampo	C16079	17	-0.8	-3
62	Pajacuarán	C16083	31	-0.9	-3
63	Panindícuaro	C16084	19	-0.8	-4
64	Parácuaro	C16085	17	-0.7	-2
65	Paracho	EF24	27	-1	-3
66	Pátzcuaro	C16087	16	-0.8	-5
67	Penjamillo	C16243	16	-0.9	-3
68	Peribán	C16088	14	-0.8	-3
69	La Piedad	C16065	19	-0.8	-4
70	Purépero	C16103	16	-0.8	-2
71	Puruándiro	C16104	21	-0.8	-2
72	Queréndaro	C16096	27	-0.8	-3
73	Quiroga	C16118	18	-0.8	-3
74	Cojumatlán de Régules	EF12	13	-0.8	-3
75	Los Reyes	C16053	36	-0.8	-2
76	Sahuayo	C16174	20	-0.8	-3
77	San Lucas	C16113	13	-0.8	-3
78	Santa Ana Maya	EF25	21	-0.8	-2
79	Salvador Escalante	C16146	26	-0.8	-3
80	Senguio	C16121	21	-0.9	-3
81	Susupuato	C16122	16	-1	-3
82	Tacámbaro	C16123	16	-0.9	-5
83	Tancitaro	EF26	27	-0.8	-3
84	Tangamandapio	EF27	15	-1	-4
85	Tangancícuaro	C16125	15	-0.8	-3
86	Tanhuato	C16224	26	-0.9	-6
87	Taretan	C16127	13	-0.8	-4
88	Tarímbaro	C16512	22	-1	-4
89	Tepalcatepec	C14177	15	-0.8	-2
90	Tingambato	C16203	26	-0.9	-8
91	Tingüindín	EF28	16	-0.8	-3
92	Tiquicheo de Nicolás Romero	C16132	14	-0.9	-4
93	Tlalpujahua	EF29	26	-0.8	-3
94	Tlazazalca	EF30	12	-0.8	-2
95	Tocumbo	C16194	15	-0.9	-4
96	Tumbiscatío	C16242	16	-0.7	-3
97	Turicato	C16133	15	-0.9	-4
98	Tuxpan	C16258	12	-0.8	-3
99	Tuzantla	C16163	16	-0.8	-3
100	Tzintzuntzan	EF31	13	-0.8	-2

Continúa

101	Tzitzio	C16136	13	-0.8	-2
102	Uruapan	C16165	19	-0.9	-5
103	Venustiano Carranza	C16029	26	-0.7	-2
104	Villamar	C16095	13	-0.8	-2
105	Vista Hermosa	C16093	16	-0.8	-3
106	Yurécuaro	C16141	13	-1	-5
107	Zacapu	C16142	26	-0.8	-3
108	Zamora	C16048	26	-0.8	-4
109	Zináparo	EF32	31	-0.8	-3
110	Zinapécuaro	C16145	22	-1.1	-4
111	Ziracuaretiro	EF33	16	-0.8	-3
112	Zitácuaro	C16192	26	-0.7	-2
113	José Sixto Verduzco	C16086	14	-0.8	-2

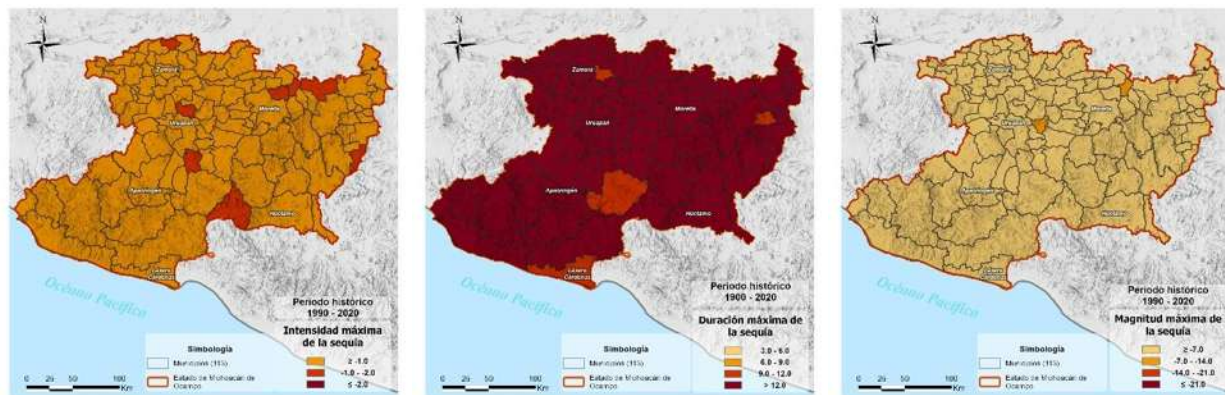
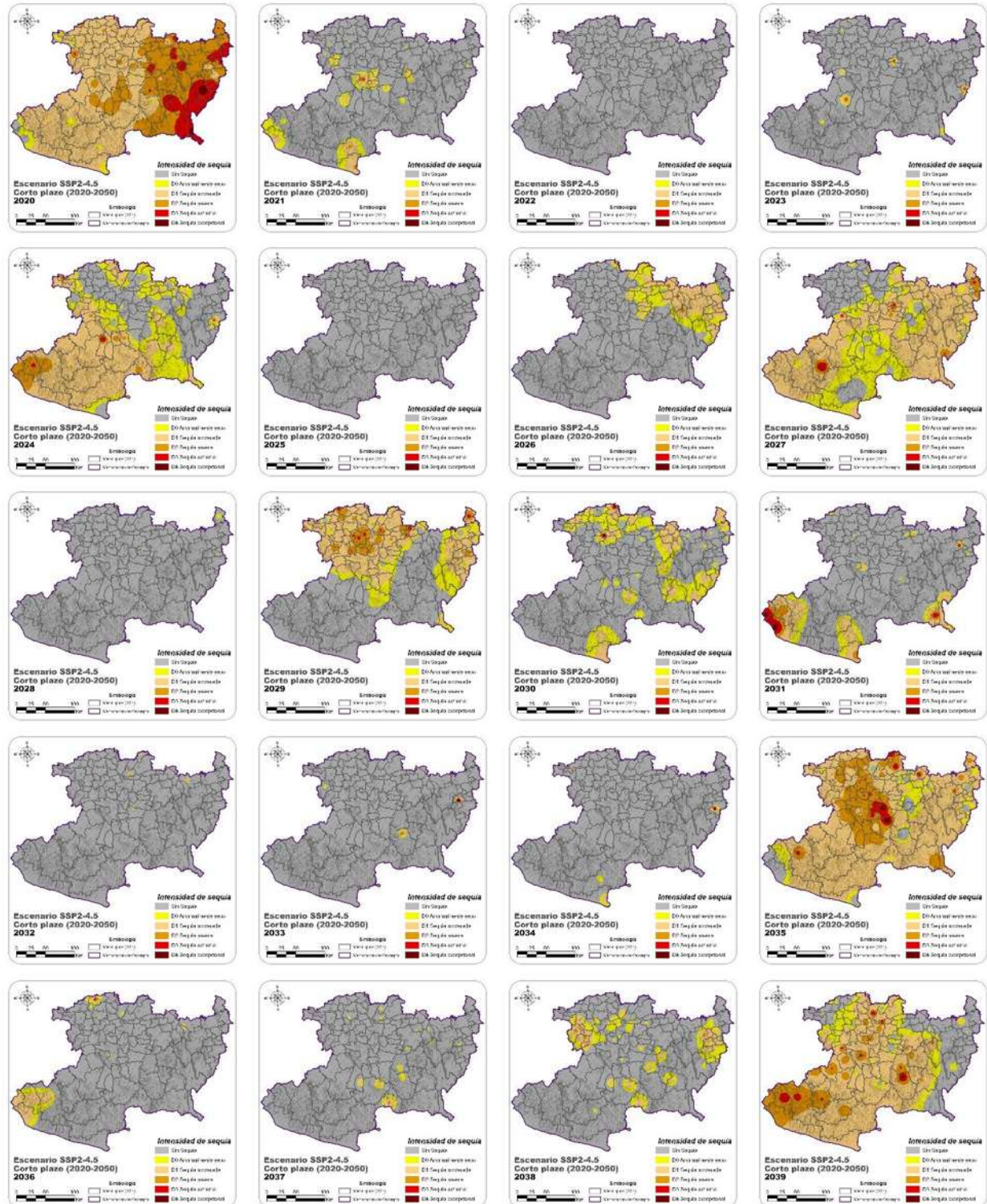


Figura 9.25 Mapeo de la caracterización máxima SPEI – 12.

9.4.3 Distribución espacial de sequías considerando el efecto del cambio climático

La distribución espacial de las sequías se realizó mediante el uso del índice SPEI, el cual, de acuerdo con análisis previos, es uno de los indicadores más sensibles a los efectos del cambio climático. Se utilizó una escala temporal de 12 meses, considerando los periodos 2020 – 2050 y 2070 – 2100, bajo los escenarios SSP2 - 4.5 y SSP5 - 8.5. Esta escala permite analizar la acumulación de precipitación y evapotranspiración a lo largo de un año completo, proporcionando una visión integral de las condiciones de sequía en el tiempo y el espacio.

Para el escenario SSP2 – 4.5, la distribución espacial de las sequías se presenta para los periodos a corto (**Figura 9.26**) y largo plazo (**Figura 9.27**).



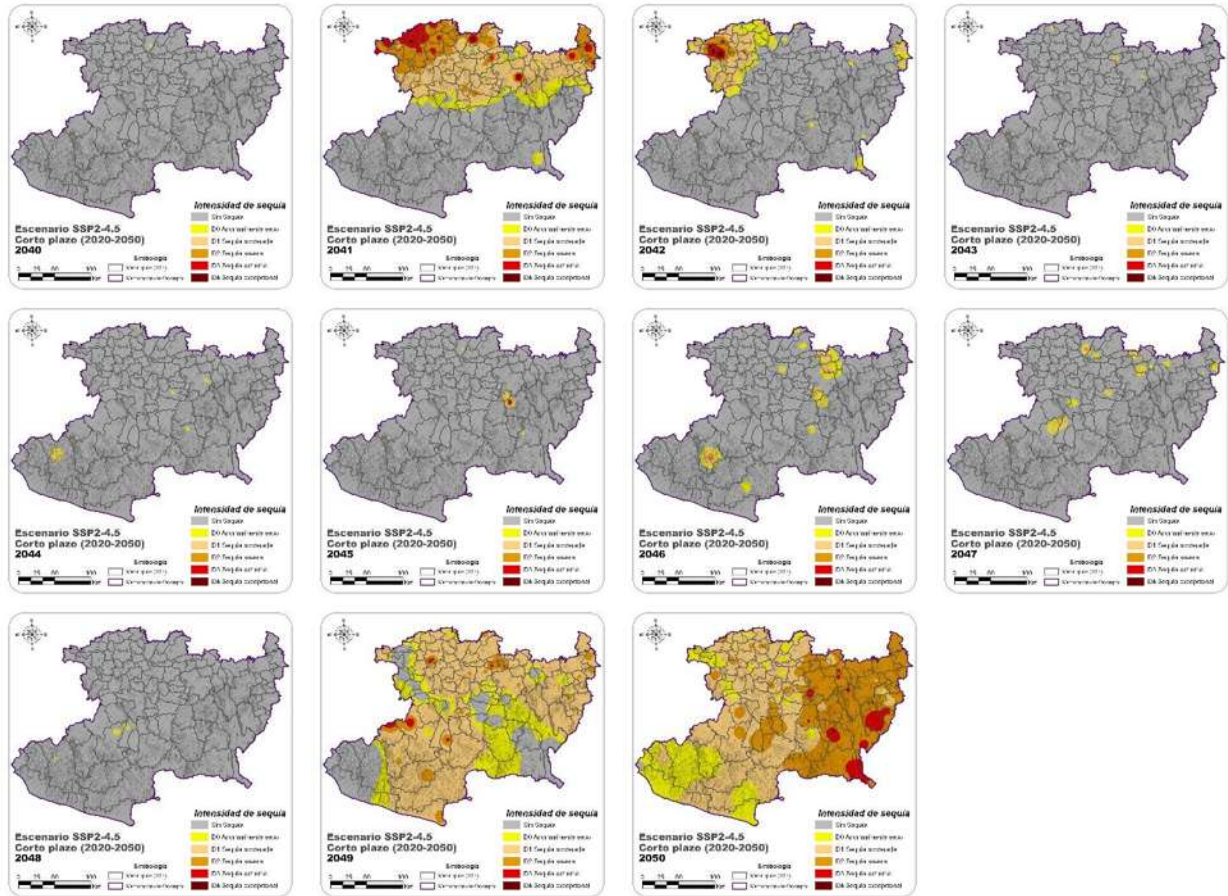
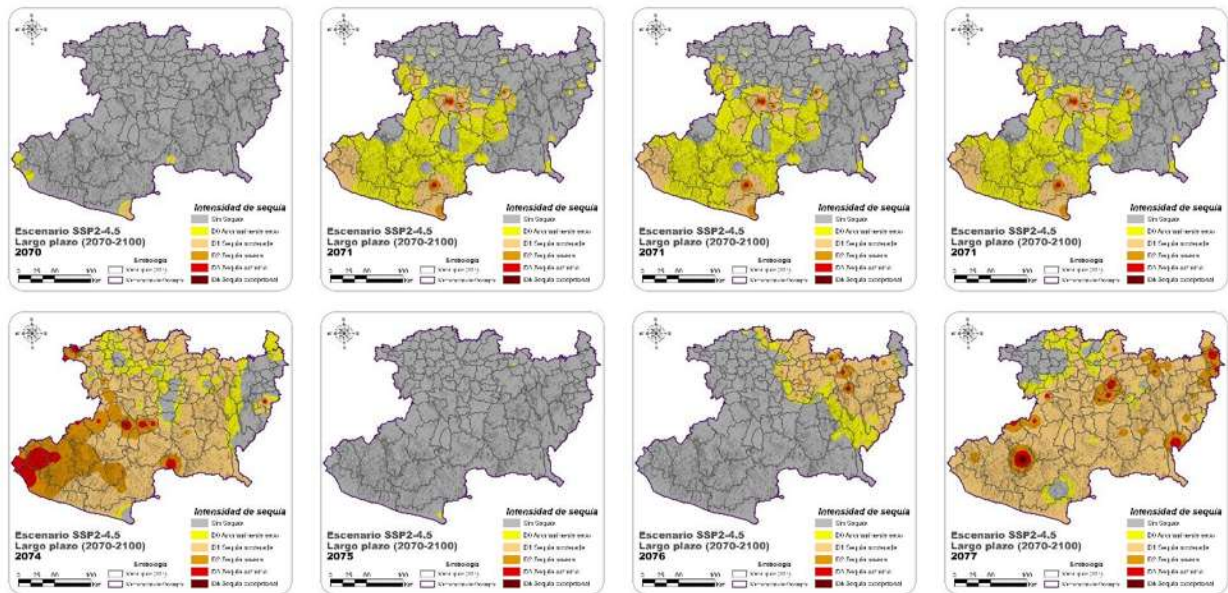
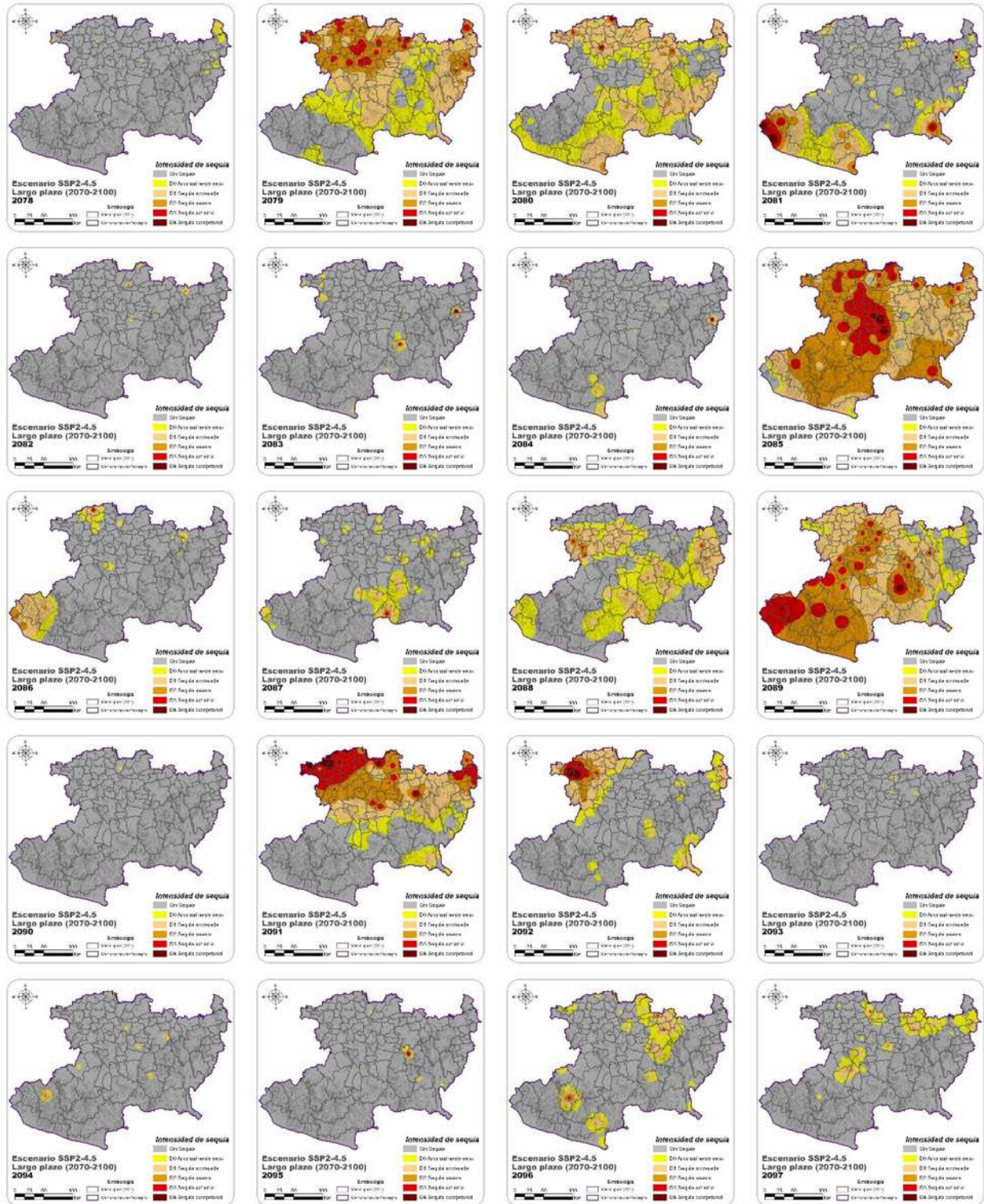


Figura 9.26 Sequías meteorológicas SSP2-4.5 a corto plazo (SPEI – 12).



