



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra
"Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy"



POSGRADO INICIT



Tesis

**Caracterización de la variabilidad y cambio climático en la
Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, periodo 1970-
2050**

Presenta

Ing. Ana Gabriela Quezada Ponce

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias y Planificación del Territorio

Director de tesis

Dr. Rafael Trueba Regalado

Co-directora de tesis

Dra. María Lourdes González Arqueros

Morelia, Mich., mayo de 2026

Dedicatoria

A mis padres, Eliecer y Rosita, que en resumidas palabras son mi todo. Gracias por ser el lugar al que siempre puedo volver. Haber recorrido este camino lejos de ustedes no ha sido fácil; los extraño todos los días. Sin embargo, su amor, sus consejos y los valores que me han inculcado han sido mi guía. Desde niña me enseñaron a enfrentar la vida con valentía, a no rendirme y a caminar con la frente en alto. Todo lo que soy tiene raíz en ustedes, y todo lo que llegaré a ser también les pertenece. Mi papá, mi amor más puro; mi mamá, mi mayor ejemplo de fortaleza y perseverancia.

A mi hermana Tania, por ser ese apoyo que trasciende cualquier distancia. Tu presencia en mi vida ha sido un sostén silencioso pero firme, y saber que cuento contigo en todo momento me ha dado tranquilidad en cada paso de mi vida.

A mi pequeño Tommy, mi niño de cuatro patas, por llenar mis días de alegría y recordarme, con su presencia, que el amor también se encuentra en los gestos más simples. Eres luz en nuestras vidas.

A Alan Bravo, por estar a mi lado en este camino, por hacer más ligera la distancia y por acompañarme con tanto amor y paciencia. Gracias por enseñarme a adaptarme a un nuevo país y por tu apoyo. Este logro también lleva mucho de ti.

Con cariño Gaby...

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, especialmente al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y a la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, por abrirme sus puertas y permitirme formarme en un espacio que hoy siento también como mío.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de posgrado, el cual hizo posible este camino.

De manera muy especial, a la Dra. Ruth Alfaro, por recibirme con tanta calidez desde el primer momento y por acompañarme incluso en la distancia, entre México y Ecuador. Su apoyo, confianza y disposición marcaron profundamente este proceso.

A mi asesor de tesis, el Dr. Rafael Trueba Regalado, a quien estimo mucho, por su guía, su paciencia y su forma de enseñar, que me ha inspirado y motivado. Gracias por impulsarme a crecer, por creer en mí y por abrirme puertas que han sido fundamentales en mi formación.

Al Dr. Boris Chako, coordinador de la maestría, por su apertura, sus consejos y la motivación día con día.

Al Dr. Luis Galván, por recibirme en el Centro de Variabilidad Climática, Teledetección y Evaluación de Riesgos (VARICLIM) en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Gracias por compartirme sus valiosos conocimientos con tanta disposición y por estar siempre disponible para resolver las dudas que surgieron durante el desarrollo de mi investigación.

Al Dr. José Miguel Martínez, por abrirme las puertas del Instituto del Agua y el Medio Ambiente en la Universidad de Murcia - España, y por su cercanía durante mi estancia. Su calidez hizo de esta experiencia algo no solo formativo, sino también profundamente humano e inolvidable.

Al Dr. Carlos Ortiz Paniagua, mi maestro de Desarrollo Sustentable en el Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales, por sus enseñanzas y por la forma tan cercana y significativa en que compartió sus clases, las cuales dejaron una huella muy especial en mí.

A la Dra. Isabel Israde y Lourdes González, integrantes de mi mesa sinodal, por sus valiosas observaciones, las cuales ayudaron a fortalecer este trabajo y a enriquecer mi investigación.

A la maestra Berenice Contreras, por su disposición, su paciencia y por estar siempre presente para resolver mis dudas académicas con amabilidad y compromiso.

A todos mis maestros y compañeros, por coincidir en este camino y aportar, de distintas formas, a mi crecimiento. En especial, a Ameyalli Penagos y Alba Medina, por su amistad desde el inicio, por su apoyo y por hacer más bonita esta etapa.

A mis grandes amigos, Jenny Medina, quien a pesar de la distancia siempre ha estado presente con su cariño y escuchándome siempre; y al Mgtr. Rommel Quizhpe, por su motivación y por recordarme cada día que es posible seguir adelante.