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos



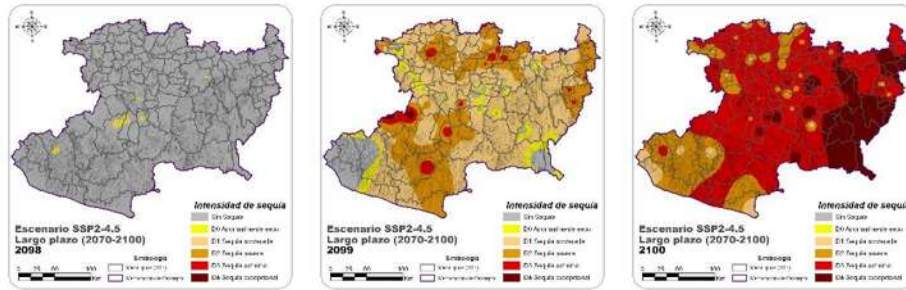
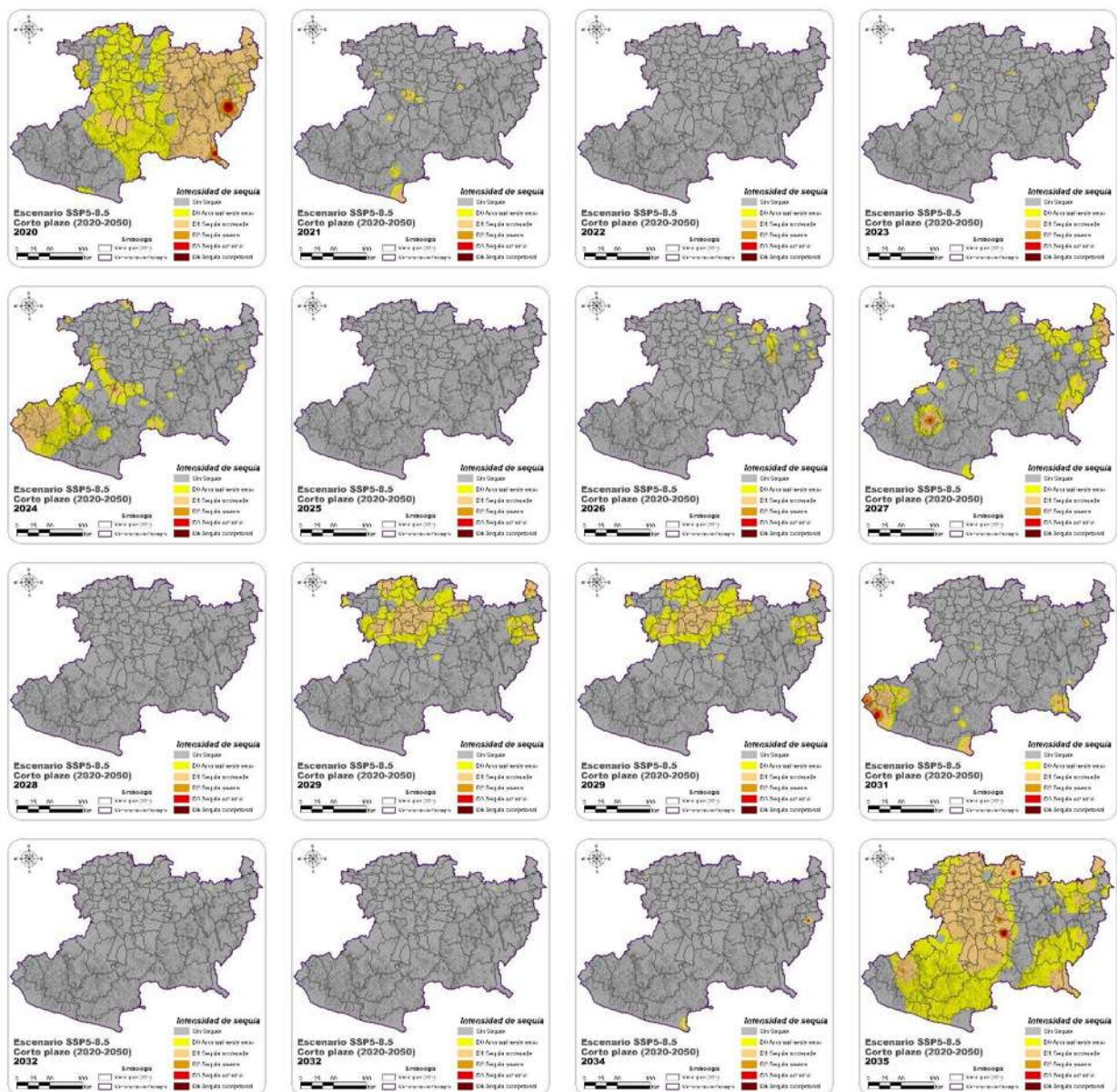


Figura 9.27 Sequías meteorológicas SSP2-4.5 a largo plazo (SPEI – 12).

Para el escenario SSP5 – 8.5, la distribución espacial de las sequías se presenta para corto (Figura 9.28) y largo plazo (Figura 9.29).



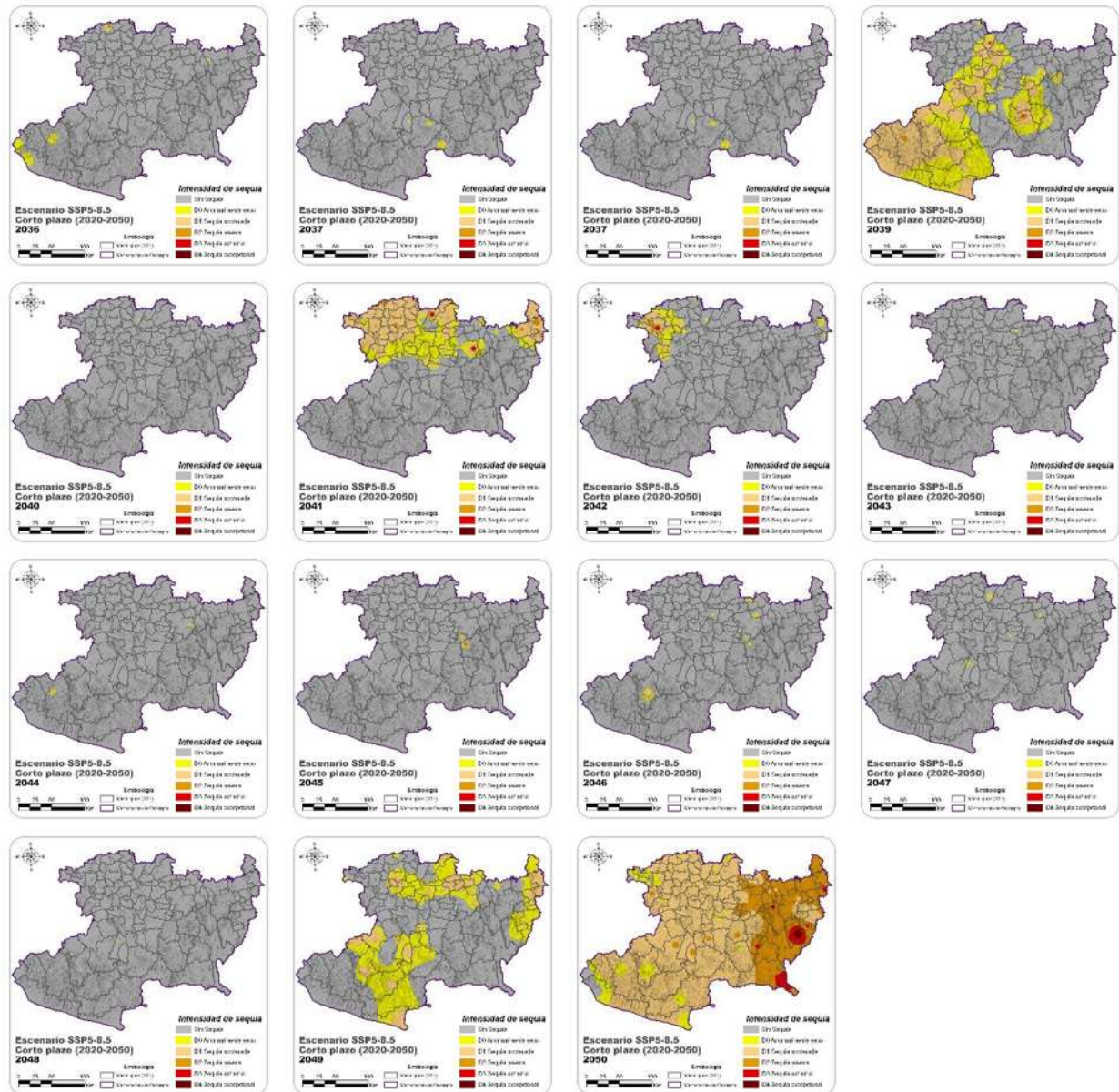
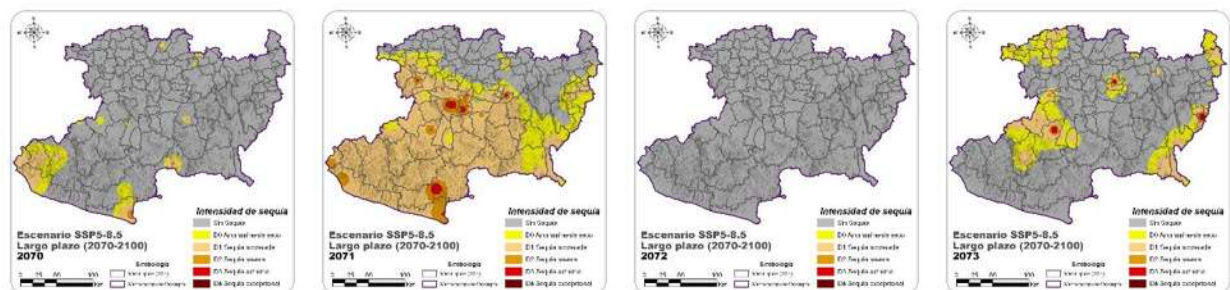
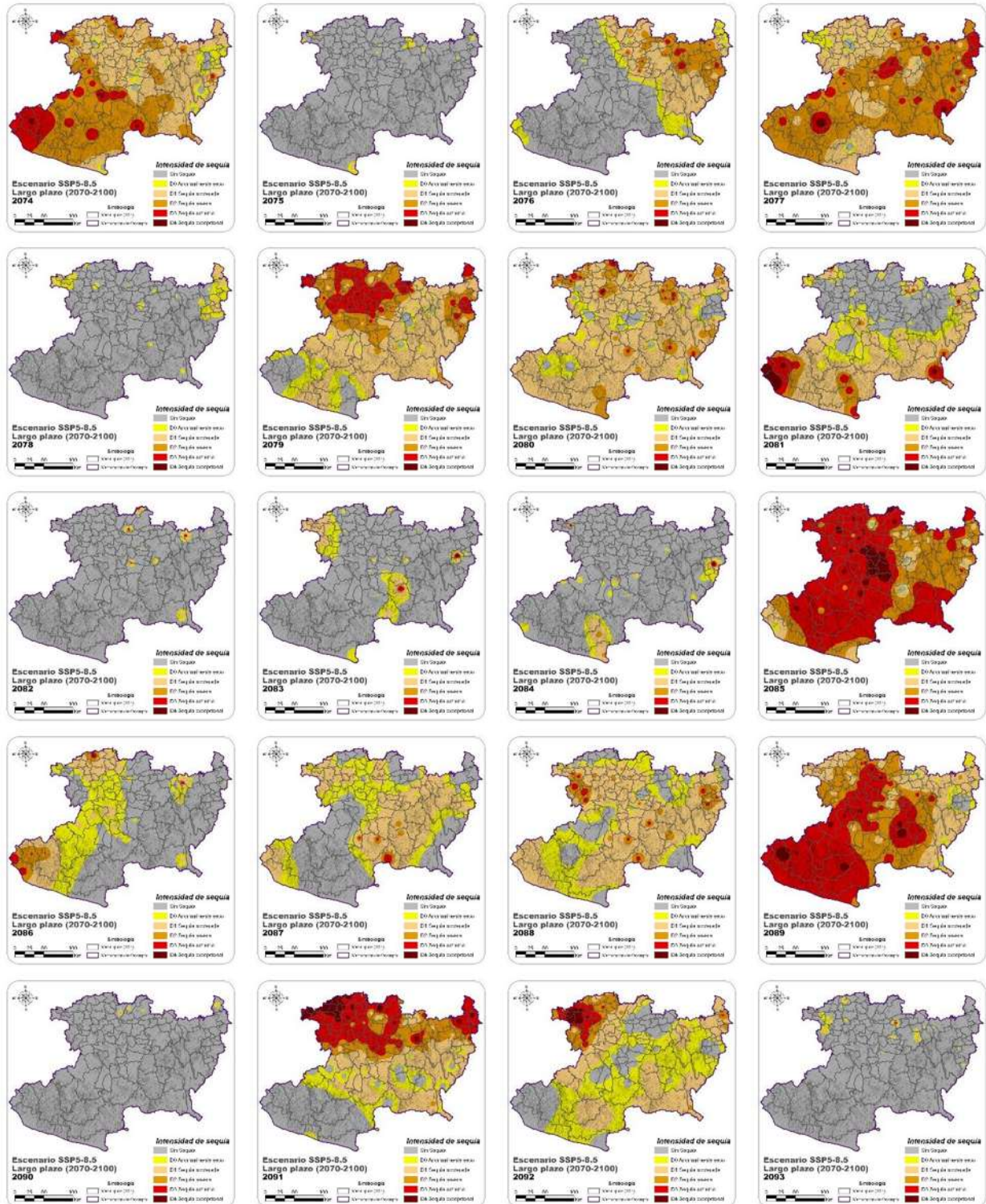


Figura 9.28 Sequías meteorológicas SSP5 8.5 a corto plazo (SPEI – 12).



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos



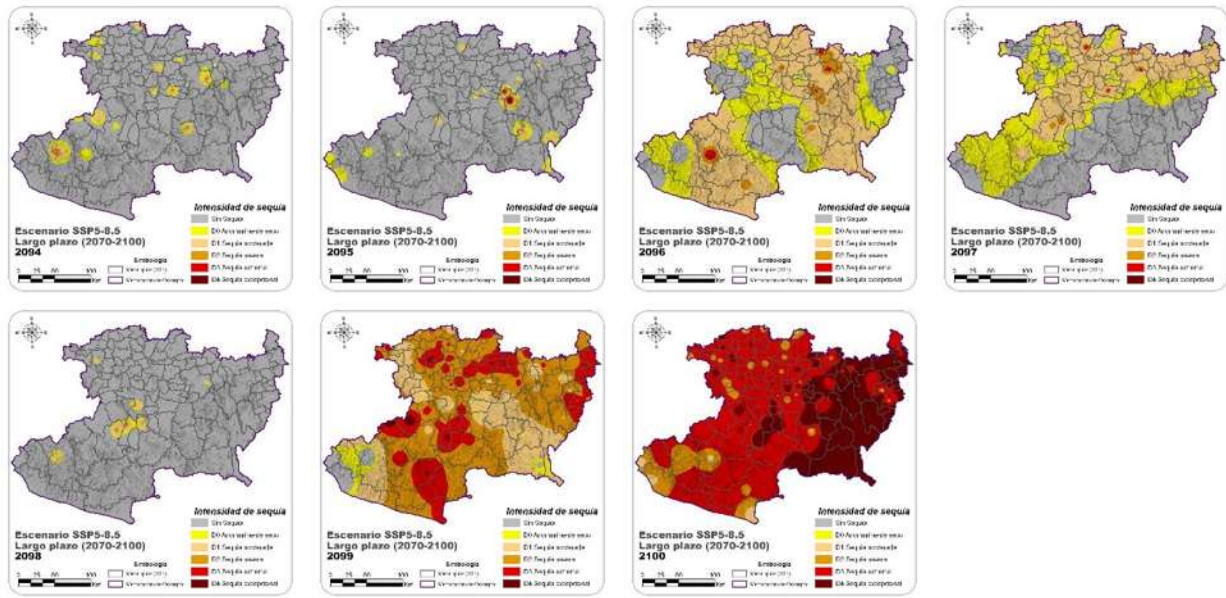


Figura 9.29 Sequías meteorológicas SSP5 8.5 a largo plazo (SPEI – 12).

9.4.4 Caracterización de las sequías meteorológicas considerando el efecto del cambio climático

A partir del análisis del índice de sequía SPEI – 12, la **Figura 9.30** presenta la distribución espacial del SPEI medio bajo los escenarios SSP2–4.5 y SSP5–8.5, mientras que la **Figura 9.31** muestra la distribución espacial del SPEI máximo. Ambos resultados se reportan para los horizontes de corto plazo (2020–2050) y largo plazo (2070–2100).

SSP2 – 4.5

2020-2050



2070-2100



SSP5 – 8.5

2020-2050



2070 - 2100



Figura 9.30 Caracterización media de las sequías, en meses, para los escenarios de cambio climático SSP2 -4.5 y SSP5 - 8.5 en los periodos 2020 – 2050 y 2070 – 2100.

SSP2 – 4.5

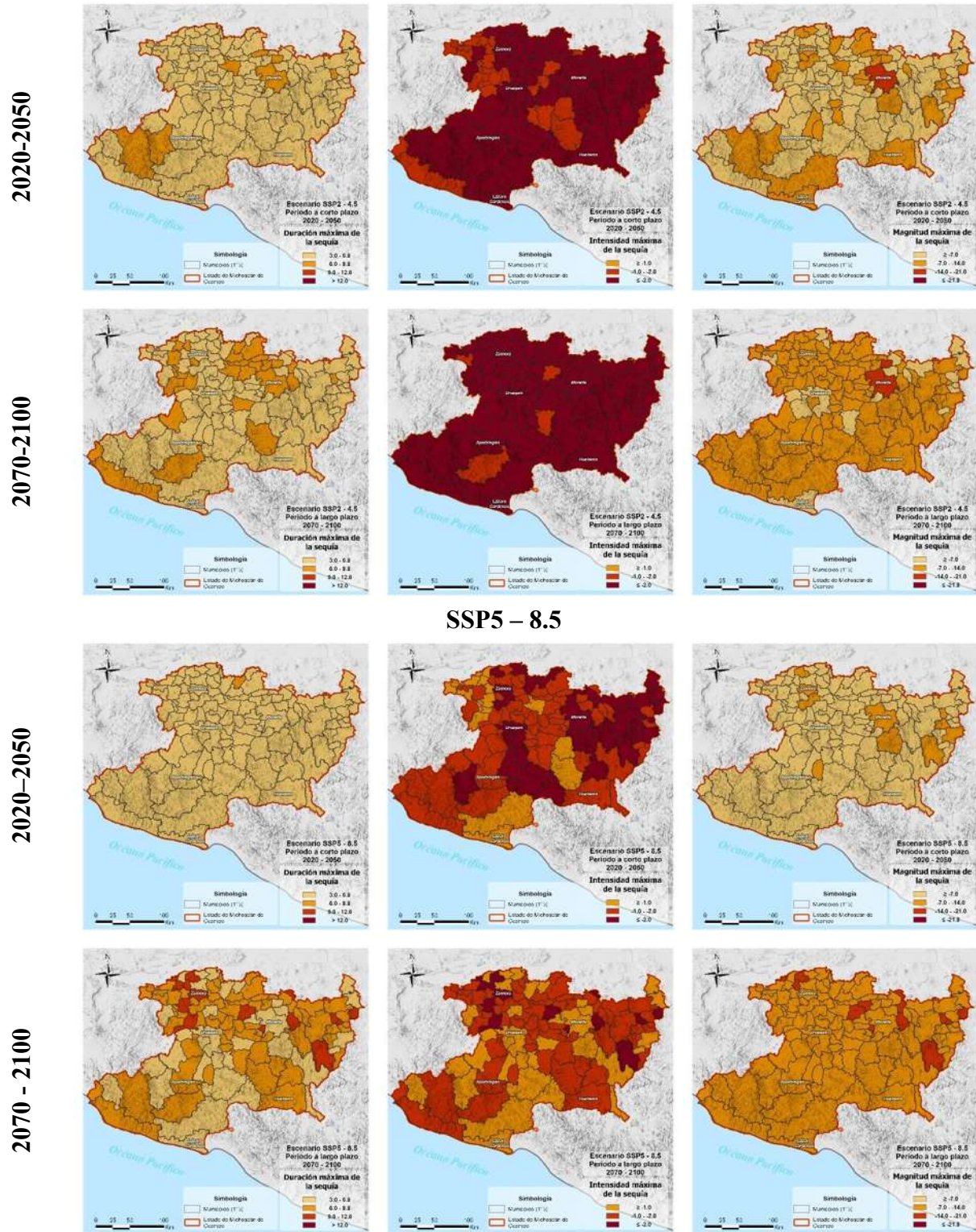


Figura 9.31 Caracterización máxima de las sequías, en meses, para los escenarios de cambio climático SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en los periodos 2020–2050 y 2070–2100.

9.5 Riesgo a las sequías

9.5.1 Índice de vulnerabilidad histórica

La vulnerabilidad se estimó a partir de la sensibilidad y la falta de capacidad de adaptación. Los coeficientes se obtuvieron mediante PCA para reflejar la contribución relativa de cada indicador en la construcción del índice

Las ponderaciones correspondientes la sensibilidad del sistema se presentan en la **Tabla 9.12**, mientras que las asociadas a la capacidad adaptativa de la población se muestran en la **Tabla 9.13**. Con base en estos indicadores y sus pesos, se generaron la clasificación en la cual se presentan en la **Figura 9.32** y **Figura 9.33**.

Tabla 9.12 indicadores de sensibilidad (S)

Índice	Peso	Indicador	ID	Peso
Ambiental	29	Evaporación potencial	ETP	29
		Índice de aridez	IA	31
		Superficie deforestada	SADEFR	18
		Superficie con incendios forestales	SAINFR	22
		Valor de producción agrícola (miles de \$)	PRODGAN	19
Economía	36	Población en condiciones de pobreza	PNS	22
		Población con ingresos inferior a las líneas del bienestar	PCIGMIN	32
		Población ocupada no depende de servicios de salud	PCPOB	27
		Población con carencias por acceso a la alimentación	PCALIM	33
Social	36	Población analfabeta mayor a 15 años	P15ANF	33
		Población dependiente menor a 5 años y mayor a 65 años	PD0565	34

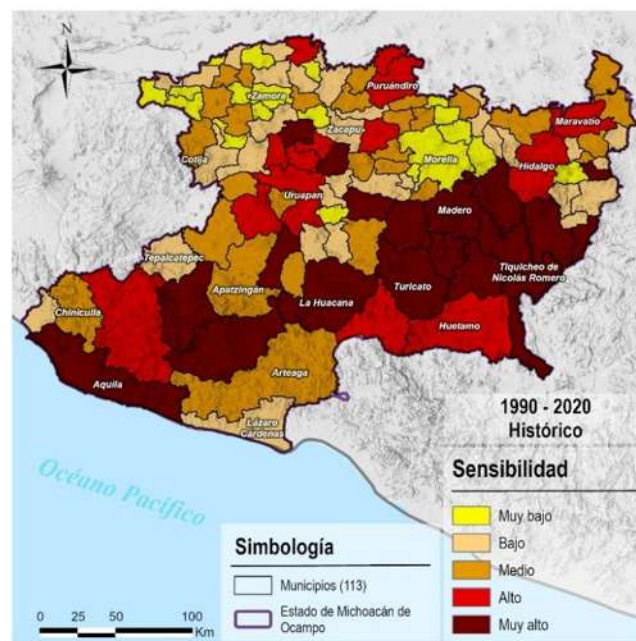


Figura 9.32 Clasificación municipal de la sensibilidad (S) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

Tabla 9.13 Indicadores de la capacidad de adaptación (CA)

Índice	Peso	Indicador	ID	Peso
Economía	100	Superficie rehabilitada al riesgo	SUP _{RR}	19
		Áreas protegidas	SUP _{PROG}	28
		Producto Interno Bruto por persona	PIB	26
		Población económicamente activa mayor a 12 años	PEA	27

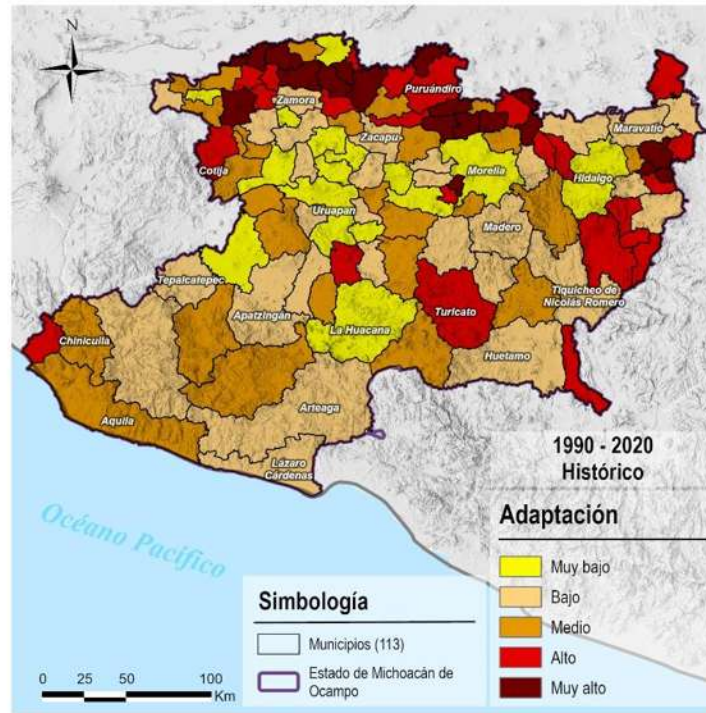


Figura 9.33 Clasificación municipal de la capacidad de adaptación (CA) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

Los coeficientes se estimaron mediante PCA, con el propósito de obtener la ponderación que representan la contribución relativa de cada componente en la construcción del índice de vulnerabilidad. De este procedimiento se derivó la relación presentada en la **Ecuación 9.1**, la cual se aplicó para la estimación del índice a escala municipal. Los resultados de dicha estimación se representan de manera espacial en la **Figura 9.34**, donde se muestra la clasificación municipal de la vulnerabilidad (V) a la sequía.

$$V = 0.56 S + 0.44(1 - CA)$$

Ecuación 9.1 Índice de vulnerabilidad.

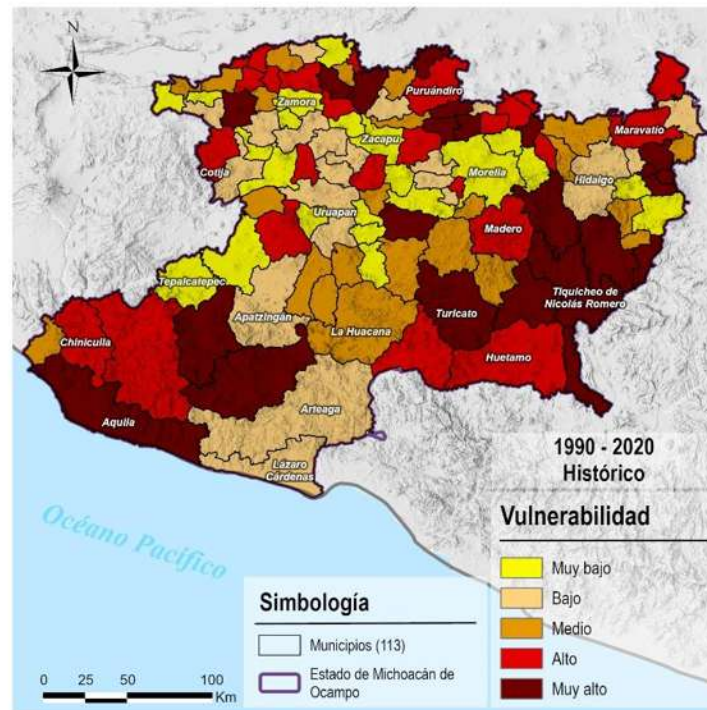


Figura 9.34 Clasificación municipal de la vulnerabilidad (V) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

9.5.2 Índice de riesgo por sequías para el periodo histórico

Una vez estimada la vulnerabilidad (V) a escala municipal, se procedió al cálculo del riesgo (R), definido como una función integrada de los componentes de exposición (E), peligro (H) y vulnerabilidad (V).

Para la caracterización de la exposición, en la **Tabla 9.14** se presentan los indicadores seleccionados y sus ponderaciones. Con base en dichos insumos se generó la cartografía municipal del componente de exposición (**Figura 9.35**). De manera complementaria, se elaboró la clasificación municipal del componente de peligro por sequías en el mismo periodo (**Figura 9.36**), la cual se integra posteriormente la vulnerabilidad para la estimación del riesgo

Tabla 9.14 Indicadores del grado de exposición (E)

Índice	Peso	Indicador	ID	Peso
Social	72	Vivienda que no dispone de agua entubada	VS _{SAE}	42
		Vivienda que no dispone de tinaco	VS _{TN}	58
Temperaturas	28	Temperaturas promedio	T _{prom}	36
		Precipitación media anual	Pr	28
		Porcentaje propenso a sequías	PSS	26

Figura 9.35 Clasificación municipal de la exposición (E) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

Figura 9.36 Clasificación municipal del peligro (H) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

Posteriormente, el Índice de Riesgo (R) se calculó mediante la **Ecuación 9.2**, incorporando ponderaciones derivadas del PCA para cuantificar la contribución relativa de cada factor integrante. El resultado de esta integración se representa espacialmente en la **Figura 9.37**.

$$R = 0.36 E + 0.34 V + 0.30 H$$

Ecuación 9.2 Índice de riesgo.

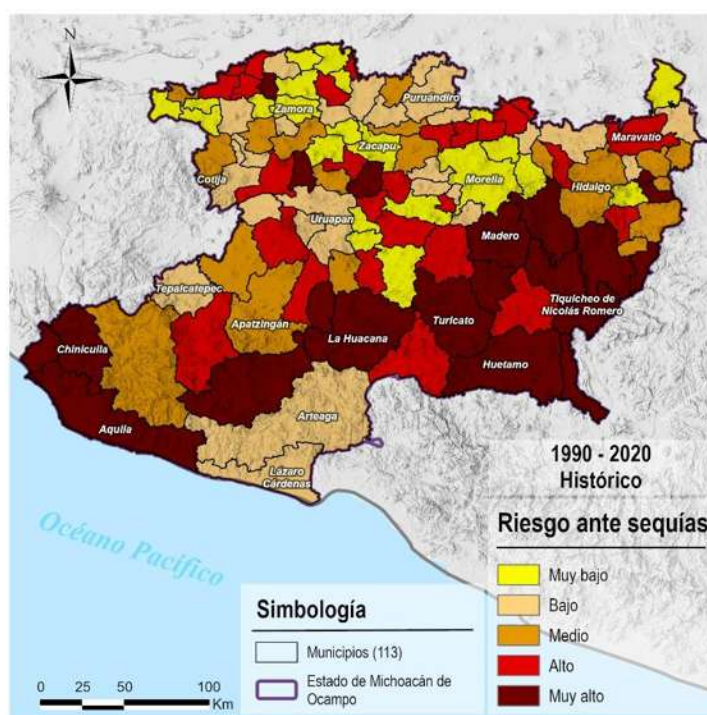


Figura 9.37 Clasificación municipal del riesgo (R) a la sequía: Michoacán (1990 – 2020).

9.5.3 Índice de vulnerabilidad futura

La vulnerabilidad se analizó en el contexto de los efectos del cambio climático a corto y largo plazo, considerando que las variables climáticas pueden modificarse bajo distintos escenarios futuros. Con base en los escenarios SSP2 - 4.5 y SSP5 – 8.5, se obtuvieron diferentes niveles espaciales de sensibilidad, capacidad de adaptación y vulnerabilidad, los cuales reflejan la combinación entre las trayectorias socioeconómicas (SSP) y los forzamientos radiactivos asociados a cada proyección. Estas comparaciones para ambos horizontes temporales se presentan en la **Figura 9.38**, **Figura 9.39** y **Figura 9.40**.

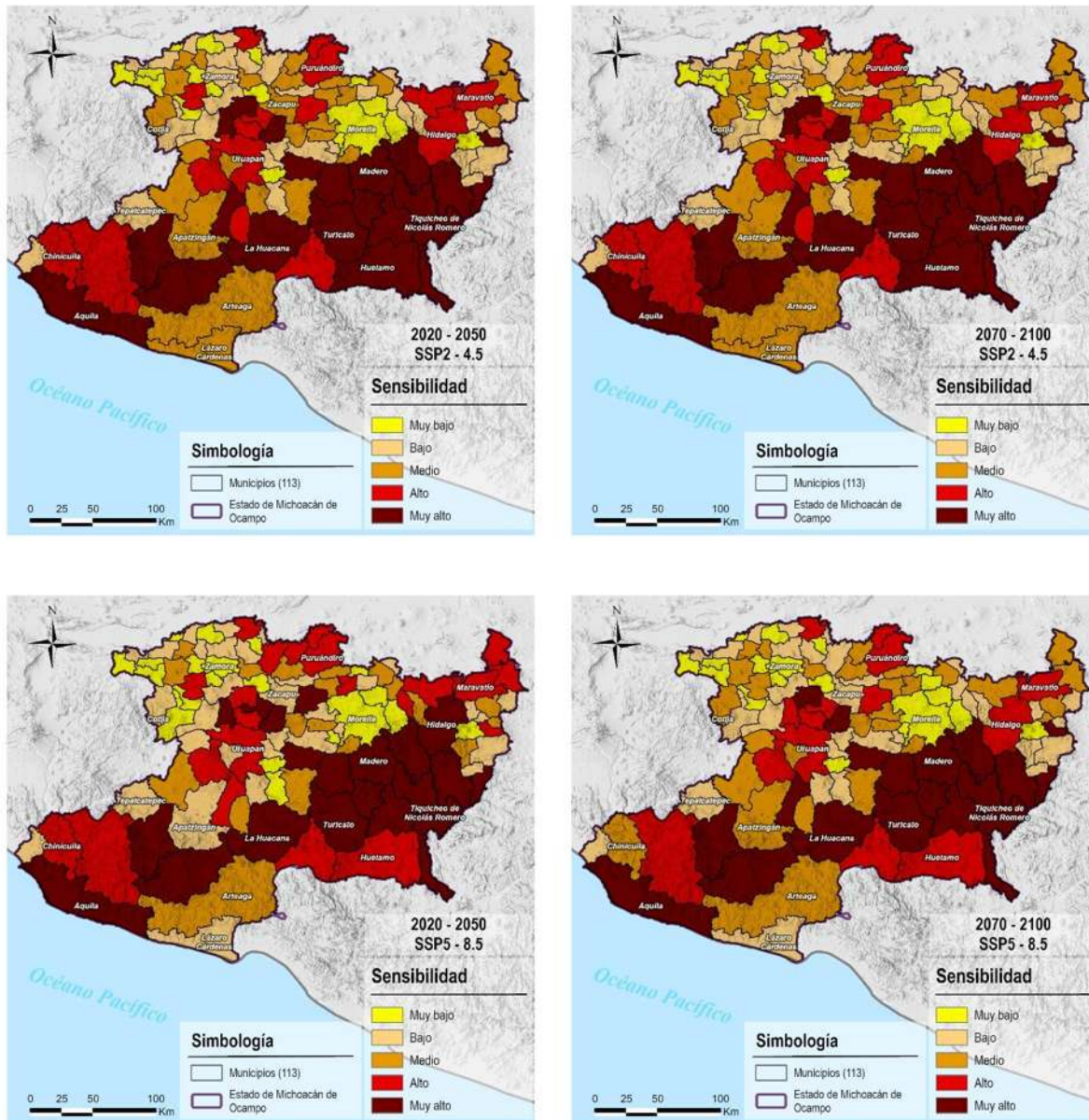


Figura 9.38 Comparación espacial de la sensibilidad (*S*) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

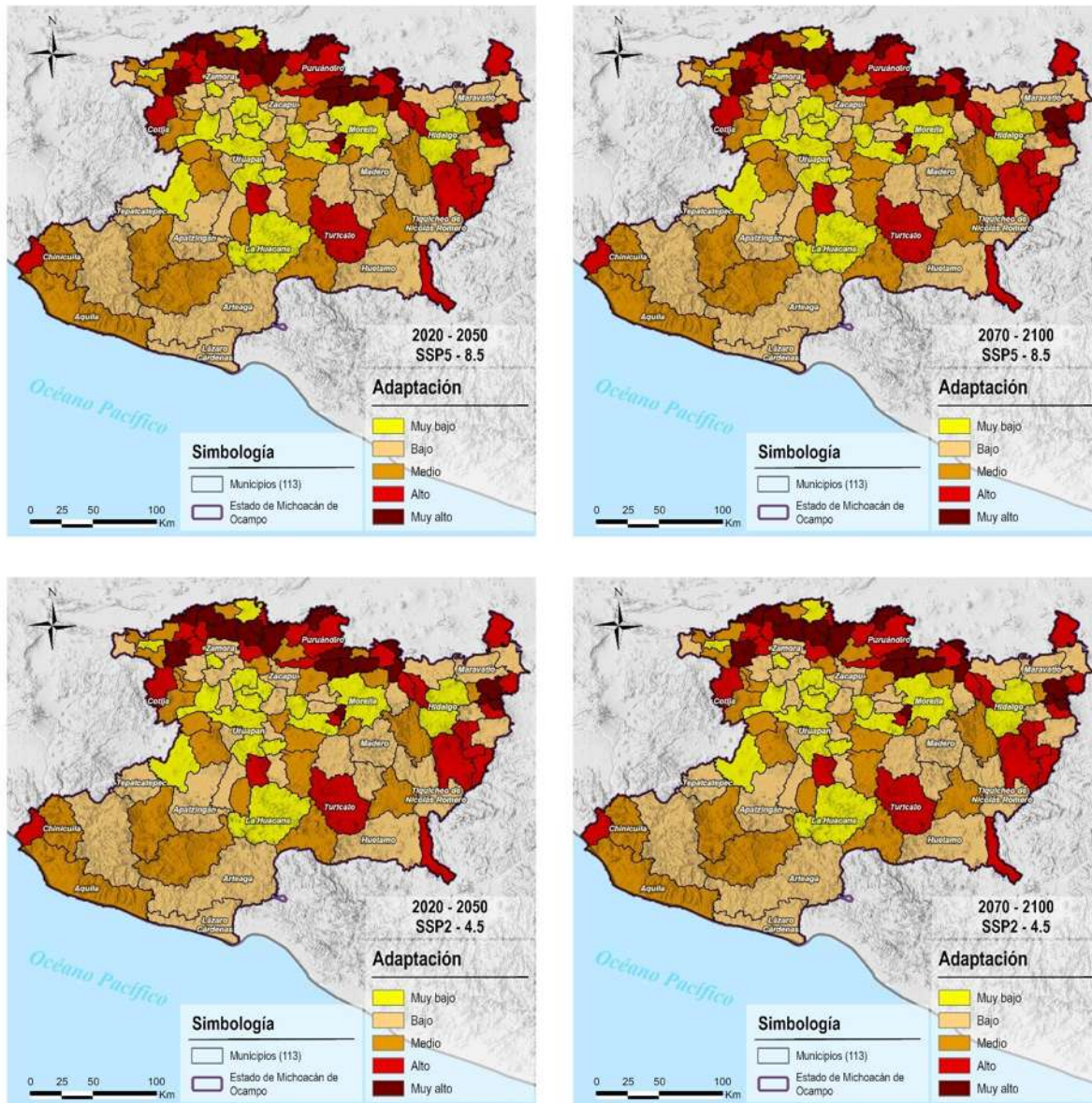


Figura 9.39 Comparación espacial de la capacidad de adaptación (CA) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

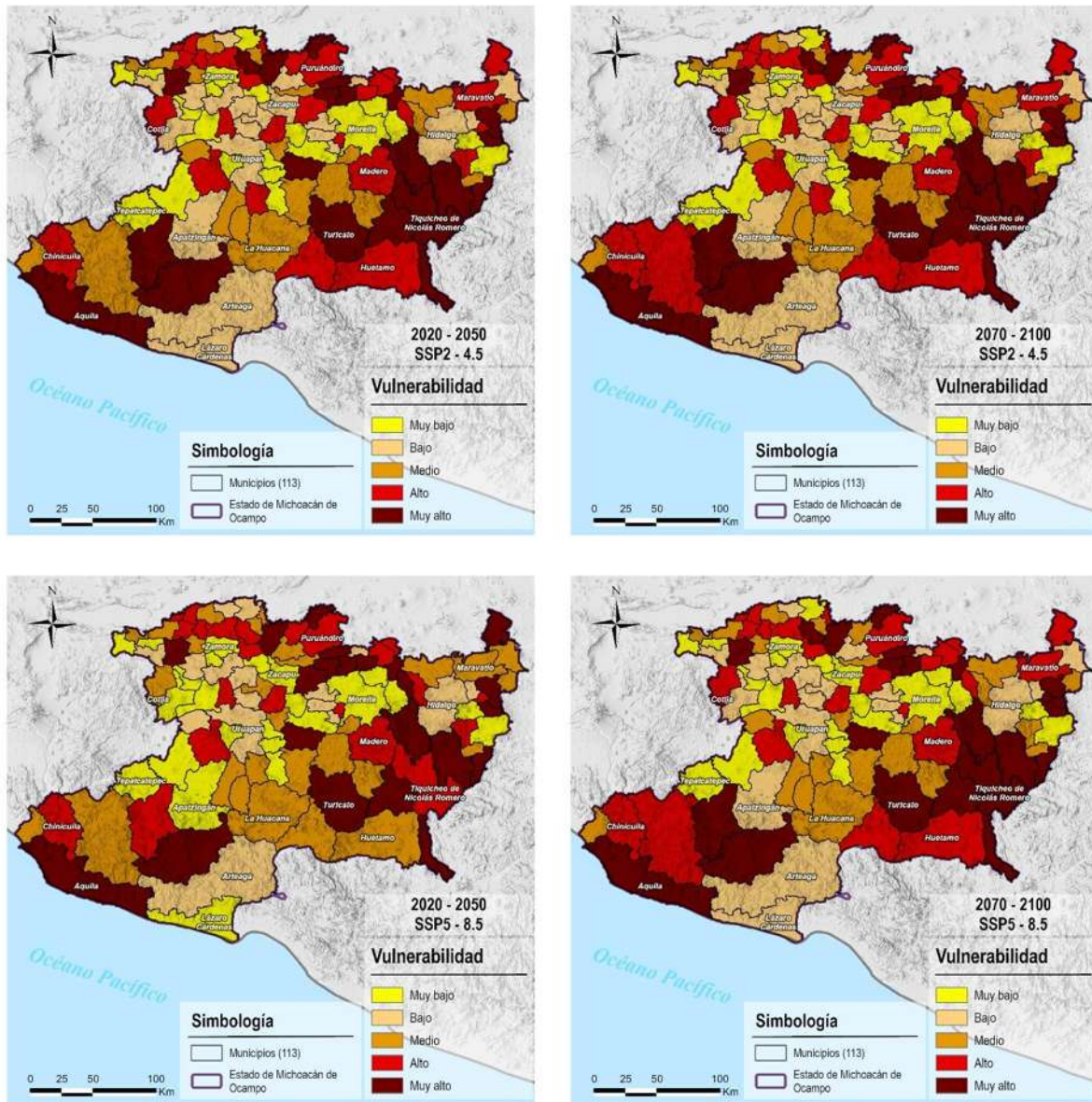


Figura 9.40 Comparación espacial de la vulnerabilidad (V) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

9.5.4 Índice de riesgo de sequías para el periodo futuro

En esta sección se presenta la estimación del índice de riesgo futuro, integrando los componentes que estructuran la evaluación bajo condiciones de cambio climático. Para ello, se muestran los resultados espaciales a corto y largo plazo considerando los escenarios SSP2 - 4.5 y SSP5 – 8.5.