A mi tío Manuel Quezada, por sus enseñanzas, por su cercanía y por el orgullo que siempre ha depositado en mí.

Al Ing. Alexander González, mi maestro desde que inicié mi formación universitaria, por su amistad sincera, sus consejos y su apoyo a lo largo de los años. Su presencia ha sido muy valiosa en mi camino.

¡A todos ustedes, les agradezco de corazón por ser parte fundamental de este logro!

Con cariño Gaby...

Índice

Resumen	12
Introducción	16
Capítulo 1	18
1.1. Antecedentes	18
1.2. Justificación	22
1.3. Preguntas de investigación	23
1.4. Hipótesis	23
1.5. Objetivos	23
Capítulo 2	25
2.1. Tiempo y clima	25
2.2. Variabilidad climática: definición y escalas	26
2.3. Cambio climático	28
2.4. Vulnerabilidad al cambio climático	31
2.5. Capacidad de adaptación al cambio climático	32
2.6. Resiliencia al cambio climático	35
2.7. Mitigación al cambio climático	36
Capítulo 3	38
3.1. Localización y delimitación del área de estudio	38
3.2. Contexto físico-ambiental	39
3.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca	42
Capítulo 4	47
4.1. Análisis del comportamiento climático de la precipitación y la temperatura en la CLC	47
4.2. Análisis de indicadores de cambio climático a escala regional	51

4.3. Análisis de la variabilidad climática y la respuesta hidrológica del Lago de Cuitzeo mediante SPI y NDWI	54
Capítulo 5	60
5.1. Comportamiento climático de la precipitación y temperatura	60
5.2. Indicadores de cambio climático a escala regional	92
5.3. Análisis de la variabilidad climática y la respuesta hidrológica del Lago de Cuitzeo mediante SPI y NDWI	104
Capítulo 6: Discusión de resultados	110
Conclusiones	118
Recomendaciones	120
Bibliografía	121

Índice de Figuras

Figura 1. Emisiones globales de GEI por sectores año 2019.....	16
Figura 2. Escalas temporales y espaciales de los principales fenómenos atmosféricos.....	28
Figura 3. Ubicación geográfica de la cuenca del Lago de Cuitzeo.	38
Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del Lago de Cuitzeo.	40
Figura 5. Uso de Suelo y Vegetación de la Cuenca del Lago de Cuitzeo año 2021.	44
Figura 6. Distribución de estaciones meteorológicas.	48
Figura 7. Variación anual de la temperatura máxima en la estación meteorológica de Pátzcuaro (1969–2015).	49
Figura 8. Estructura básica de un diagrama de caja (boxplot).....	50
Figura 9. Proyección del cambio en la temperatura media superficial terrestre a nivel global bajo diferentes escenarios de emisiones (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) para el periodo 1900–2100.	54
Figura 10. Ejemplo de la relación de la distribución gama y su transformación a desviación estándar.	56
Figura 11. Comparación entre una imagen satelital en color natural (a) y una imagen procesada mediante el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) (b), donde se resaltan los cuerpos de agua de la laguna San Antonio Atocha, municipio de Apan, Hidalgo, México.....	58
Figura 12. Esquema metodológico para el análisis de la variabilidad y cambio climático en la cuenca del Lago de Cuitzeo.	59
Figura 13. Ubicación geográfica y características del entorno de la estación Carrillo Puerto (16016).	63
Figura 14. Ubicación geográfica y entorno de la estación meteorológica de Huingo (16052).....	63
Figura 15. Ubicación geográfica de la estación meteorológica Morelia (16081).	64
Figura 16. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	65
Figura 17. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), Cuenca del Lago de Cuitzeo.	66

Figura 18. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), Cuenca del Lago de Cuitzeo.	67
Figura 19. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), Cuenca del Lago de Cuitzeo.	68
Figura 20. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), Cuenca del Lago de Cuitzeo. ...	69
Figura 21. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), Cuenca del Lago de Cuitzeo. ...	69
Figura 22. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), cuenca del Lago de Cuitzeo.	71
Figura 23. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), cuenca del Lago de Cuitzeo. ...	72
Figura 24. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), cuenca del Lago de Cuitzeo. ..	72
Figura 25. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), cuenca del Lago de Cuitzeo.	74
Figura 26. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), cuenca del Lago de Cuitzeo. ...	74
Figura 27. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), cuenca del Lago de Cuitzeo. ..	75
Figura 28. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011–2020).	77
Figura 29. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011–2020).	78
Figura 30. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011–2020).	79
Figura 31. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011–2020).	81