En particular, la **Figura 9.41** muestra la distribución municipal del peligro por sequías, la **Figura 9.42** presenta la variación espacial de la exposición y, finalmente, la **Figura 9.43** integra estos componentes junto con la vulnerabilidad para mostrar la clasificación municipal del riesgo (R).

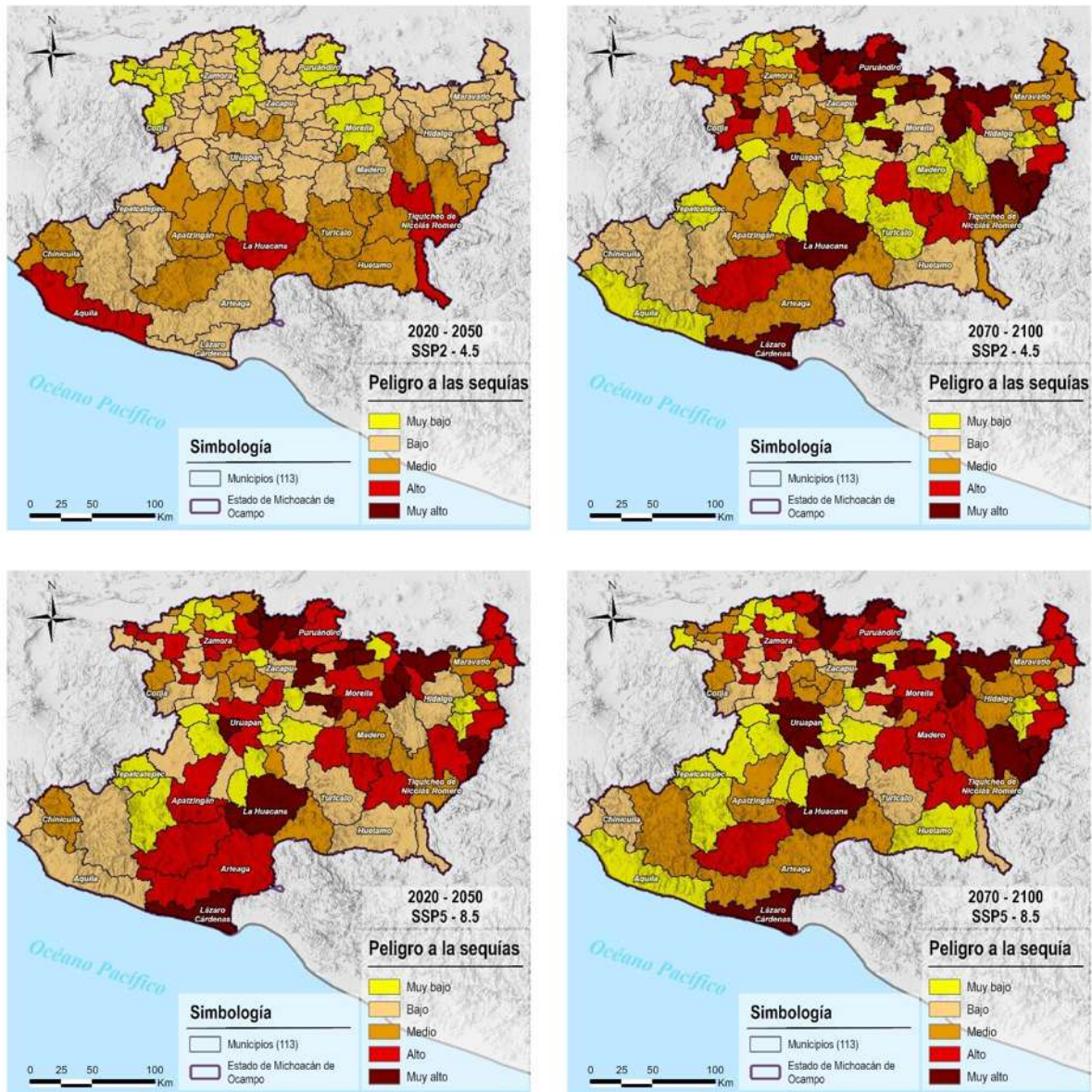


Figura 9.41 Comparación espacial del peligro (H) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

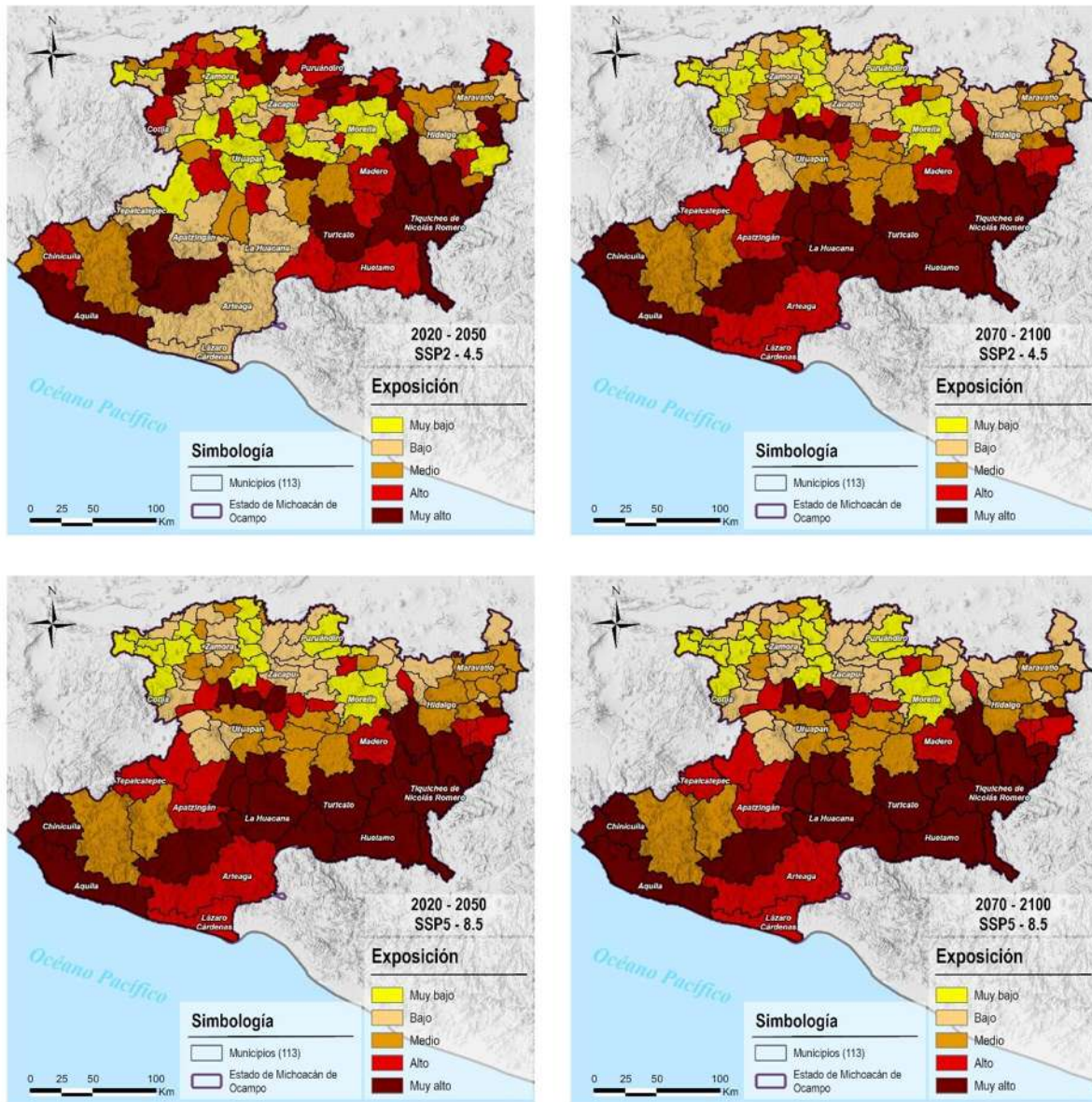


Figura 9.42 Comparación espacial de la exposición (E) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

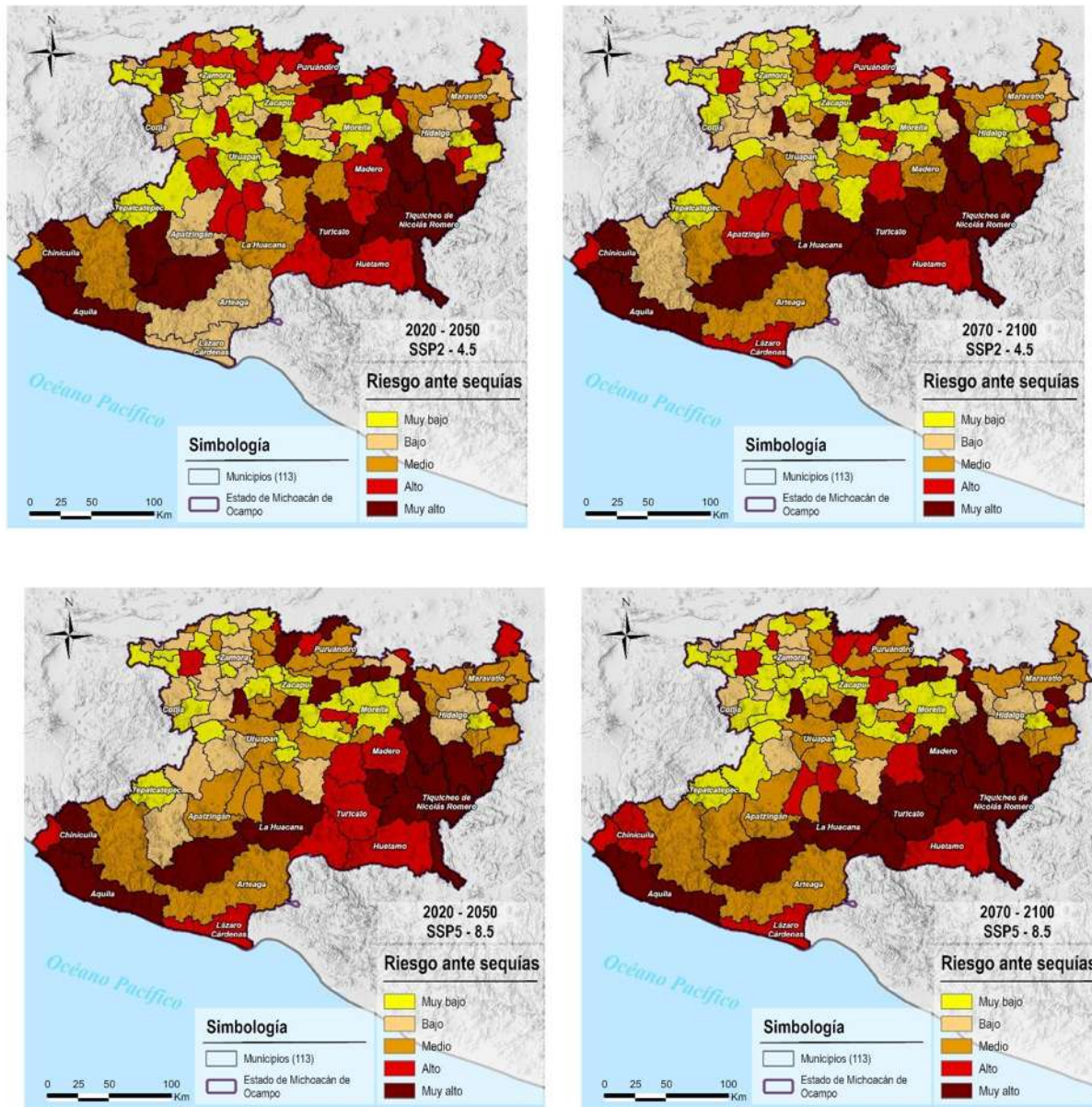


Figura 9.43 Comparación espacial del riesgo (R) a la sequía bajo escenarios SSP2 – 4.5 y SSP5 – 8.5 (corto y largo plazo).

9.6 Medidas de actuación

En esta sección se presentan las medidas de actuación propuestas a partir del nivel de riesgo identificado ante sequías en el estado de Michoacán, tal como se muestra en la **Figura 9.44**. Aunque el sistema se encuentra en estado de normalidad, la selección de medidas no se basa únicamente en la condición climática actual, sino en el riesgo existente y en las necesidades específicas detectadas. En este sentido, el riesgo integra no solo factores climáticos e hidrológicos, sino también componentes socioeconómicos y ambientales que influyen en la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta del territorio. Por ello, para cada nivel se identificaron las principales carencias que limitan la implementación de acciones, y las medidas se definieron y adaptaron según la prioridad asociada a cada categoría de riesgo, enfocándose en atender los factores que más contribuyen al riesgo, fortalecer la resiliencia y reducir vulnerabilidades.

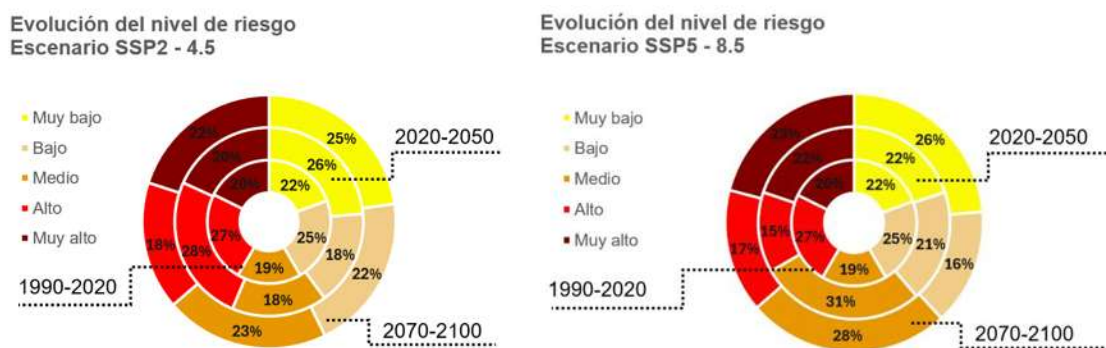


Figura 9.44. Distribución porcentual del riesgo ante sequías con efectos del cambio climático para el estado de Michoacán

A continuación, se presentan los indicadores asociados a cada clasificación de riesgo, así como los factores que explican el incremento del riesgo en cada nivel. Esto implica que, a partir de la clasificación municipal del riesgo, se identificó los municipios que presentan condiciones de riesgo para cada indicador considerado. Con ello, es posible reconocer cuáles de estas variables están aportando más al riesgo dentro de cada categoría y proponer medidas de actuación orientadas a las necesidades detectadas en cada caso.

9.6.1 Municipios con riesgo muy bajo

En los municipios donde el riesgo calculado fue muy bajo (**Figura 9.45**), las medidas deben enfocarse en prevenir el deterioro de las condiciones actuales, fortalecer la capacidad local y reducir déficits específicos antes de que el cambio climático incremente la amenaza o la vulnerabilidad ante sequías, tal como se describe en la **Tabla 9.15**.

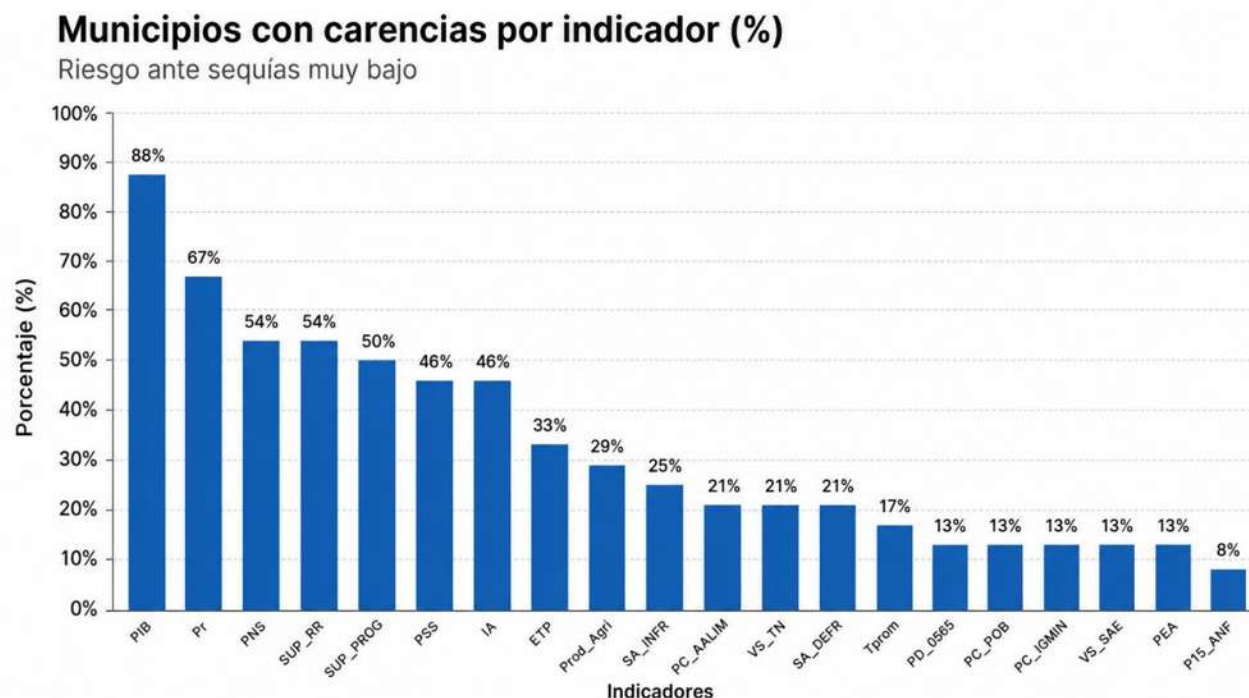


Figura 9.45 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Muy bajo.

Dentro de los municipios clasificados con riesgo muy bajo ante sequías está integrado por el primer grupo que es Morelia, Tarímbaro, Zamora, La Piedad, Sahuayo y Zacapu, los cuales presentan mayor infraestructura, servicios y actividad económica. El segundo grupo, conformado por Chavinda, Ecuandureo, Jiquilpan, Marcos Castellanos, Purépero, Yurécuaro y Huandacareo, corresponde a municipios agrícolas de valle con presión sobre el recurso hídrico, pero con condiciones básicas relativamente estables. El tercer grupo, integrado por Charo, Epitacio Huerta, Tuxpan y Zinapécuaro, representa municipios de transición templada, sin condiciones extremas de aridez o temperatura. Finalmente, Ario, Chilchota, Pátzcuaro, Taretan y Ziracuaretiro conforman un grupo de municipios mayor humedad relativa, donde la amenaza climática por sequía es menor, aunque pueden existir presiones ambientales como deforestación o cambio de uso de suelo.

Tabla 9.15 Medidas de actuación para un nivel de riesgo muy bajo ante sequías.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1. Campañas municipales de ahorro de agua.
2. Programa de entrega e instalación de tinacos en viviendas vulnerables.
3. Programa de construcción de cisternas domésticas.
4. Instalación de depósitos comunitarios de agua en localidades rurales.
5. Programa de captación de agua de lluvia en viviendas.
6. Instalación de sistemas de captación de lluvia en escuelas.
7. Instalación de sistemas de captación de lluvia en centros de salud.
8. Construcción de cisternas comunitarias en localidades con escasez recurrente.
9. Campañas de limpieza y desinfección de tinacos y cisternas.
10. Programa de distribución preventiva de agua en temporada seca.
11. Diseño de rutas de abastecimiento con pipas para comunidades prioritarias.
12. Instalación de puntos comunitarios de abastecimiento de agua.
13. Programa de reparación de fugas en redes de agua potable.
14. Rehabilitación de líneas de conducción de agua potable.
15. Mantenimiento preventivo de tanques de almacenamiento municipal.
16. Sectorización básica de redes de agua potable para controlar pérdidas.
17. Instalación o rehabilitación de macro medidores en fuentes y tanques.
18. Programa de cultura del pago y uso responsable del agua.
19. Planes preventivos de tandeo en temporada seca.
20. Priorización del agua para consumo humano durante sequías.

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

21. Sistema municipal de monitoreo de sequías.
22. Registro mensual de precipitación y temperatura.
23. Monitoreo de niveles de pozos, manantiales, bordos y presas locales.
24. Elaboración de boletines mensuales de sequía.
25. Semáforo municipal de alerta por sequía.
26. Mapa municipal de comunidades vulnerables ante sequía.
27. Inventario de fuentes de abastecimiento disponibles en temporada seca.
28. Registro histórico de afectaciones por sequía.
29. Plan municipal de contingencia por sequía.
30. Protocolo de actuación para sequía moderada, severa y extrema.
31. Integración del riesgo de sequía en Protección Civil municipal.
32. Actualización anual de indicadores de riesgo por sequía.
33. Creación de una línea base municipal de disponibilidad de agua.
34. Sistema comunitario de reporte de escasez de agua.
35. Coordinación entre municipio, organismos operadores y comités de agua.

AGRICULTURA

36. Programa de riego eficiente para pequeños productores.
37. Entrega de equipos de riego por goteo en zonas prioritarias.
38. Rehabilitación de canales de riego.

Continúa

39. Revestimiento o entubamiento de canales con altas pérdidas.
40. Mantenimiento de compuertas, tomas y estructuras de distribución.
41. Construcción o rehabilitación de bordos de almacenamiento agrícola.
42. Construcción de ollas de agua para uso agrícola y ganadero.
43. Capacitación en programación del riego.
44. Capacitación en medición de humedad del suelo.
45. Programa de cambio hacia cultivos menos demandantes de agua.
46. Promoción de variedades agrícolas resistentes a sequía.
47. Ajuste de calendarios agrícolas según disponibilidad de lluvia.
48. Promoción de labranza mínima para conservar humedad.
49. Uso de cobertura vegetal o rastrojo para reducir evaporación del suelo.
50. Programa de asistencia técnica para productores de temporal.
51. Bancos de semillas adaptadas a condiciones secas.
52. Apoyo a huertos familiares con bajo consumo de agua.
53. Programa de apoyo a productores afectados por sequía.
54. Seguro agrícola o fondos de contingencia para sequía.
55. Capacitación ganadera para manejo de agua y forraje en temporada seca.

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

56. Reforestación con especies nativas en zonas de recarga.
57. Restauración de microcuencas prioritarias.
58. Protección de manantiales y nacimientos de agua.
59. Cercado de zonas de recarga hídrica.
60. Construcción de zanjas de infiltración.
61. Construcción de presas filtrantes.
62. Construcción de terrazas para conservación de suelo y agua.
63. Instalación de barreras vivas en laderas agrícolas.
64. Obras de control de erosión en zonas degradadas.
65. Programa de conservación de suelos en parcelas agrícolas.
66. Restauración de áreas deforestadas.
67. Ampliación de áreas bajo conservación municipal.
68. Protección de humedales, riberas y cuerpos de agua.
69. Programa de pago por servicios ambientales en zonas de recarga.
70. Control del cambio de uso de suelo en zonas estratégicas.

PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

71. Campañas de prevención de incendios forestales.
 72. Apertura y mantenimiento de brechas cortafuego.
 73. Brigadas comunitarias contra incendios.
 74. Vigilancia en temporada seca.
 75. Manejo de material combustible en zonas forestales.
 76. Capacitación comunitaria para respuesta temprana ante incendios.
 77. Restauración de áreas afectadas por incendios.
-

Continúa

ATENCIÓN COMUNITARIA

78. Identificación de hogares vulnerables ante sequía.
 79. Padrón de comunidades sin agua entubada o sin almacenamiento.
 80. Apoyo alimentario temporal en sequías severas.
 81. Programa de huertos familiares con bajo consumo de agua.
 82. Empleo temporal para obras de conservación de suelo y agua.
 83. Empleo temporal para reforestación y limpieza de cauces.
 84. Capacitación comunitaria sobre preparación ante sequías.
 85. Materiales visuales de comunicación para población con rezago educativo.
 86. Talleres comunitarios sobre ahorro, almacenamiento y reúso de agua.
 87. Fortalecimiento de comités comunitarios de agua.
 88. Capacitación a autoridades auxiliares sobre gestión de sequías.
 89. Participación comunitaria en monitoreo de fuentes de agua.
 90. Campañas escolares sobre cuidado del agua y cambio climático.
-

PLANEACIÓN INSTITUCIONAL

91. Creación de un comité municipal de atención a sequías.
 92. Coordinación entre ayuntamiento, Protección Civil, organismo operador y productores.
 93. Gestión de recursos estatales y federales para obras de adaptación.
 94. Cartera municipal de proyectos contra sequía.
 95. Incorporación del riesgo de sequía en el Plan Municipal de Desarrollo.
 96. Incorporación del riesgo hídrico en el ordenamiento territorial.
 97. Evaluación de disponibilidad de agua antes de autorizar nuevos desarrollos.
 98. Restricción de actividades altamente demandantes de agua en zonas críticas.
 99. Reglamento municipal para protección de zonas de recarga.
 100. Seguimiento anual de las medidas implementadas y sus resultados.
-

9.6.2 Municipios con riesgo bajo ante sequías

Para los municipios clasificados con riesgo bajo ante sequías (**Figura 9.46**), las medidas de actuación deben orientarse al fortalecimiento de capacidades locales y a la corrección temprana de carencias que podrían incrementar el riesgo bajo escenarios de cambio climático. Aunque estos municipios no presentan una condición crítica, el análisis de indicadores muestra déficits importantes en superficie bajo protección ambiental, capacidad económica, infraestructura de riego, propenso a sequías, índice de aridez, precipitación media anual y evaporación potencial como se describen en la **Los municipios** clasificados con riesgo bajo ante sequías integrado por municipios agrícolas, como Jacona, Morelos, Panindícuaro, Penjamillo, Puruándiro, Tanhuato, Tlazazalca, Villamar y José Sixto Verduzco, donde existe presión sobre el recurso hídrico por actividades productivas, pero con condiciones sociales relativamente estables. El segundo grupo, conformado por Acuitzio, Álvaro Obregón, Lagunillas, Quiroga, Tzintzuntzan y Zinapécuaro,

corresponde a municipios templados, sin condiciones climáticas extremas. El tercer grupo incluye a Contepec, Irimbo, Nuevo Parangaricutiro, Peribán, Tingüindín, Tocuambo y Uruapan, caracterizados por condiciones de mayor humedad relativa. Finalmente, Arteaga, Lázaro Cárdenas y Tepalcatepec representan municipios cálidos con presión ambiental o hídrica, pero cuyo riesgo se mantiene bajo debido a que no concentran simultáneamente altos niveles de vulnerabilidad, exposición y amenaza climática.

Tabla 9.16.

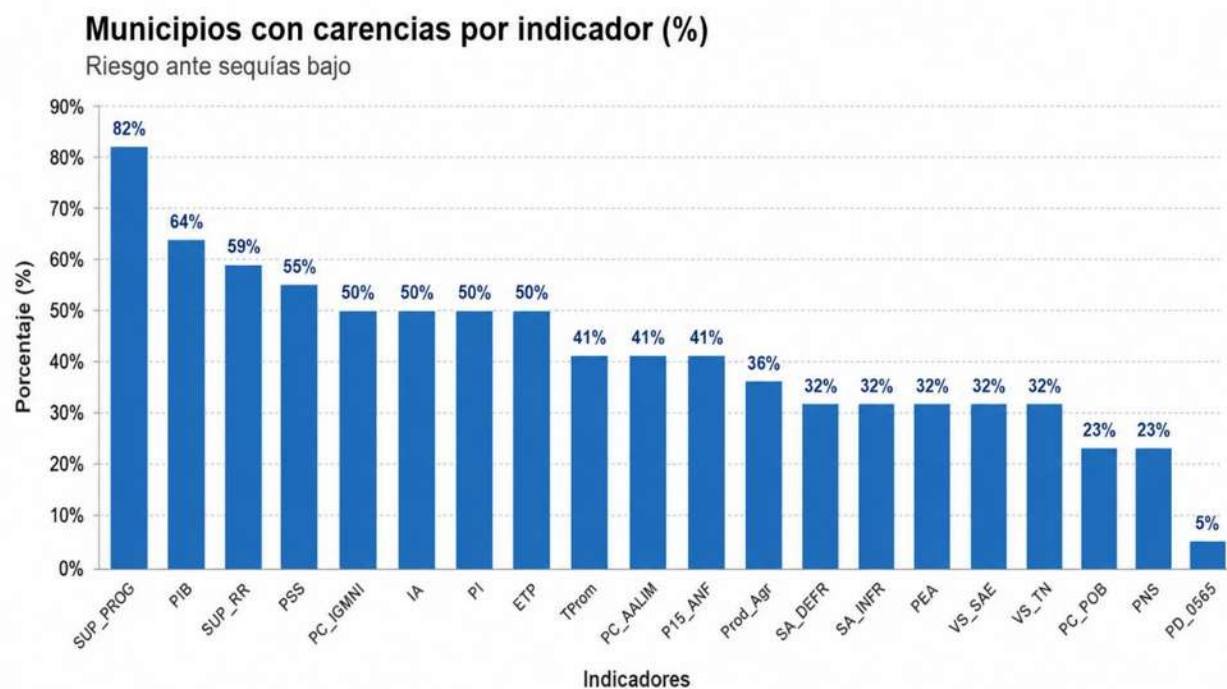


Figura 9.46 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: bajo.

Los municipios clasificados con riesgo bajo ante sequías integrado por municipios agrícolas, como Jacona, Morelos, Panindícuaro, Penjamillo, Puruándiro, Tanhuato, Tlazazalca, Villamar y José Sixto Verduzco, donde existe presión sobre el recurso hídrico por actividades productivas, pero con condiciones sociales relativamente estables. El segundo grupo, conformado por Acuitzio, Álvaro Obregón, Lagunillas, Quiroga, Tzintzuntzan y Zinapécuaro, corresponde a municipios templados, sin condiciones climáticas extremas. El tercer grupo incluye a Contepec, Irimbo, Nuevo Parangaricutiro, Peribán, Tingüindín, Tocuambo y Uruapan, caracterizados por condiciones de mayor humedad relativa. Finalmente, Arteaga, Lázaro Cárdenas y Tepalcatepec representan municipios cálidos con presión ambiental o hídrica, pero cuyo riesgo se mantiene bajo debido a que no concentran simultáneamente altos niveles de vulnerabilidad, exposición y amenaza climática.

Tabla 9.16 Medidas de actuación para un nivel de riesgo bajo ante sequías.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1. Campañas municipales de ahorro de agua.
 2. Programa de entrega de tinacos en localidades con almacenamiento deficiente.
 3. Programa de instalación de cisternas comunitarias.
 4. Captación de agua de lluvia en viviendas rurales.
 5. Captación de agua de lluvia en escuelas y centros de salud.
 6. Rehabilitación de tanques de almacenamiento municipal.
 7. Limpieza y desinfección periódica de tinacos, cisternas y depósitos comunitarios.
 8. Programa de reparación de fugas en redes de agua potable.
 9. Sectorización básica de redes para reducir pérdidas de agua.
 10. Instalación de medidores o macro medidores en fuentes de abastecimiento.
 11. Mantenimiento preventivo de pozos, manantiales, bordos y tanques.
 12. Diseño de planes preventivos de tandeo en temporada seca.
 13. Inventario municipal de fuentes de agua disponibles durante sequía.
-

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

14. Creación de un sistema municipal de monitoreo de sequías.
 15. Registro mensual de precipitación y temperatura.
 16. Monitoreo de niveles de pozos, bordos, presas y manantiales.
 17. Elaboración de boletines municipales de sequía.
 18. Implementación de un semáforo municipal de alerta por sequía.
 19. Mapeo de comunidades vulnerables al desabasto de agua.
 20. Registro histórico de afectaciones por sequía en agricultura, agua potable y ganadería.
 21. Capacitación a Protección Civil municipal para interpretar alertas de sequía.
 22. Creación de reportes comunitarios de escasez de agua.
-

AGRICULTURA

23. Rehabilitación de canales de riego.
 24. Revestimiento o entubamiento de canales con mayores pérdidas.
 25. Mantenimiento de compuertas, tomas y estructuras de distribución.
 26. Rehabilitación de bordos y pequeños almacenamientos agrícolas.
 27. Programa de riego por goteo para pequeños productores.
 28. Programa de riego por aspersión eficiente donde sea viable.
 29. Capacitación en programación del riego.
 30. Capacitación en medición de humedad del suelo.
 31. Promoción de cultivos menos demandantes de agua.
 32. Promoción de semillas o variedades resistentes a sequía.
 33. Ajuste de calendarios agrícolas conforme a la temporada de lluvias.
 34. Uso de cobertura vegetal o rastrojo para conservar humedad en el suelo.
 35. Promoción de labranza mínima.
 36. Asistencia técnica para productores de temporal.
 37. Creación de bancos comunitarios de semillas adaptadas a sequía.
 38. Programa de apoyo preventivo a pequeños productores.
-

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

-
39. Reforestación con especies nativas en zonas de recarga hídrica.
 40. Restauración de microcuencas prioritarias.
 41. Protección de manantiales y nacimientos de agua.
 42. Cercado de zonas de recarga para evitar degradación.
 43. Construcción de zanjas de infiltración.
 44. Construcción de presas filtrantes.
 45. Construcción de terrazas en zonas erosionadas.
 46. Instalación de barreras vivas en laderas agrícolas.
 47. Programa de conservación de suelos en parcelas agrícolas.
 48. Restauración de áreas deforestadas.
 49. Protección de riberas, humedales y cuerpos de agua.
 50. Gestión de áreas voluntarias de conservación municipal o comunitaria.
 51. Programa de pago por servicios ambientales en zonas de recarga.
-

PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

52. Campañas de prevención de incendios forestales.
 53. Apertura y mantenimiento de brechas cortafuego.
 54. Formación de brigadas comunitarias contra incendios.
 55. Vigilancia en temporada seca.
 56. Manejo de material combustible en zonas forestales.
 57. Restauración de áreas afectadas por incendios.
 58. Campañas para evitar quemas agrícolas no controladas.
-

ATENCIÓN COMUNITARIA

59. Identificación de hogares con bajos ingresos vulnerables a sequía.
 60. Padrón de localidades con carencia de agua entubada o almacenamiento.
 61. Apoyo alimentario preventivo en localidades con carencia alimentaria.
 62. Huertos familiares con bajo consumo de agua.
 63. Empleo temporal para reforestación y conservación de suelos.
 64. Empleo temporal para limpieza de cauces y protección de manantiales.
 65. Talleres comunitarios sobre ahorro y almacenamiento de agua.
 66. Campañas escolares sobre sequía y cambio climático.
 67. Materiales visuales para población con rezago educativo.
 68. Capacitación a autoridades auxiliares sobre gestión de sequías.
 69. Fortalecimiento de comités comunitarios de agua.
-

PLANEACIÓN INSTITUCIONAL

70. Creación de un comité municipal de gestión de sequías.
71. Elaboración de una cartera municipal de proyectos contra sequía.
72. Gestión de recursos estatales y federales para obras de adaptación.
73. Incorporación del riesgo de sequía en el Plan Municipal de Desarrollo.
74. Incorporación del riesgo hídrico en el ordenamiento territorial.
75. Evaluación de disponibilidad de agua antes de autorizar nuevos desarrollos.
76. Regulación del cambio de uso de suelo en zonas de recarga.

77. Restricción de actividades altamente demandantes de agua en zonas vulnerables.
78. Coordinación entre ayuntamiento, organismo operador, Protección Civil y productores.
79. Actualización anual de indicadores de vulnerabilidad ante sequía.
80. Seguimiento de las medidas implementadas para evaluar avances.

9.6.3 Municipios con riesgo medio

En municipios con riesgo medio (**Figura 9.47**), las medidas deben enfocarse en reducir las condiciones que ya están generando vulnerabilidad, especialmente en el sector agrícola, la disponibilidad de agua, la conservación ambiental y la capacidad económica de la población como se describe en la **Tabla 9.17**.

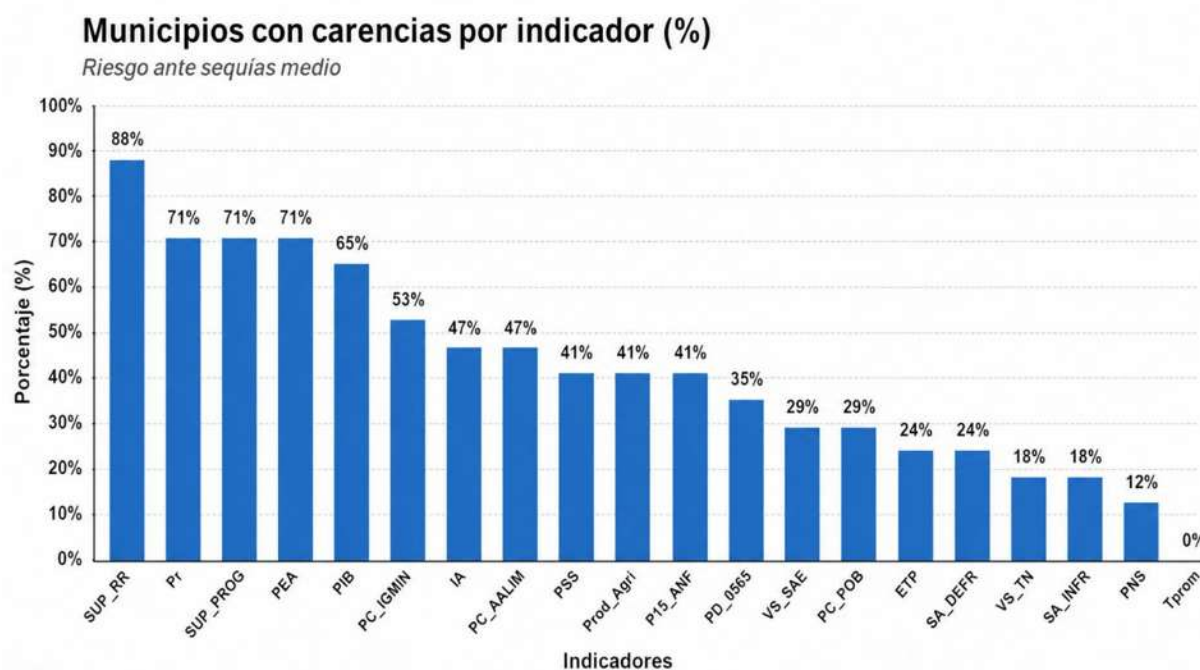


Figura 9.47 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Medio.

Los municipios clasificados con riesgo medio ante sequías son Angamacutiro, Coeneo, Jiménez, Indaparapeo, Cojumatlán de Régules, Tangamandapio y Tangancicuaro, municipios agrícolas ubicados principalmente en el Bajío, Cuitzeo y Lerma-Chapala, donde la presión hídrica se asocia con la actividad productiva. El segundo grupo, conformado por Angangueo, Hidalgo, Senguio, Tlalpujahua y Zitácuaro, corresponde a municipios forestales del Oriente, con clima templado, pero con posibles presiones por deforestación e incendios. El tercer grupo incluye a Apatzingán, Buenavista, Gabriel Zamora y Juárez, municipios cálidos y agrícolas con mayor temperatura y evapotranspiración. Finalmente, Coalcomán de Vázquez Pallares, Cotija y Paracho representan

municipios rurales del occidente y la zona Purhépecha, donde el riesgo medio puede relacionarse con presión ambiental, dispersión poblacional y limitaciones en infraestructura hídrica.

Tabla 9.17 Medidas de actuación para un nivel de riesgo medio ante sequías.

AGRICULTURA	
1.	Programa de rehabilitación de canales de riego.
2.	Revestimiento de canales con mayores pérdidas de agua.
3.	Entubamiento de tramos críticos de conducción agrícola.
4.	Mantenimiento de compuertas, tomas y estructuras de distribución.
5.	Rehabilitación de bordos de almacenamiento agrícola.
6.	Construcción de ollas de agua para uso agrícola y ganadero.
7.	Programa de tecnificación de riego por goteo.
8.	Programa de riego por aspersión eficiente en zonas viables.
9.	Instalación de sensores de humedad del suelo en parcelas piloto.
10.	Capacitación para programar riegos según humedad del suelo y clima.
11.	Promoción de cultivos menos demandantes de agua.
12.	Entrega de semillas o variedades resistentes a sequía.
13.	Ajuste de calendarios agrícolas según pronóstico de lluvia.
14.	Capacitación en agricultura de temporal adaptada a sequía.
15.	Programa de labranza mínima para conservar humedad.
16.	Uso de rastrojo, acolchado o cobertura vegetal en parcelas.
17.	Incorporación de materia orgánica para mejorar retención de humedad.
18.	Bancos comunitarios de semillas adaptadas a condiciones secas.
19.	Asistencia técnica para pequeños productores en zonas de temporal.
20.	Fondos o seguros agrícolas para pérdidas por sequía.
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	
21.	Programa de reparación de fugas en redes de agua potable.
22.	Sectorización de redes para controlar pérdidas de agua.
23.	Rehabilitación de líneas de conducción de agua potable.
24.	Mantenimiento preventivo de pozos, manantiales y tanques.
25.	Instalación de macromedidores en fuentes de abastecimiento.
26.	Construcción de cisternas comunitarias en localidades vulnerables.
27.	Entrega de tinacos en viviendas con almacenamiento deficiente.
28.	Instalación de depósitos comunitarios de agua.
29.	Captación de agua de lluvia en viviendas rurales.
30.	Captación de agua de lluvia en escuelas.
31.	Captación de agua de lluvia en centros de salud.
32.	Captación de agua de lluvia en edificios municipales.
33.	Rehabilitación de manantiales y pequeñas fuentes locales.
34.	Evaluación de reúso de agua tratada para usos no potables.
35.	Inventario de fuentes alternativas para temporada seca.
36.	Plan preventivo de distribución de agua en localidades críticas.
37.	Diseño de rutas de abastecimiento con pipas para sequías severas.