Figura 32. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	82
Figura 33. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	83
Figura 34. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	85
Figura 35. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	86
Figura 36. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	87
Figura 37. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	89
Figura 38. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	90
Figura 39. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).....	91
Figura 40. Evolución de la precipitación total diaria (PRCPTOT) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	93
Figura 41. Evolución de la intensidad máxima diaria de precipitación (R1MM) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	94
Figura 42. Evolución del número de días con precipitación intensa (≥ 10 mm) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	95
Figura 43. Evolución del número de días con precipitación muy intensa (≥ 20 mm) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	96
Figura 44. Evolución de la precipitación asociada a eventos muy húmedos (P95pTOT) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.	97
Figura 45. Evolución de la frecuencia de noches frías (TN10p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	98
Figura 46. Evolución de la frecuencia de noches cálidas (TN90p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	99
Figura 47. Evolución de la temperatura mínima extrema (TNn) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	100

Figura 48. Evolución de la temperatura mínima máxima (TNx) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	101
Figura 49. Evolución de la frecuencia de días fríos (TX10p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lao de Cuitzeo.	102
Figura 50. Evolución de la frecuencia de días cálidos (TX90p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.	103
Figura 51. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI-6) para el mes de octubre en el Lago de Cuitzeo (1948–2024).	105
Figura 52. Respuesta espacial del Lago de Cuitzeo año 2018 a partir del Índice NDWI.	107
Figura 53. Respuesta espacial del Lago de Cuitzeo año 2023 a partir del Índice NDWI.	108
Figura 54. Escenarios posibles al considerar tendencias de temperatura máxima y mínima,	113
Figura 55. Monitor de sequía de México año 2018.	116
Figura 56. Monitor de sequía de México año 2023.	117

Índice de Tablas

Tabla 1 Estudios internacionales sobre cambio climático y variabilidad climática	19
Tabla 2 Estudios nacionales sobre cambio climático y variabilidad climática.....	20
Tabla 3 Estudios sobre cambio climático y variabilidad climática en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	21
Tabla 4. Escalas de variabilidad climática y sus características generales.....	27
Tabla 5. Ámbitos del PNACC relacionados con el clima y los recursos hídricos aplicados a la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	34
Tabla 6. Indicadores climáticos de extremos utilizados para el análisis de precipitación.....	52
Tabla 7. Indicadores climáticos de extremos utilizados para el análisis de temperatura.....	53
Tabla 8. Clasificación de la sequía de acuerdo con valores de SPI.....	57
Tabla 9. Porcentajes de datos obtenidos para cada estación meteorológica a través de RStudio	60
Tabla 10. Estaciones meteorológicas con más del 80% de datos en precipitación, temperatura máxima y mínima.....	61
Tabla 11. Evaluación de la calidad y continuidad de los registros de las estaciones meteorológicas a través de Clicom.....	62
Tabla 1212. Resumen de tendencias observadas en los indicadores de cambio climático.....	104

Resumen

La presente investigación aborda la variabilidad y cambio climático en el periodo 1970-2050, en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. El objetivo es caracterizar el comportamiento del clima a nivel de cuenca y determinar la presencia de señales de cambio climático a escala regional. Así mismo, mediante el uso de índices climáticos analizar la respuesta del lago ante los eventos de precipitación, considerando que la lluvia constituye su principal fuente de aporte hídrico.

La metodología se estructuró en tres apartados en respuesta a los objetivos específicos. En primer lugar, se realizó la caracterización del clima en la cuenca a partir de datos observados de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, considerando variables como precipitación y temperatura máxima, media y mínima. Posteriormente, se identificaron posibles señales de cambio climático mediante indicadores de temperatura y precipitación derivados del conjunto de modelos CMIP5. Finalmente, se calculó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI-6) para el mes de octubre, representativo de la temporada de lluvias (mayo–octubre), y se empleó el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) para analizar, a partir de imágenes satelitales, la respuesta del Lago de Cuitzeo ante condiciones de sequía y humedad.

Los resultados muestran que la caracterización climática a nivel local presenta variaciones asociadas a la ubicación de las estaciones, así como a factores como el entorno, la presencia de vegetación, la cercanía al cuerpo de agua, el grado de urbanización y los cambios en el uso del suelo. A escala regional, los indicadores de cambio climático evidencian un incremento en la frecuencia de días y noches cálidas, así como una disminución de días y noches frías, lo que en conjunto refleja un proceso de calentamiento a escala regional. En cuanto a la precipitación, no se identifica una tendencia clara de aumento o disminución, sino una marcada variabilidad, consistente con los registros observados, lo que sugiere que los cambios se expresan principalmente a través de la variabilidad interanual y la ocurrencia de eventos extremos como las sequías o años atípicamente húmedos, más que en modificaciones sostenidas en los volúmenes totales.

A través del SPI se identificaron periodos húmedos y secos, destacando el periodo entre 1996 y 2015, dentro del cual los años 2003 y 2005 se clasifican como excepcionalmente secos. Estas condiciones pueden asociarse con impactos como la pérdida de cultivos, el incremento del riesgo de incendios, la disminución en la disponibilidad de agua en cuerpos de agua naturales y artificiales, así como escenarios de estrés hídrico en la región.

En síntesis, los resultados muestran que, más allá de ser una problemática de escala global, la variabilidad y cambio climático requieren ser analizados a nivel regional para comprender sus efectos específicos. En el caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, factores como el crecimiento urbano no planificado, la sobreexplotación del recurso hídrico particularmente para actividades agrícolas, la deforestación y el vertido de aguas residuales sin tratamiento contribuyen a acelerar el deterioro del sistema lacustre, el cual cumple funciones ecológicas fundamentales en la región. En este sentido, el estudio resalta la importancia de generar información a nivel de cuenca que contribuya a la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y en el diseño de estrategias de adaptación a la variabilidad y cambio climático.

Palabras clave: Variabilidad climática, cambio climático, precipitación, temperatura, lago de Cuitzeo.

Abstract

This research addresses climate variability and change in the Lake Cuitzeo Basin for the period 1970–2050. The objective is to characterize climate behavior at the basin level and determine the presence of climate change signals at a regional scale. Additionally, using climate indices, the study analyzes the lake's response to precipitation events, considering that rainfall is its primary source of water.

The methodology was structured in three sections to address the specific objectives. First, the climate in the basin was characterized by using observed data from meteorological stations of the National Meteorological Service, considering variables such as precipitation and maximum, average, and minimum temperatures. Subsequently, potential climate change signals were identified using temperature and precipitation indicators derived from the CMIP5 model suite. Finally, the Standardized Precipitation Index (SPI-6) was calculated for October, representative of the rainy season (May–October), and the Normalized Difference Water Index (NDWI) was used to analyze, based on satellite imagery, the response of Lake Cuitzeo to drought and wet conditions.

The results show that the local climate characterization exhibits variations associated with the location of the weather stations, as well as factors such as the surrounding environment, the presence of vegetation, proximity to the water body, the degree of urbanization, and changes in land use. At a regional scale, climate change indicators show an increase in the frequency of warm days and nights, as well as a decrease in cold days and nights, which together reflect a warming process at a regional scale. Regarding precipitation, no clear trend of increase or decrease was identified, but rather marked variability, consistent with observed records. This suggests that changes are primarily expressed through interannual variability and the occurrence of extreme events such as droughts or unusually wet years, rather than sustained modifications in total volumes.

Wet and dry periods were identified through the SPI, with the period between 1996 and 2015 standing out, within which the years 2003 and 2005 are classified as exceptionally dry. These conditions may be associated with impacts such as crop loss, increased risk of wildfires, decreased water availability in natural and artificial water bodies, and water stress scenarios in the region.

In summary, the results show that, beyond being a global issue, climate variability and change require analysis at the regional level to understand their specific effects. In the case of the Lake Cuitzeo Basin, factors such as unplanned urban growth, overexploitation of water resources, particularly for agricultural activities, deforestation, and the discharge of untreated wastewater contribute to accelerating the deterioration of the lake system, which performs fundamental ecological functions in the region. In this regard, the study highlights the importance of generating basin-level information to inform decision-making in water resource management and the design of adaptation strategies to climate variability and change.

Keywords: Climate variability, climate change, precipitation, temperature, Lake Cuitzeo.