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

38. Sistema municipal permanente de monitoreo de sequías.
39. Registro mensual de precipitación y temperatura.
40. Monitoreo de evaporación potencial e índice de aridez.
41. Monitoreo de niveles de pozos, bordos, presas y manantiales.
42. Seguimiento mensual del SPEI u otro índice de sequía.
43. Elaboración de boletines municipales de sequía.
44. Implementación de semáforo municipal de sequía.
45. Mapa de localidades vulnerables al desabasto.
46. Registro de afectaciones agrícolas, ganaderas y de agua potable.
47. Sistema comunitario de reporte de escasez de agua.
48. Plan municipal de contingencia por sequía.
49. Protocolos para sequía moderada, severa y extrema.
50. Definición de comunidades prioritarias para atención por sequía.
51. Capacitación de Protección Civil municipal en gestión de sequías.
52. Simulacros de respuesta ante desabasto de agua.

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

53. Reforestación con especies nativas en zonas de recarga.
54. Restauración de microcuencas prioritarias.
55. Protección de manantiales y nacimientos de agua.
56. Cercado de zonas de recarga hídrica.
57. Construcción de zanjas de infiltración.
58. Construcción de presas filtrantes.
59. Construcción de terrazas en zonas erosionadas.
60. Instalación de barreras vivas en laderas agrícolas.
61. Obras de control de erosión en zonas degradadas.
62. Restauración de áreas deforestadas.
63. Conservación de riberas, humedales y cuerpos de agua.
64. Ampliación de áreas de conservación municipal o comunitaria.
65. Programa de pago por servicios ambientales en zonas de recarga.
66. Regulación del cambio de uso de suelo en zonas estratégicas.

PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

67. Campañas de prevención de incendios forestales.
68. Apertura y mantenimiento de brechas cortafuego.
69. Formación de brigadas comunitarias contra incendios.
70. Vigilancia en temporada seca.
71. Manejo de material combustible en zonas forestales.
72. Capacitación comunitaria para respuesta temprana ante incendios.
73. Restauración de áreas afectadas por incendios.
74. Campañas para evitar quemas agrícolas no controladas.

ATENCIÓN COMUNITARIA

-
75. Padrón de hogares vulnerables ante sequía.
 76. Identificación de localidades con bajos ingresos y alta carencia alimentaria.
 77. Apoyo alimentario temporal en sequías severas.
 78. Programa de huertos familiares con bajo consumo de agua.
 79. Apoyo a productores de autoconsumo.
 80. Empleo temporal para reforestación.
 81. Empleo temporal para conservación de suelos.
 82. Empleo temporal para limpieza de cauces y protección de manantiales.
 83. Talleres comunitarios sobre ahorro y almacenamiento de agua.
 84. Campañas escolares sobre sequía y cambio climático.
 85. Materiales visuales y sencillos para población con rezago educativo.
 86. Capacitación a autoridades auxiliares sobre gestión de sequías.
 87. Fortalecimiento de comités comunitarios de agua.
 88. Participación comunitaria en monitoreo de fuentes de agua.
-

PLANEACIÓN INSTITUCIONAL

89. Creación o fortalecimiento de un comité municipal de sequías.
 90. Designación de un área responsable de sequía y cambio climático.
 91. Elaboración de una cartera municipal de proyectos de adaptación.
 92. Gestión de recursos estatales y federales para obras hídricas.
 93. Gestión de financiamiento para tecnificación agrícola.
 94. Incorporación del riesgo de sequía en el Plan Municipal de Desarrollo.
 95. Integración del riesgo hídrico en el ordenamiento territorial.
 96. Evaluación de disponibilidad de agua antes de autorizar nuevos desarrollos.
 97. Restricción de actividades altamente demandantes de agua en zonas críticas.
 98. Reglamento municipal para proteger zonas de recarga.
 99. Coordinación entre municipio, organismo operador, Protección Civil y productores.
 100. Actualización anual de indicadores de amenaza, exposición y vulnerabilidad.
-

9.6.4 Municipios con riesgo alto

En municipios con riesgo alto ante sequías (**Figura 9.48**), las medidas deben enfocarse en reducir de manera prioritaria la vulnerabilidad social, económica, agrícola y ambiental, debido a que las condiciones actuales pueden derivar en afectaciones severas bajo escenarios de cambio climático como se describe en la **Tabla 9.18**.

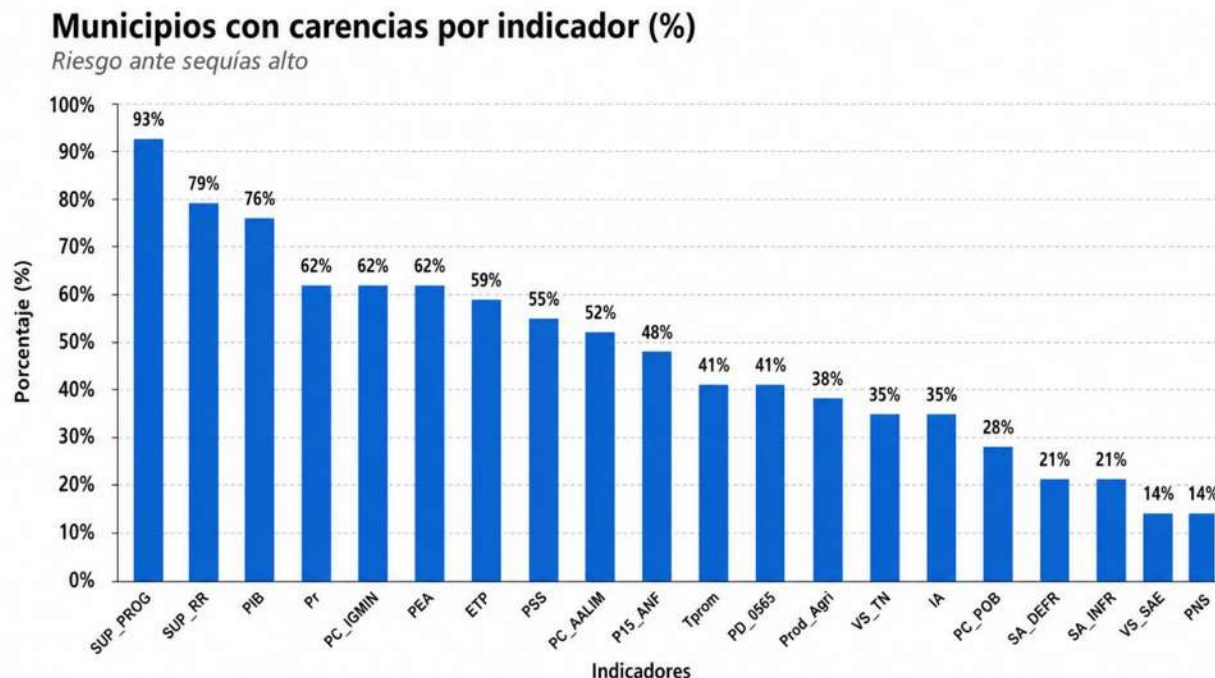


Figura 9.48 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Alto.

Los municipios que se encuentran en un riesgo alto se agruparon en cuatro tipos principales. El primer grupo corresponde a municipios agrícolas de valle, como Briseñas, Copándaro, Cuitzeo, Chucándiro, Churintzio, Huaniqueo, Numanán, Pajacuarán, Queréndaro, Santa Ana Maya, Venustiano Carranza y Vista Hermosa, donde el riesgo se relaciona principalmente con la presión sobre el recurso hídrico, la dependencia agrícola y condiciones de precipitación media a baja.

El segundo grupo está integrado por Aguililla, Carácuaro, Churumuco, Nuevo Urecho, Parácuaro y Tacámbaro, municipios cálidos o de transición hacia zonas secas, donde las altas temperaturas, la evapotranspiración y la vulnerabilidad rural incrementan la sensibilidad ante sequías. El tercer grupo, conformado por Cherán, Erongarícuaro, Huiramba, Salvador Escalante, Tancítaro y Tingambato, corresponde a municipios forestales, en los que el riesgo alto puede explicarse por presión ambiental, deforestación, incendios forestales, cambio de uso de suelo y dispersión territorial. Finalmente, Jungapeo, Maravatío y Los Reyes representan municipios de transición productiva y climática, donde la actividad agrícola y la presión sobre el agua aumentan la vulnerabilidad frente a periodos secos.

Tabla 9.18 Medidas de actuación para un nivel de riesgo alto ante sequías.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1. Programa urgente de reparación de fugas en redes de agua potable.
2. Rehabilitación de líneas de conducción de agua potable.
3. Mantenimiento preventivo y correctivo de pozos, tanques y cárcamos.
4. Instalación de macro medidores en pozos, tanques y fuentes de abastecimiento.

Continúa

5. Sectorización de redes de agua potable en zonas con mayores pérdidas.
6. Construcción de cisternas comunitarias en localidades vulnerables.
7. Entrega de tinacos a hogares con almacenamiento deficiente.
8. Instalación de tanques elevados en localidades con abastecimiento irregular.
9. Construcción de depósitos comunitarios de agua.
10. Rehabilitación de manantiales y pequeñas fuentes locales.
11. Captación de agua de lluvia en viviendas rurales.
12. Captación de agua de lluvia en escuelas y centros de salud.
13. Captación de agua de lluvia en edificios públicos municipales.
14. Diseño de rutas de abastecimiento con pipas para sequías severas.
15. Instalación de puntos comunitarios de abastecimiento de agua.
16. Plan de tandeo preventivo y ordenado durante temporada seca.
17. Priorización del agua para consumo humano, salud y alimentación.
18. Restricción temporal de usos no esenciales del agua durante sequías severas.
19. Campañas de limpieza y desinfección de tinacos y cisternas.
20. Inventario municipal de fuentes alternas de abastecimiento.

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

21. Sistema municipal de alerta temprana por sequía.
22. Semáforo municipal de sequía con niveles de acción.
23. Monitoreo mensual de precipitación y temperatura.
24. Monitoreo de evaporación potencial e índice de aridez.
25. Seguimiento del SPEI u otro índice de sequía.
26. Monitoreo de niveles de pozos, bordos, presas y manantiales.
27. Boletines mensuales de sequía para autoridades y comunidades.
28. Mapa de localidades prioritarias por riesgo de desabasto.
29. Registro de afectaciones agrícolas, ganaderas y de agua potable.
30. Sistema comunitario de reporte de escasez de agua.
31. Plan municipal de contingencia por sequía.
32. Protocolos de actuación para sequía moderada, severa y extrema.
33. Definición de responsables municipales para cada fase de sequía.
34. Identificación de comunidades prioritarias para atención inmediata.
35. Simulacros de respuesta ante desabasto de agua.
36. Capacitación a Protección Civil municipal en gestión de sequías.
37. Integración del riesgo de sequía en planes de emergencia municipal.

AGRICULTURA

38. Rehabilitación urgente de canales de riego.
39. Revestimiento de canales con mayores pérdidas de agua.
40. Entubamiento de tramos críticos de conducción agrícola.
41. Mantenimiento de compuertas, tomas y estructuras de distribución.
42. Rehabilitación de bordos y pequeños almacenamientos agrícolas.
43. Construcción de ollas de agua para uso agrícola y ganadero.
44. Programa prioritario de riego por goteo.

Continúa

45. Programa de aspersión eficiente en zonas agrícolas viables.
46. Instalación de sensores de humedad del suelo en parcelas piloto.
47. Capacitación para programación de riegos.
48. Capacitación en medición de humedad del suelo.
49. Reconversión hacia cultivos menos demandantes de agua.
50. Promoción de variedades resistentes a sequía.
51. Reducción gradual de cultivos altamente demandantes de agua en zonas críticas.
52. Ajuste de calendarios de siembra y cosecha.
53. Promoción de agricultura de temporal adaptada a sequía.
54. Uso de rastrojo, acolchado o cobertura vegetal para conservar humedad.
55. Labranza mínima para reducir evaporación del suelo.
56. Incorporación de materia orgánica para mejorar retención de humedad.
57. Bancos comunitarios de semillas resistentes a sequía.
58. Seguro agrícola o fondo de contingencia por sequía.
59. Asistencia técnica directa a pequeños productores.
60. Apoyo con insumos para productores de autoconsumo.

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

61. Programa prioritario de restauración de microcuencas.
62. Reforestación con especies nativas en zonas de recarga hídrica.
63. Restauración de áreas deforestadas.
64. Protección de manantiales y nacimientos de agua.
65. Cercado de zonas de recarga hídrica.
66. Construcción de zanjas de infiltración.
67. Construcción de presas filtrantes.
68. Construcción de terrazas en zonas erosionadas.
69. Construcción de bordos de captación.
70. Instalación de barreras vivas en laderas agrícolas.
71. Obras de control de erosión en zonas degradadas.
72. Conservación de riberas, humedales y cuerpos de agua.
73. Ampliación de áreas de conservación municipal o comunitaria.
74. Programa de pago por servicios ambientales en zonas de recarga.
75. Regulación estricta del cambio de uso de suelo en zonas de recarga.
76. Restauración de zonas afectadas por incendios forestales.

PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

77. Campañas intensivas de prevención de incendios forestales.
78. Apertura y mantenimiento de brechas cortafuego.
79. Formación de brigadas comunitarias contra incendios.
80. Vigilancia en temporada seca.
81. Manejo de material combustible en zonas forestales.
82. Capacitación comunitaria para respuesta temprana ante incendios.
83. Campañas para evitar quemas agrícolas no controladas.

Continúa

84. Sanciones o restricciones a quemas en periodos críticos de sequía.

ATENCIÓN COMUNITARIA

- 85. Padrón de hogares vulnerables ante sequía.
- 86. Identificación de localidades con bajos ingresos y carencia alimentaria.
- 87. Apoyo alimentario temporal durante sequías severas.
- 88. Programa de huertos familiares con bajo consumo de agua.
- 89. Apoyo a agricultura de traspatio.
- 90. Bancos comunitarios de alimentos en localidades prioritarias.
- 91. Subsidios focalizados para hogares con alta vulnerabilidad.
- 92. Acceso prioritario a agua segura para adultos mayores, infancia y población dependiente.
- 93. Empleo temporal para reforestación.
- 94. Empleo temporal para conservación de suelos.
- 95. Empleo temporal para limpieza de cauces y protección de manantiales.
- 96. Empleo temporal para mantenimiento de infraestructura hídrica.

ORGANIZACIÓN COMUNITARIA

- 97. Campañas comunitarias de ahorro de agua.
- 98. Talleres sobre almacenamiento seguro de agua.
- 99. Talleres sobre captación de agua de lluvia.
- 100. Materiales visuales sobre sequía para población con rezago educativo.
- 101. Campañas por radio local sobre uso responsable del agua.
- 102. Reuniones comunitarias antes de la temporada seca.
- 103. Capacitación a autoridades auxiliares sobre gestión de sequías.
- 104. Fortalecimiento de comités comunitarios de agua.
- 105. Fortalecimiento de organizaciones de productores.
- 106. Participación comunitaria en monitoreo de pozos, manantiales y bordos.
- 107. Campañas escolares sobre sequía, cambio climático y cuidado del agua.

PLANEACIÓN INSTITUCIONAL

- 108. Creación de una unidad municipal de gestión de sequías.
 - 109. Comité municipal de sequía con participación de agua potable, Protección Civil, productores y comunidades.
 - 110. Cartera municipal de proyectos prioritarios contra sequía.
 - 111. Gestión de recursos estatales y federales para infraestructura hídrica.
 - 112. Gestión de recursos para tecnificación agrícola.
-

9.6.5 Municipios con riesgo muy alto

En los municipios con riesgo muy alto ante sequías (**Figura 9.49**), las medidas de actuación deben orientarse a la atención prioritaria e integral de las condiciones que incrementan la vulnerabilidad territorial, especialmente aquellas relacionadas con ingresos, acceso al agua, almacenamiento doméstico, alimentación, infraestructura de riego, rezago educativo y conservación ambiental. En

este nivel, la estrategia no debe limitarse a la prevención, sino que debe combinar acciones urgentes de seguridad hídrica, protección social, adaptación productiva, restauración ambiental y fortalecimiento institucional, con el propósito de reducir los impactos presentes y futuros de la sequía bajo escenarios de cambio climático como se describe en la **Tabla 9.19**.

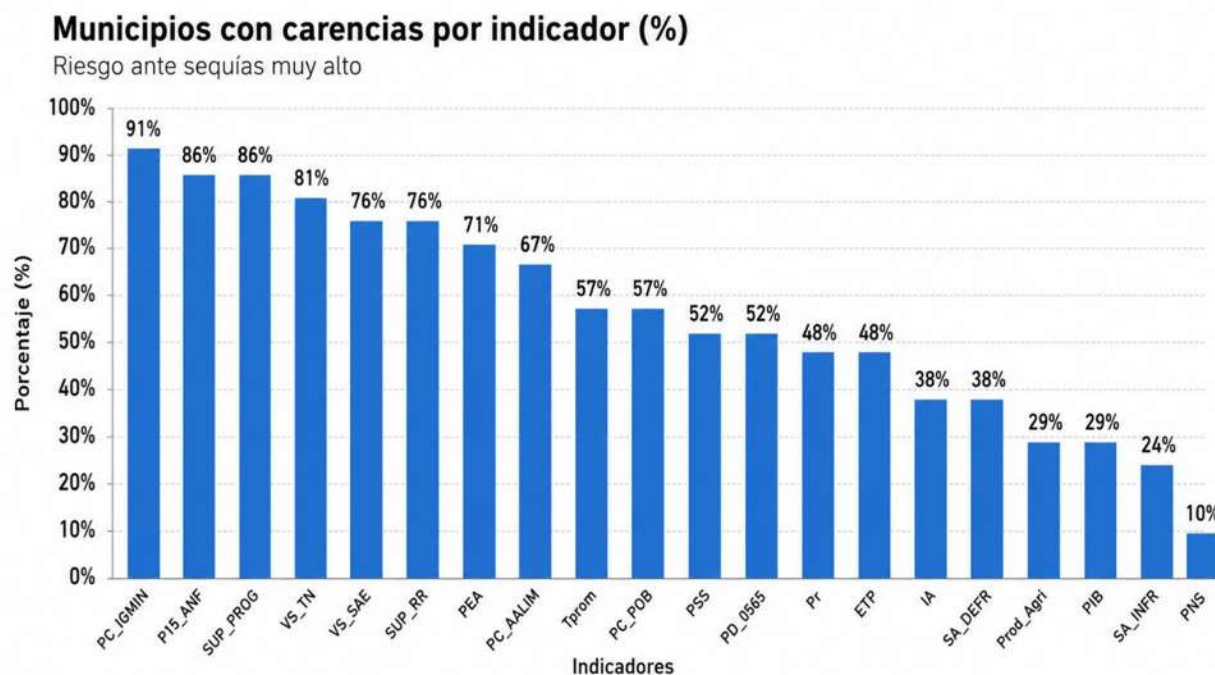


Figura 9.49 Proporción territorial por nivel de riesgo ante sequías: Muy alto.

Los municipios clasificados con riesgo muy alto ante sequías se integran por distintos tipos de territorios. En primer lugar, se encuentran los municipios cálidos de Tierra Caliente e Infiernillo, conformados por La Huacana, Huetamo, Madero, Múgica, Nocupétaro, San Lucas y Turicato, los cuales se caracterizan por altas temperaturas, elevada evapotranspiración y presión sobre el recurso hídrico. Un segundo grupo corresponde a los municipios rurales de transición cálida, integrado por Susupuato, Tiquicheo de Nicolás Romero, Tuzantla y Tzitzio, donde predominan localidades dispersas y posibles limitaciones de infraestructura hídrica. Asimismo, Áporo, Charapan, Nahuatzen y Ocampo conforman un grupo de municipios forestales y serranos, asociados con presión ambiental y dependencia de los recursos naturales. Por su parte, Aguila, Coahuayana, Chinicuila y Tumbiscatio corresponden a municipios de Sierra-Costa, caracterizados por relieve accidentado, aislamiento territorial y menor capacidad de respuesta. Finalmente, Ixtlán representa un municipio agrícola de valle, donde la presión sobre el agua se relaciona principalmente con la actividad agrícola.

Tabla 9.19 Medidas de actuación para un nivel de riesgo muy alto ante sequías.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1. Programa emergente de abastecimiento de agua con pipas.
2. Instalación de puntos comunitarios de distribución de agua.

Continúa

3. Entrega prioritaria de tinacos a viviendas vulnerables.
4. Construcción de cisternas comunitarias.
5. Instalación de tanques móviles en localidades críticas.
6. Rehabilitación urgente de redes de agua potable.
7. Ampliación de redes de agua entubada en localidades sin servicio.
8. Reparación inmediata de fugas en redes de distribución.
9. Rehabilitación de líneas de conducción de agua potable.
10. Mantenimiento urgente de pozos, cárcamos, tanques y manantiales.
11. Instalación de macromedidores en fuentes de abastecimiento.
12. Sectorización de redes para controlar pérdidas de agua.
13. Construcción o rehabilitación de tanques elevados.
14. Limpieza y desinfección de tinacos, cisternas y depósitos comunitarios.
15. Captación de agua de lluvia en viviendas.
16. Captación de agua de lluvia en escuelas.
17. Captación de agua de lluvia en centros de salud.
18. Captación de agua de lluvia en edificios públicos.
19. Inventario de fuentes alternas de abastecimiento.
20. Rehabilitación de manantiales y pequeñas fuentes locales.
21. Uso de agua tratada para actividades no potables.
22. Restricción temporal de usos no esenciales del agua durante sequías severas.
23. Priorización del agua para consumo humano, salud y alimentación.
24. Planes de tandeo controlado y previamente comunicado.

MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

25. Plan municipal de contingencia por sequía de aplicación inmediata.
26. Sistema municipal de alerta temprana por sequía.
27. Semáforo de sequía con acciones obligatorias por nivel de alerta.
28. Monitoreo mensual de precipitación y temperatura.
29. Monitoreo de índice de aridez y evaporación potencial.
30. Seguimiento del SPEI u otro índice de sequía.
31. Monitoreo de niveles de pozos, manantiales, bordos y presas.
32. Boletines municipales de sequía para autoridades y comunidades.
33. Mapa de localidades críticas por desabasto de agua.
34. Padrón de comunidades con carencia de agua entubada.
35. Padrón de viviendas sin almacenamiento doméstico.
36. Sistema comunitario de reporte de escasez de agua.
37. Definición de rutas de distribución de agua en emergencia.
38. Protocolos para sequía severa y extrema.
39. Simulacros municipales ante desabasto de agua.
40. Capacitación a Protección Civil municipal para atención de sequías.

AGRICULTURA

41. Rehabilitación urgente de canales de riego.
42. Revestimiento de canales con mayores pérdidas.

Continúa

43. Entubamiento de tramos críticos de conducción agrícola.
44. Mantenimiento de compuertas, tomas y estructuras de distribución.
45. Rehabilitación de bordos agrícolas.
46. Construcción de ollas de agua para uso agrícola y ganadero.
47. Programa prioritario de riego por goteo.
48. Programa de aspersión eficiente en zonas agrícolas viables.
49. Instalación de sensores de humedad del suelo en parcelas piloto.
50. Capacitación en programación del riego.
51. Reconversión hacia cultivos menos demandantes de agua.
52. Entrega de semillas resistentes a sequía.
53. Ajuste de calendarios de siembra y cosecha.
54. Promoción de agricultura de temporal adaptada a sequía.
55. Uso de rastrojo, acolchado o cobertura vegetal para conservar humedad.
56. Labranza mínima para reducir evaporación del suelo.
57. Incorporación de materia orgánica para mejorar la retención de humedad.
58. Bancos comunitarios de semillas adaptadas a condiciones secas.
59. Asistencia técnica directa a pequeños productores.
60. Apoyo con insumos a productores de autoconsumo.
61. Fondo de contingencia para pérdidas agrícolas por sequía.
62. Seguro agrícola para municipios con riesgo muy alto.

SEGURIDAD ALIMENTARIA

63. Apoyo alimentario temporal durante sequías severas.
64. Bancos comunitarios de alimentos en localidades prioritarias.
65. Programa de huertos familiares con bajo consumo de agua.
66. Impulso a agricultura de traspatio.
67. Apoyo directo a familias con ingresos por debajo de la línea de bienestar.
68. Subsidios focalizados para hogares altamente vulnerables.
69. Entrega prioritaria de agua a adultos mayores, infancia y población dependiente.
70. Seguimiento comunitario a hogares con población vulnerable por edad.
71. Programa de empleo temporal para familias afectadas por sequía.
72. Apoyo a pequeños productores de autoconsumo.
73. Vinculación de programas sociales con medidas de adaptación a sequía.

RESTAURACIÓN AMBIENTAL

74. Programa intensivo de restauración de microcuencas.
75. Reforestación con especies nativas en zonas de recarga hídrica.
76. Restauración de áreas deforestadas.
77. Protección de manantiales y nacimientos de agua.
78. Cercado de zonas de recarga hídrica.
79. Construcción de zanjas de infiltración.
80. Construcción de presas filtrantes.
81. Construcción de terrazas en zonas erosionadas.

Continúa

82. Construcción de bordos de captación.
83. Instalación de barreras vivas en laderas agrícolas.
84. Obras de control de erosión en zonas degradadas.
85. Protección de riberas, humedales y cuerpos de agua.
86. Ampliación de áreas protegidas municipales o comunitarias.
87. Programa de pago por servicios ambientales en zonas de recarga.
88. Regulación estricta del cambio de uso de suelo en zonas de recarga.
89. Restauración de zonas afectadas por incendios forestales.

PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

90. Campañas intensivas de prevención de incendios forestales.
91. Apertura y mantenimiento de brechas cortafuego.
92. Formación de brigadas comunitarias contra incendios.
93. Vigilancia permanente durante temporada seca.
94. Manejo de material combustible en zonas forestales.
95. Capacitación comunitaria para respuesta temprana ante incendios.
96. Restricción de quemas agrícolas durante periodos críticos.
97. Restauración de suelos afectados por incendios.
98. Campañas para evitar quemas no controladas.

ORGANIZACIÓN COMUNITARIA

99. Campañas comunitarias de ahorro de agua.
100. Talleres sobre almacenamiento seguro de agua.
101. Talleres sobre captación de agua de lluvia.
102. Materiales visuales sobre sequía para población con rezago educativo.
103. Mensajes por radio local sobre uso responsable del agua.
104. Reuniones comunitarias antes y durante la temporada seca.
105. Capacitación a autoridades auxiliares sobre gestión de sequías.
106. Fortalecimiento de comités comunitarios de agua.
107. Capacitación de comités para operación y mantenimiento de sistemas de agua.
108. Participación comunitaria en monitoreo de pozos, manantiales y bordos.
109. Campañas escolares sobre sequía, cambio climático y cuidado del agua.
110. Difusión de rutas, horarios y puntos de distribución de agua en emergencia.

PLANEACIÓN INSTITUCIONAL

111. Creación de una unidad municipal de atención a sequías.
112. Comité municipal de sequía con participación de agua potable, Protección Civil, productores y comunidades.
113. Gestión prioritaria de recursos estatales y federales.
114. Cartera de proyectos urgentes para agua potable, riego y restauración.
115. Incorporación del riesgo de sequía en el Plan Municipal de Desarrollo.
116. Integración del riesgo hídrico en el ordenamiento territorial.
117. Evaluación de disponibilidad de agua antes de autorizar nuevos desarrollos.
118. Restricción de nuevas actividades altamente demandantes de agua.
119. Reglamento municipal para proteger zonas de recarga hídrica.

Continúa

- 120. Actualización semestral o anual de indicadores de riesgo.
 - 121. Seguimiento de avances de las medidas implementadas.
 - 122. Coordinación con dependencias estatales y federales para atención prioritaria.
 - 123. Asignación de presupuesto municipal específico para sequía.
 - 124. Declaratoria municipal de atención prioritaria en localidades críticas.
-

10 Discusión

Los resultados obtenidos permiten analizar el riesgo ante sequías en Michoacán desde una perspectiva integral, en la que no solo se considera el comportamiento climático, sino también las condiciones sociales, económicas, ambientales y de infraestructura que influyen en la vulnerabilidad de cada municipio. Este enfoque es relevante debido a que la sequía no genera impactos únicamente por la disminución de la precipitación, sino por la interacción entre el peligro climático, la exposición de la población y la capacidad que tiene cada territorio para responder, adaptarse y recuperarse.

En primer lugar, el análisis de la información climatológica observada evidenció una limitación importante para el estudio del riesgo por sequías en Michoacán: la disponibilidad, continuidad y calidad de los registros meteorológicos no es homogénea en todo el estado. Aunque existen estaciones climatológicas distribuidas en el territorio, muchas presentan series incompletas, periodos discontinuos o inconsistencias estadísticas, por lo que fue necesario realizar un proceso de revisión, depuración y validación mediante pruebas de homogeneidad e independencia. Este tratamiento permitió seleccionar las estaciones con mayor consistencia y reducir la incertidumbre asociada al uso de datos climáticos.

Sin embargo, aun después de este proceso, no todos los municipios contaban con información climatológica suficiente, por lo que fue necesario aplicar el método IDW para el llenado de datos faltantes y generar estaciones ficticias en aquellos municipios sin registros disponibles. Estas herramientas permitieron contar con series climáticas continuas y una cobertura municipal completa para los 113 municipios del estado. No obstante, los resultados obtenidos en municipios sin estación observada deben interpretarse como aproximaciones espaciales razonables, sujetas a la calidad y densidad de las estaciones cercanas.

Respecto a las condiciones climáticas futuras, los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 muestran una tendencia general hacia el incremento de la temperatura y modificaciones en la precipitación. Estos cambios son relevantes porque el aumento térmico incrementa la demanda atmosférica de humedad y, por lo tanto, puede intensificar el déficit hídrico aun cuando la precipitación no disminuya de forma drástica. Esto justifica el uso del SPEI-12, ya que este índice incorpora tanto la precipitación como la evapotranspiración, permitiendo representar de mejor manera el efecto del calentamiento sobre las sequías meteorológicas. A diferencia de índices basados únicamente en precipitación, el SPEI permite observar cómo el aumento de temperatura puede agravar las condiciones de sequía al incrementar la pérdida potencial de agua.

La caracterización histórica de sequías mediante el SPEI-12 evidenció que los eventos secos han estado presentes en distintos municipios del estado, con variaciones en duración, intensidad y magnitud. La duración media y máxima permitió identificar municipios donde los eventos secos pueden prolongarse durante varios meses, lo que implica una afectación acumulada sobre los sistemas agrícolas, fuentes de abastecimiento y ecosistemas. Por su parte, la intensidad y magnitud

reflejan que no todos los eventos tienen el mismo grado de severidad. Esta diferencia es importante porque un municipio puede presentar sequías menos frecuentes, pero de mayor duración o magnitud, lo cual puede generar impactos más complejos que eventos breves pero recurrentes.

Al comparar las condiciones históricas con las proyecciones de cambio climático, se observa que el peligro por sequía tiende a modificarse en el tiempo, particularmente bajo el escenario SSP5-8.5 y en el horizonte de largo plazo. Esto es coherente con la lógica de los escenarios climáticos, ya que el SSP5-8.5 representa una trayectoria de mayores emisiones y, por lo tanto, mayores incrementos de temperatura. En este contexto, los resultados sugieren que las sequías futuras podrían no solo mantenerse como un problema recurrente, sino intensificarse en ciertos territorios donde el aumento de temperatura, la reducción o redistribución de la precipitación y la mayor evapotranspiración coincidan con condiciones de vulnerabilidad preexistentes.

Un aspecto importante de los resultados es que el riesgo no se distribuye únicamente en función del peligro climático. Es decir, los municipios con mayor riesgo no necesariamente son solo aquellos donde se proyectan las sequías más intensas, sino aquellos donde el peligro coincide con alta exposición y vulnerabilidad. Esto confirma que el riesgo ante sequías es una construcción territorial compleja. Por ejemplo, un municipio puede presentar condiciones climáticas adversas, pero si cuenta con mayor infraestructura, capacidad económica, cobertura de servicios, almacenamiento de agua y capacidad institucional, su nivel de riesgo puede ser menor. En cambio, municipios con menor capacidad de adaptación pueden alcanzar niveles altos o muy altos de riesgo incluso cuando el peligro climático no sea el más extremo del estado.

La vulnerabilidad histórica mostró diferencias importantes entre municipios, asociadas principalmente a indicadores de sensibilidad y capacidad de adaptación. Los indicadores ambientales, económicos y sociales permitieron identificar territorios donde las condiciones estructurales incrementan la susceptibilidad ante sequías. Entre los factores que más inciden se encuentran la evaporación potencial, el índice de aridez, la superficie deforestada, los incendios forestales, la dependencia de actividades agropecuarias, la pobreza, las carencias alimentarias, el rezago educativo y la población dependiente. Estos elementos muestran que la sequía no debe abordarse únicamente como un fenómeno meteorológico, sino como un problema de desarrollo territorial, infraestructura, conservación ambiental y bienestar social.

En cuanto a la capacidad de adaptación, los resultados indican que los municipios con mayor infraestructura productiva, mayor actividad económica, superficie rehabilitada al riego, áreas protegidas o mayor población económicamente activa presentan mejores condiciones para enfrentar los efectos de la sequía. Sin embargo, esta capacidad no es uniforme. Algunos municipios pueden tener una amenaza climática considerable, pero una mayor capacidad institucional o económica que reduce su clasificación final de riesgo. Por ello, la capacidad de adaptación se convierte en un componente estratégico: no elimina la ocurrencia de sequías, pero sí puede reducir sus impactos.

La clasificación de riesgo permitió identificar grupos de municipios con condiciones diferenciadas. Los municipios clasificados con riesgo muy bajo o bajo tienden a presentar mejores condiciones relativas de infraestructura, concentración urbana, capacidad económica o menor combinación de factores críticos. En este grupo se encuentran municipios con mayor presencia de servicios, conectividad o actividades económicas más consolidadas, como Morelia, Zamora, Zacapu, La Piedad, Uruapan o Pátzcuaro, aunque esto no significa que estén exentos de impactos. En estos casos, el riesgo menor debe interpretarse como una oportunidad para fortalecer acciones preventivas, conservar capacidades existentes y evitar que el cambio climático incremente su vulnerabilidad futura.

Los municipios con riesgo medio representan una condición de transición. En ellos, los resultados sugieren que existen factores de vulnerabilidad que aún pueden atenderse mediante medidas preventivas y de adaptación antes de que el riesgo aumente. Este grupo incluye municipios con actividad agrícola, zonas forestales o condiciones socioeconómicas heterogéneas, donde la sequía puede afectar tanto la producción como el abastecimiento de agua. Por ello, las medidas deben enfocarse en fortalecer el monitoreo, mejorar la eficiencia del riego, conservar suelos, proteger fuentes de agua y aumentar la capacidad institucional local.

Los municipios con riesgo alto y muy alto requieren atención prioritaria. En términos generales, estos municipios presentan una combinación más crítica de factores: mayor sensibilidad social o ambiental, menor capacidad de adaptación, limitaciones en infraestructura hídrica, mayor dependencia de actividades sensibles al clima o presencia de condiciones climáticas que favorecen el déficit hídrico. En el riesgo muy alto se observan municipios de regiones como Tierra Caliente, Sierra-Costa, zonas rurales y áreas con dispersión poblacional o limitaciones de acceso a servicios. Municipios como Aguila, Coahuayana, Chinicuila, Huetamo, Múgica, Nocupétaro, San Lucas, Tiquicheo, Tumbiscatío, Turicato, Tuzantla y Tzitzio reflejan territorios donde la sequía puede generar impactos más severos por la combinación entre amenaza climática y condiciones sociales, productivas y ambientales vulnerables.

La distribución del riesgo futuro confirma la hipótesis general de la investigación: bajo escenarios de cambio climático, el riesgo ante sequías puede incrementarse o intensificarse en distintos municipios de Michoacán. No obstante, los resultados también muestran que este incremento no será uniforme. Algunos municipios podrían experimentar cambios importantes en el peligro, mientras que otros mantendrán niveles elevados de riesgo debido principalmente a sus condiciones de vulnerabilidad y exposición. Esto es relevante porque demuestra que la adaptación no debe diseñarse de forma general para todo el estado, sino con criterios territoriales y sectoriales.

Las medidas de actuación propuestas responden de manera adecuada a esta diferenciación del riesgo. Para municipios con riesgo muy bajo y bajo, las acciones preventivas como campañas de ahorro, monitoreo, mantenimiento de infraestructura, captación de agua de lluvia y fortalecimiento institucional son suficientes como primera línea de actuación. En cambio, para municipios con riesgo medio, alto y muy alto, las medidas deben adquirir un carácter más urgente e integral,

incorporando acciones de abastecimiento, tecnificación agrícola, seguridad alimentaria, restauración ambiental, prevención de incendios, organización comunitaria y asignación presupuestal específica.

Un punto destacable es que las medidas no se plantean únicamente para responder durante una emergencia, sino para construir capacidades antes de que los impactos se intensifiquen. Esto representa un cambio importante respecto a una visión reactiva de la sequía. La gestión del riesgo debe orientarse hacia la prevención, el monitoreo continuo y la adaptación progresiva. En este sentido, el uso de semáforos de sequía, seguimiento del SPEI, inventarios de fuentes de agua, mapas de comunidades vulnerables y protocolos de actuación permitiría que los municipios anticipen condiciones críticas y actúen antes de llegar a una situación de emergencia.

11 Conclusiones

En este trabajo se planteó como objetivo analizar el riesgo asociado a las sequías a escala municipal para el estado de Michoacán, basándose en información histórica y considerando el efecto del cambio climático, con el fin de proponer medidas de actuación para la población. Bajo este enfoque, se estableció la hipótesis de que el riesgo ante sequías en los municipios de Michoacán aumentaría debido a los efectos del cambio climático, y que dicho incremento podría mitigarse mediante medidas de actuación orientadas a la población.

Uno de los principales retos del estudio fue la disponibilidad y continuidad de la información climatológica en Michoacán. La presencia de datos faltantes obligó a implementar un tratamiento y depuración de series para representar de forma consistente las condiciones climáticas actuales. Este paso fue clave, ya que permitió construir una base sólida tanto para el diagnóstico histórico como para el análisis con proyecciones, y facilitó la adaptación de la información histórica al uso de escenarios de cambio climático. A partir de este proceso fue posible identificar patrones coherentes con lo esperado bajo condiciones futuras, observándose un incremento en las temperaturas y una reducción en la precipitación, especialmente en el escenario más desfavorable, lo cual confirma la presión adicional que el cambio climático puede ejercer sobre la disponibilidad hídrica.

En cuanto al análisis de riesgo, se reconoce que existen múltiples metodologías disponibles y enfoques posibles. Sin embargo, la metodología desarrollada permitió integrar componentes climáticos y socioeconómicos, tanto en condiciones actuales como futuras, a escala municipal. Esta escala representó un desafío importante por la variabilidad territorial y por las limitaciones de información local, pero aun así los resultados obtenidos reflejan de manera consistente la distribución del riesgo y sus cambios potenciales bajo escenarios de cambio climático. En términos generales, la evaluación evidencia que el riesgo no depende únicamente del comportamiento climático, sino también de la capacidad de respuesta y de las condiciones estructurales que influyen en la vulnerabilidad de los municipios.

Respecto a las medidas de actuación, su formulación fue uno de los apartados más complejos, ya que implicó traducir el diagnóstico técnico en propuestas aplicables y pertinentes. Aun así, las medidas se diseñaron considerando las necesidades específicas identificadas, agrupando municipios con condiciones similares para orientar acciones más realistas. Asimismo, se propusieron medidas ordenadas por prioridades sectoriales, incorporando acciones que pueden impulsarse desde el ámbito gubernamental y organizacional para fortalecer las capacidades de la población. Es importante destacar que las medidas se plantearon desde un escenario de normalidad, como una estrategia de planificación y prevención para disminuir afectaciones futuras.

En conjunto, los resultados permiten afirmar que se cumplieron los objetivos establecidos al inicio del trabajo y que la hipótesis planteada se sostiene a partir de la evidencia generada: el cambio climático tiende a incrementar el riesgo ante sequías y, por lo tanto, es indispensable avanzar hacia

acciones preventivas, operativas y de gestión que permitan mitigar ese riesgo. Finalmente, este estudio también pone en evidencia los retos y desafíos actuales en materia de recursos hídricos en Michoacán, particularmente en términos de información disponible, planificación anticipada y reducción de vulnerabilidades, elementos que resultan clave para enfrentar de forma más resiliente los impactos de las sequías en el futuro.

12 Recomendaciones y líneas futuras

Como recomendaciones derivadas de este trabajo, resulta prioritario fortalecer la disponibilidad y calidad de la información climática e hidrológica en Michoacán mediante el mejoramiento de redes de monitoreo, estandarización de tratamientos de datos y una gestión adecuada de metadatos, ya que esto reduce la incertidumbre y permite diagnósticos más confiables.