Introducción

El comportamiento del sistema climático presenta una dinámica de cambio constante como consecuencia de factores de origen natural y antropogénico. A partir de ello, dos de los conceptos clave para el análisis de estos procesos son el cambio climático y la variabilidad climática. De acuerdo con el artículo 1 de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, el término cambio climático se refiere a las transformaciones del clima que tienen origen en actividades humanas y que inciden en la composición de la atmósfera, diferenciándose de las variaciones naturales que ocurren en el sistema climático (Díaz Cordero, 2012). Por otra parte, según el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (2001), la variabilidad climática corresponde a las fluctuaciones del clima respecto a sus condiciones promedio, las cuales pueden manifestarse en distintas escalas temporales y espaciales debido a procesos naturales internos o a forzamientos externos.

Dentro de los factores naturales del clima destacan las variaciones en la radiación solar y en la órbita terrestre. La actividad solar y los ciclos de Milankovitch alteran la distribución de la energía que recibe el planeta en escalas de miles a cientos de miles de años, procesos que han sido vinculados con las glaciaciones (Staines Urías, 2007).

La evidencia científica del calentamiento del sistema climático es inequívoca (IPCC, 2021). Desde finales del siglo XIX se ha observado un incremento sostenido de la temperatura global, asociado principalmente al aumento de gases de efecto invernadero generados por actividades humanas. Entre las principales evidencias del cambio climático destacan el calentamiento de los océanos, la reducción de glaciares y capas de hielo, el aumento del nivel del mar, la disminución de la cobertura de nieve y hielo marino, así como una mayor frecuencia de eventos extremos (NASA, 2024). En la Figura 1 se puede observar la distribución porcentual de emisiones globales de GEI.

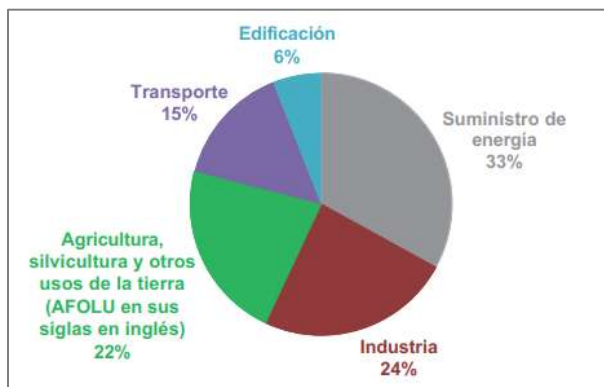


Figura 1. Emisiones globales de GEI por sectores año 2019.

Fuente: (OECC a partir del Informe del Grupo de Trabajo III del IPCC, 2022).

En América Latina y el Caribe, la dependencia de los recursos naturales y las desigualdades sociales incrementan la exposición y vulnerabilidad frente a eventos como sequías e inundaciones. A ello se suma la variabilidad climática asociada al fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), que modifica los patrones de precipitación y temperatura a escala regional. El Niño se caracteriza por anomalías positivas de la temperatura superficial del mar iguales o superiores a 0.5 °C durante varios meses consecutivos en la región denominada Niño 3 (Magaña Rueda, 1999).

Las condiciones fisiográficas y climáticas de la República Mexicana favorecen la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, cuyos impactos se concentran especialmente en regiones costeras y zonas con alta susceptibilidad a inundaciones y deslizamientos (Zamora Martínez, 2015). A escala estatal, Michoacán enfrenta manifestaciones específicas de esta dinámica a través de precipitaciones intensas y periodos prolongados de sequía. Bajo escenarios de cambio climático, se proyectan además posibles afectaciones en la franja costera asociadas al aumento del nivel del mar, con repercusiones en actividades productivas como la agricultura y el turismo (Herrera Toledo et al., 2010).

En este contexto la Cuenca del Lago de Cuitzeo no es ajena como otras regiones en el mundo ante los efectos combinados de la variabilidad y el cambio climático. La disminución considerable del recurso hídrico, el aumento de eventos hidrometeorológicos extremos y la alteración de ciclos naturales representan amenazas para su equilibrio ambiental y el desarrollo socioeconómico.