Asimismo, se recomienda que la evaluación del riesgo por sequías se institucionalice como un proceso periódico y no como un ejercicio aislado, de modo que pueda actualizarse con el tiempo e integrarse a la planeación territorial, la gestión del agua y la protección civil, vinculándose además con presupuestos y programas operativos reales.

Se sugiere priorizar la prevención desde condiciones de normalidad, con acciones escalonadas y diferenciadas por tipo de municipio, fortaleciendo la coordinación interinstitucional, las capacidades locales y la comunicación del riesgo con participación social para mejorar la adopción de medidas.

Como líneas futuras, se propone profundizar en la cuantificación de incertidumbre y en el uso de ensambles climáticos, incorporar dinámicas de demanda y cambios en uso de suelo, y avanzar hacia una integración más completa con modelos de disponibilidad y operación hídrica (presas y acuíferos) para evaluar decisiones de gestión.

También es recomendable validar los resultados con evidencia histórica de impactos, y evaluar la factibilidad de las medidas mediante criterios de costo–beneficio, tiempos de implementación y barreras institucionales, así como desarrollar umbrales operativos que activen medidas de forma temprana y construir herramientas de apoyo a la decisión (mapas interactivos o tableros) que faciliten la aplicación de los resultados a escala municipal.

13 Referencias

- Anderson, R. L. (1942). Distribution of the Serial Correlation Coefficient. *The Annals of Mathematical Statistics*, 13(1), 1–13. <http://www.jstor.org/stable/2236157>
- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Ortega-Gaucin, D. (2016). La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VII(5), 63–76.
- Balica, S. F., Douben, N., & Wright, N. G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Science and Technology*, 60(10), 2571–2580. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.183>
- Bitrán, D., Acosta, L., Eslava, H., Gutiérrez, C., Salas, M. A., & Vázquez, M. T. (2002). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2001* (1º). www.cenapred.unam.mx
- Burg, J. (2008). Measuring populations' vulnerabilities for famine and food security interventions: the case of Ethiopia's Chronic Vulnerability Index. *Disasters*, 32(4), 609–630. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2008.01057.x>
- Byun, H.-R., & Wilhite, D. A. (1999). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, Vol. 12, 2747–2756.
- Cáceres, K. (2001). *Metodología para estimar degradación y vulnerabilidad a desastres naturales: aplicación a la microcuenca Los Naranjos, Lago de Yojoa, Honduras*.
- Campos-Aranda, D. F. (2013). Caracterización de sequías meteorológicas mediante curvas de severidad-área-frecuencia, en el Valle de San Luis Potosí, México. *Tecnología y Ciencia Del Agua*, Vol. 4(3), 165–186.
- Campos-Aranda, D. F. (2018a). Statistical analysis of the occurrence of annual meteorological droughts according to climate type in the state of San Luis Potosí, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 213–236. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-10>
- Campos-Aranda, D. F. (2018b). Statistical analysis of the occurrence of annual meteorological droughts according to climate type in the state of San Luis Potosí, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 213–236. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-10>
- Casillas, R. (2023). Cambio climático y asentamientos de migrantes del norte de Centroamérica en México: vulnerabilidades y riesgos. *Notas de Población*, 116, 195–222.
- Castellano, H. V. (2021). *Metodología para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo ante sequías en los Organismos Operadores de Agua Potable (OOAPAS) de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Castillo, A. E., Peña, L. S., & Delgado, S. G. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. In *Estudios Demográficos y Urbanos* (Vol. 32, Issue 3, pp. 669–693). Colegio de México, A.C., Departamento de Publicaciones. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017a). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(1), 35–52. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-03>
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017b). Analysis of meteorological drought in the Fuerte River Basin. *Mexico. Water Technology and Sciences*, VIII (1), 35.
- Castro, S. (2012). La gestión del riesgo para enfrentar los mitos y realidades del calentamiento global antropogénico. *Revista de Geología Aplicada a La Ingeniería y al Ambiente*, 28, 111–125. <http://en.wikipe->
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Cervantes-Martínez, R., & Trucios-Caciano, R. (2013). RECONSTRUCTION OF SEVERE DROUGHTS IN “PICO DE TANCÍTARO” NATIONAL PARK, MICHOACÁN. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII (2), 57–62. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.026>
- CONAGUA. (2013). *Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía en la Cuenca Lerma-Chapala*.
- CONAGUA. (2025). *Comisión Nacional de Agua*. <https://www.gob.mx/conagua>
- Copernicus. (2025). *Copernicus Interactive Climate Atlas*. Copernicus Climate Data Store. <https://climate.copernicus.eu/climate-atlas>
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VII (5), 77–93.
- Domínguez, M., Blancas, P., Francisco Javier, Guerrero, C., Flor María, & González, M. (2010). Una revisión crítica para la construcción de indicadores sintéticos. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía y La Empresa*, 11, 41–70. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/es/>
- Doorembos, J. (1976). *Agro meteorological field stations Vol Irrigation and Drainage Paper No 27*. Food And Agriculture Organization of the United Nations.
- ENCC. (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático, Visión 10-20-40*. www.semarnat.gob.mx
- FAO. (2021). *Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Vol. 56).

- Flores, A. (2022). *Evaluación del efecto del cambio climático y formulación de medidas de adaptación en el municipio de Morelia, Michoacán*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Fontaine, M. M., & Steinemann, A. C. (2009). Assessing Vulnerability to Natural Hazards: Impact-Based Method and Application to Drought in Washington State. *Natural Hazards Review*, 10(1), 11–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2009\)10:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2009)10:1(11))
- Gobierno de Michoacán. (2021). *Regionalización de los foros presenciales*. <http://foros.michoacan.gob.mx/regiones.html>
- Gobierno de Michoacán. (2024). *En sequía el 84 % del territorio michoacano; cuida el agua con estas acciones diarias*. <https://michoacan.gob.mx/noticias/en-sequia-el-84-del-territorio-michoacano-cuida-el-agua-con-estas-acciones-diarias/>
- Gómez, S. N. (2003). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD CON ÉNFASIS EN SEQUÍA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO AGUAS CALIENTES, SOMOTO, NICARAGUA*. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA.
- González, E. J., & Meira, P. Á. (2020). Educacion para el cambio climatico ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles Educativos*, 42(168), 157–174. <https://doi.org/10.22201/IISUE.24486167E.2020.168.59464>
- Guevara, E., Quaas, R., & Fernández, G. (2006). *Guia básica para elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*. Secretaría de Gobernación: Centro Nacional de Prevención y Desastres.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. (1982). Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, 223–230. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1994\)120:6\(1132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1994)120:6(1132))
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., & Widhalm, M. (2011). The lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485–488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>
- Heltberg, R., & Bonch-Osmolovskiy, M. (2011). Mapping Vulnerability to Climate Change. *The World Bank*, 5554, 1–18. <http://econ.worldbank.org>.
- Herrera, M. C., & Briones, F. (2016). Percepciones sobre las amenazas y riesgos hidrometeorológicos entre los productores de aguacate de Tancítaro, Michoacán. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, 16(31), 47–69.
- INECC. (2022). *Guía sobre escenarios de cambio climático para tomadores de decisiones*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

- INEGI. (2017). *Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo 2017*. <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2020). *Panorama Sociodemográfico de México 2020. Michoacán de Ocampo*. <http://www.inegi.org.mx>
- INEGI. (2024). *Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI)*. <https://www.inegi.org.mx/>
- IPCC. (2001). *CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ed.).
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: síntesis de informe*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para Responsables de Políticas. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático*, (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ed.). www.ipcc.ch.
- IPCC. (2022). *Cambio Climático: Impacto, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Grupo de Trabajo II*. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- Isaza, J. F., & Campo, D. (2007). *Cambio Climático. Glaciaciones y calentamiento global* (Primera).
- Isia, I., Hadibarata, T., Jusoh, M. N. H., Bhattacharjya, R. K., Shahedan, N. F., Bouaissi, A., Fitriyani, N. L., & Syafrudin, M. (2022). Drought Analysis Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index and Standardized Precipitation Index in Sarawak, Malaysia. *Sustainability*, 15(1), 734. <https://doi.org/10.3390/su15010734>
- Iyengar, N. S., & Sudarshan, P. (1982). A Method of Classifying Regions from Multivariate Data. *Economic and Political Weekly*, 17(51), 2047–2052. <http://www.jstor.org/stable/4371674>
- Kavalieratou, S., Karpouzou, D. K., & Babajimopoulos, C. (2012). Drought analysis and short-term forecast in the Aison River Basin (Greece). In *Natural Hazards and Earth System Science* (Vol. 12, Issue 5, pp. 1561–1572). <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1561-2012>
- Khazaei, M. R. (2025). Projected changes to drought characteristics in Tehran under CMIP6 SSP-RCP climate change scenarios. *Heliyon*, 11(2), e41811. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41811>
- Kilsby, C. G., Jones, P. D., Burton, A., Ford, A. C., Fowler, H. J., Harpham, C., James, P., Smith, A., & Wilby, R. L. (2007). A daily weather generator for use in climate change studies.

Environmental Modelling and Software, 22(12), 1705–1719.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.02.005>

- Köppen, W. (2011). The thermal zones of the Earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(3), 351–360. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/105>
- Lê, S., Josse, J., Rennes, A., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *JSS Journal of Statistical Software*, 25. <http://www.jstatsoft.org/>
- Leal, O. A., & Villaseñor, L. (2005). *La biodiversidad en Michoacán: estudio de estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Li, Z., Wang, K., Ma, H., & Wu, Y. (2018). An Adjusted Inverse Distance Weighted Spatial Interpolation Method. *Advances in Computer Science Research*, 65, 128–132.
- López, C., & Pradel, M. (2021). *Las migraciones climáticas, otro efecto del calentamiento global*.
- Lozares, C., & López, P. (1991). EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES: APLICACIÓN AL ANÁLISIS DE DATOS SECUNDARIOS. *Revista de Sociología*, 37, 31–63.
- Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(03\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(03)00054-2)
- Martín, P. G., Díaz De Pascual, A., Torres, E., Elsy, L., & Olmos, G. (1994). UNA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN EL ÁREA EDUCATIVA. *Revista Economía*, 9, 55–72.
- Martínez, J., Fernández, A., & Osnaya, P. (2004). *Cambio climático: una visión desde México* (Primera Edición).
- Martínez-Sifuentes, A. R., Trucíos-Caciano, R., Rodríguez-Moreno, V. M., Villanueva-Díaz, J., & Estrada-Ávalos, J. (2023). The Impact of Climate Change on Evapotranspiration and Flow in a Major Basin in Northern Mexico. *Sustainability*, 15(1), 847. <https://doi.org/10.3390/su15010847>
- Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*.
- Mather, J. R. (1975). *Estimation of areal average precipitation using different network densities and averaging techniques: Vol. XXVIII*. Publication in Climatology.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. In *Eighth Conference on Applied Climatology*.

- Me-Bar, Y., & Valdez, F. (2005). On the vulnerability of the ancient Maya society to natural threats. *Journal of Archaeological Science*, 32(6), 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2004.11.015>
- Mercado Vargas, H., & Cerna, M. P. (2005). *El estado de Michoacán y sus regiones turísticas*. <http://www.eumed.net/libros-gratis/2012b/1230/index.htm>
- MSM. (2025). *Monitor de Sequías de México*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Mussetta, P., Barrientos, J. M., Acevedo, E., Turbay, S., & Ocampo, O. (2017). Vulnerabilidad al cambio climático: dificultades en el uso de indicadores en dos cuencas de Colombia y Argentina. *EMPIRIA*, 36, 119–147. <https://doi.org/DOI/empiria.36.2017.17862>
- NADM. (2024). *Monitor de Sequías de América del Norte*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>
- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., & Ávila-Serrano, N. Y. (2011). COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UNA ZONA ÁRIDA CITRÍCOLA DEL NOROESTE DE MEXICO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 147–155.
- Núñez-López, D., Muñoz-Robles, C. A., Reyes-Gómez, V. M., Velasco-Velasco, I., & Gadsden-Esparza, H. (2007). Caracterización de la sequía a diversas escalas de tiempo en Chihuahua, México. *AGROCIENCIA*, Vol. 41, 253–262.
- Ojha, S. S., Singh, V., & Roshni, T. (2021). Comparison of Meteorological Drought using SPI and SPEI. *Civil Engineering Journal*, 7(12), 2130–2149. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091783>
- OMM. (1966). *Climate Change. No. 79* (Organización Meteorológica Mundial, Ed.; Vol. 79). <https://library.wmo.int/idurl/4/58659>
- OMM. (2016). *Manual de indicadores e índices de sequías* (Programa de gestión integral de sequías, Ed.). Organización Meteorológica Mundial. www.droughtmanagement.info
- OMM. (2021). *Informe sobre el estado del clima mundial 2021*.
- Ortega, D. (2013). CIENCIA Y SOCIEDAD Sequía: causas y efectos de un fenómeno global. *CIENCIA UANL*, 61, 8–15.
- Ortega-Gaucin, D., De la Cruz, J., & Castellano, H. V. (2018). *Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México*. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/2192>

- Ortega-Gaucin, D., Velasco, I., De La Cruz, J., & Castellano, H. V. (2016). METODOLOGÍA PARA CALCULAR ÍNDICES DE VULNERABILIDAD ANTE LA SEQUÍA EN LOS ORGANISMOS DE CUENCA EN MÉXICO. *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- Ortiz, C. F., & Ortega, A. M. (2015). *Riesgo meteorológico de sequía y su impacto agro-socioeconómico de la Región Tierra Caliente, Michoacán, México*. https://www.researchgate.net/profile/Carlos-Ortiz-Paniagua/publication/286121584_INNOVATION_AND_GEOGRAPHICAL_SPILLOVERS_NEW_APPROACHES_AND_EVIDENCE/links/56664b1808ae418a786f40d0/INNOVATION-AND-GEOGRAPHICAL-SPILLOVERS-NEW-APPROACHES-AND-EVIDENCE.pdf
- Ortiz-Gómez, R., Cardona-Díaz, J. C., Ortiz-Robles, F. A., & Alvarado-Medellín, P. (2018a). Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 47–91. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-03>
- Ortiz-Gómez, R., Cardona-Díaz, J. C., Ortiz-Robles, F. A., & Alvarado-Medellín, P. (2018b). Characterization of droughts by comparing three multiscale indices in Zacatecas, Mexico. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 47–91. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-03>
- Pérez, V. E., Blancas, F. J., González, M., Guerrero, F. M., Lozano, M., Pérez, F., & Caballero, R. E. (2009). EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DEL TURISMO RURAL MEDIANTE INDICADORES SINTÉTICOS. *REVISTA INVESTIGACIÓN OPERACIONAL*, 30(1), 40–51.
- Pineda-Pablos, N., & Salazar-Adams, A. (2016). Ciudades y sequías en México, La gestión del agua como estrategias critica de mitigación. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 95–113.
- Rakhmatova, N., Nishonov, B. E., Kholmatjanov, B. M., Rakhmatova, V., Toderich, K. N., Khasankhanova, G. M., Shardakova, L., Khujanazarov, T., Ungalov, A. N., & Belikov, D. A. (2024). Assessing the Potential Impacts of Climate Change on Drought in Uzbekistan: Findings from RCP and SSP Scenarios. *Atmosphere*, 15(7), 866. <https://doi.org/10.3390/atmos15070866>
- Ramírez-Sánchez, U., & Fajardo-Montiel, L. (2024). Impacts of Climate Change on Forest Resources in Mexico: Regional Projections and Vulnerabilities. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 28(12), 67–93. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i12849>
- Rasmussen, J., Sonnenborg, T. O., Stisen, S., Seaby, L. P., Christensen, B. S. B., & Hinsby, K. (2012). Climate change effects on irrigation demands and minimum stream discharge: Impact of bias-correction method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4675–4691. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4675-2012>

- Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C., & Ruedy, A. R. (1990). Potential Evapotranspiration and the Likelihood of Future Drought. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 95(D7), 9983–10004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JD095iD07p09983>
- Rodríguez, M., Mance, H., Barrera, X., & García, C. (2015). *Cambio climático: lo que está en juego* (C. A. Dereix, Ed.; Segunda).
- Romieu, E., Welle, T., Schneiderbauer, S., Pelling, M., & Vinchon, C. (2010). Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications. *Sustainability Science*, 5(2), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11625-010-0112-2>
- SEMARNAT. (2009). *Cambio climático: ciencia, evidencia y acciones*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT, & IMTA. (2014). *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS)*. Ciudad de Puebla, Pue.
- Shiferaw, B., Tesfaye, K., Kassie, M., Abate, T., Prasanna, B. M., & Menkir, A. (2014). Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: Technological, institutional and policy options. *Weather and Climate Extremes*, 3, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.04.004>
- SIH. (2025). *Sistema de Información Hidrológica*. <https://sih.conagua.gob.mx/climas.html>
- Su, B., Huang, J., Mondal, S. K., Zhai, J., Wang, Y., Wen, S., Gao, M., Lv, Y., Jiang, S., Jiang, T., & Li, A. (2021). Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China. *Atmospheric Research*, 250, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105375>
- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). The drought monitor. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 83, Issue 8, pp. 1181–1190). American Meteorological Society. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<1181:TDM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1181:TDM>2.3.CO;2)
- Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053–2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>
- Udmale, P., Ichikawa, Y., Manandhar, S., Ishidaira, H., & Kiem, A. S. (2014). Farmers' perception of drought impacts, local adaptation and administrative mitigation measures in Maharashtra State, India. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 250–269. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.09.011>
- UNDRO, U. N. D. R. C. (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*.

- USDM. (2024). *Monitor de Sequías de los Estados Unidos*.
<https://droughtmonitor.unl.edu/ES/MapaActual.aspx>
- Valiente, Ó. M. (2001). SEQUÍA: DEFINICIONES, TIPOLOGÍAS Y MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN. *Investigaciones Geográficas*, 26, 59–80.
- Vargas, P. (2009). *El Cambio Climático y Sus Efectos en el Perú*.
- Velázquez-Zapata, J. A., & Dávila-Ortiz, R. (2025). Projected Meteorological Drought in Mexico Under CMIP6 Scenarios: Insights into Future Trends and Severity. *Geosciences*, 15(5), 186.
<https://doi.org/10.3390/geosciences15050186>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010a). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010b). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wang, H., & Asefa, T. (2019). Drought monitoring, mitigation, and adaptation. In *Extreme Hydrology and Climate Variability* (pp. 457–474). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00036-1>
- Wang, T., & Sun, F. (2023). Integrated drought vulnerability and risk assessment for future scenarios: An indicator based analysis. *Science of The Total Environment*, 900, 165591. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165591>
- Webb, P., & Harinarayan, A. (1999). A Measure of Uncertainty: The Nature of Vulnerability and Its Relationship to Malnutrition. *Disasters*, 23(4), 292–305.
- Worku, M. A. (2024). Spatiotemporal analysis of drought severity using SPI and SPEI: case study of semi-arid Borana area, southern Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1337190>
- Yen, B. C. (1970). Risks in Hydrologic Design of Engineering Projects. *Journal of the Hydraulics Division*, 96(4), 959–966. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0002476>
- Zarafshani, K., Sharafi, L., Azadi, H., Hosseini, G., De Maeyer, P., & Witlox, F. (2012). Drought vulnerability assessment: The case of wheat farmers in Western Iran. *Global and Planetary Change*, 98–99, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.08.012>
- Zhou, Z., Zhang, L., Chen, J., She, D., Wang, G., Zhang, Q., Xia, J., & Zhang, Y. (2023). Projecting Global Drought Risk Under Various SSP-RCP Scenarios. *Earth's Future*, 11(5). <https://doi.org/10.1029/2022EF003420>

Sandra Lizeth Rodríguez Heredia

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A ESCALA MUNICIPAL PARA EL ESTADO DE MICHOACÁN CONSIDERANDO EL EFECT...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:594475058

Fecha de entrega

25 may 2026, 8:06 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

25 may 2026, 8:14 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

ANÁLISIS DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A ESCALA MUNICIPAL PARA EL ESTADO DE MICHOACÁN CON....pdf

Tamaño del archivo

14.7 MB

136 páginas

32.280 palabras

196.812 caracteres

15% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 15%  Fuentes de Internet
- 9%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
99 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos	
Título del trabajo	ANÁLISIS DE RIESGO ANTE SEQUÍAS A ESCALA MUNICIPAL PARA EL ESTADO DE MICHOACÁN CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Sandra Lizeth Rodríguez Heredia	1596253@umich.mx
Director	Liliana García Romero	liliana.romero@umich.mx
Codirector	Angel Flores Ponce	angel.ponce@umich.mx
Coordinador del programa	Sonia Tatiana Sánchez Quispe	quispe@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	SI	Mejoramiento en gráficos
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Sandra Lizeth Rodriguez Heredia
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 22 de mayo de 2026