En este marco, la investigación analiza la variabilidad y el cambio climático en la cuenca del Lago de Cuitzeo considerando tanto el comportamiento histórico de la precipitación y la temperatura (1970–2020) como las proyecciones regionales para 2031–2050 bajo los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5. Así mismo, se identifican periodos secos y húmedos mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y se examina la dinámica espacio-temporal del lago a través del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

Capítulo 1

Fundamentos de la investigación

1.1. Antecedentes

Actualmente, el cambio climático es considerado un problema ambiental de gran relevancia a escala global debido a los impactos que puede generar en diversos componentes del sistema social y ambiental; entre ellos destacan los recursos hídricos, los ecosistemas, la biodiversidad, las actividades económicas, la infraestructura, así como la salud y el bienestar de la población, provocando importantes implicaciones para los procesos de desarrollo. Aunado a ello, la variabilidad climática se ha manifestado a través de sequías, inundaciones y otros eventos meteorológicos extremos que han ocasionado importantes impactos sociales, económicos y ambientales (IPCC, 2021).

a. Internacionales

A nivel internacional, diversos estudios han abordado el análisis de la variabilidad climática y sus efectos en los sistemas hidrológicos y en los ecosistemas circundantes (Tabla 1). En este contexto, se ha documentado que la temperatura media global ha aumentado aproximadamente 1 °C desde la era preindustrial, lo cual se ha asociado con una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, tales como sequías, inundaciones y olas de calor (IPCC, 2021). En América Latina también se han evidenciado cambios importantes en los patrones de temperatura y precipitación, así como procesos de pérdida acelerada de masa glaciar en varias regiones del continente representado entre el 20 % y 50 % de su masa de hielo (Magrin, 2015).

De manera específica, algunos trabajos desarrollados en cuencas hidrográficas y ecosistemas de América del Sur han utilizado índices climáticos, análisis de series temporales e información satelital para investigar la relación entre la variabilidad climática y, la dinámica y la respuesta ambiental. Estos estudios evidencian comportamientos irregulares en los patrones de precipitación, así como respuestas diferenciadas de los ecosistemas frente a fenómenos como El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) (Pérez Ortiz et al., 2022; Mejía et al., 2022; García Rengifo & Durán Ballén, 2022; Brendel, 2021; Armenta Porras, 2019).

Autor y año	Área de estudio	Objetivo	Metodología	Resultados relevantes
Mayra Alejandra Pérez Ortiz et al., 2022.	Cuenca del río Cali, Colombia	Analizar la influencia de la variabilidad climática en la precipitación.	Índice SPI (3, 6 y 12 meses), correlación con ENSO y análisis estadístico de tendencias.	Se identificó una marcada variabilidad interanual en la precipitación, con una relación directa entre los eventos de sequía y las fases de El Niño, mientras que durante los periodos de La Niña se registraron incrementos significativos en la precipitación.
Joel Francisco Mejía et al., 2022.	Microcuenca Miguaguó, Venezuela	Evaluar la influencia de la variabilidad climática en pantanos altoandinos.	Análisis de imágenes satelitales y aplicación del índice de estrés hídrico (MSI)	La respuesta hidrológica de los humedales depende de la intensidad de los eventos ENSO y de las condiciones biofísicas del entorno.
Christian García Rengifo y Sixto Durán Ballén, 2022.	Cuenca del río Chalpi Grande, Ecuador	Caracterizar la variabilidad climática a partir de registros históricos.	Análisis de series de temperatura, precipitación y caudal con corrección de datos faltantes	Se identificaron cambios en las tendencias climáticas posiblemente asociados a fenómenos atmosféricos y al cambio climático.
Andrea Soledad Brendel, 2021.	Cuenca del río Sauce Grande, Argentina	Analizar la relación entre variabilidad climática y vegetación.	Índices SPEI y NDVI, análisis de correlación y tendencias.	Se detectó una tendencia negativa en la humedad y en la cobertura vegetal durante el periodo 2000–2020.
Guillermo Eduardo Armenta Porras, 2020.	Cuenca del Lago de Tota, Colombia	Evaluar escenarios de variabilidad climática y cambio climático.	Datos meteorológicos y proyecciones climáticas NEX-GDDP de la NASA.	Se proyectan cambios significativos en la precipitación y temperatura que podrían generar impactos hidrológicos en la cuenca.

Tabla 1. Estudios internacionales sobre cambio climático y variabilidad climática.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

b. Nacionales

En México, varios estudios han analizado la variabilidad climática y sus efectos en la disponibilidad de agua (Tabla 2), la ocurrencia de sequías y el comportamiento de las precipitaciones en diversas cuencas del país a través del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). Algunas investigaciones demuestran una influencia importante del fenómeno de El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) en la ocurrencia de sequías meteorológicas y en la variabilidad de la precipitación, particularmente en regiones del norte de México (Cerano Paredes et al., 2020; Esquivel Arriaga et al., 2019). Por otra parte, también se han realizado estudios orientados a evaluar el impacto del cambio climático en cuencas hidrológicas de la región Huasteca mediante modelos hidrológicos y escenarios climáticos, los cuales indican posibles reducciones significativas en los caudales bajo escenarios futuros de emisiones (Dávila Ortiz et al., 2020).

De manera complementaria, investigaciones desarrolladas en los estados de Guanajuato y Veracruz han identificado variaciones espaciales en la temperatura y la precipitación relacionadas con factores topográficos como la altitud. De la misma manera, se han documentado cambios recientes en los patrones de lluvia y en la frecuencia de algunos eventos climáticos extremos como el incremento de días calurosos y disminución de días frescos, evidenciando tendencias hacia condiciones más cálidas, una mayor concentración de las lluvias en periodos más cortos y una

creciente irregularidad en la distribución de la precipitación (Martínez Arredondo et al., 2015; Torres Alavez et al., 2010).

Autor (año)	Área de estudio	Indicador o variable analizada	Metodología	Resultados relevantes
Julián Cerano Paredes et al., 2020.	Cuenca del río Yaqui, estado de Sonora.	SPI, ENSO	Análisis de series de precipitación de 28 estaciones y cálculo del SPI a 12 meses.	Se identificaron sequías meteorológicas significativas en 1980, 1988, 1999, 2006 y 2011, coincidentes con eventos secos registrados en otras regiones. Estos episodios mostraron una fuerte influencia del fenómeno de El Niño.
Gerardo Esquivel Arriaga et al., 2019.	Cuenca alta del río Nazas, estados de Durango y Coahuila.	SPI, ENSO	Análisis de sequías meteorológicas con series históricas de precipitación.	Las sequías más severas se registraron en las décadas de 1950 y 2000, con influencia significativa de ENSO.
Rodrigo Dávila Ortiz et al., 2020.	Cuencas de los ríos Gallinas y del río Valles, región Huasteca.	Caudales, escenarios RCP	Modelación hidrológica con escenarios climáticos de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5	Se proyectan reducciones significativas en los caudales futuros de ambos cuerpos de agua, con una mayor intensificación bajo el escenario RCP 8.5, lo que podría comprometer la disponibilidad de agua en la región.
Julio César Martínez Arredondo et al., 2015.	Cuenca del río Guanajuato.	Precipitación, temperatura	Análisis de climatología normal y distribución espacial de variables climáticas	La precipitación y la temperatura presentan variación espacial relacionada con la altitud, con más lluvias en las zonas altas y menos en las bajas. Así mismo la topografía y el cambio en el uso del suelo afectan la rapidez del escurrimiento del agua, aumentando la vulnerabilidad a la erosión y pérdida del agua potable.
José Abraham Torres Alavez et al., 2010.	Estado de Veracruz.	Índices de cambio climático	Análisis de índices climáticos ETCCDI y teleconexiones atmosféricas	Se identificaron condiciones más cálidas, caracterizadas por un aumento en la frecuencia de días calurosos y una disminución de los días frescos, así como una tendencia a la concentración de las lluvias en periodos más cortos.

Tabla 2. Estudios nacionales sobre cambio climático y variabilidad climática.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

c. Estatales – Regionales

En el estado de Michoacán se han documentado cambios en variables climáticas extremas, particularmente en la temperatura y en la intensidad de las precipitaciones (Tabla 3). A partir del análisis de registros meteorológicos de largo periodo, se han identificado incrementos en la temperatura máxima, lo que se ha traducido en una mayor frecuencia de días cálidos y en una mayor demanda del recurso hídrico para el desarrollo de actividades productivas y el consumo de la población. En contraste, los episodios de frío extremo han tendido a disminuir. De igual manera, en distintas estaciones del estado se ha observado un aumento en la intensidad de lluvias fuertes, lo que sugiere modificaciones en el comportamiento climático regional y posibles implicaciones para la disponibilidad del recurso hídrico (Herrera Toledo et al., 2010).

En el caso particular de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, diversos estudios han abordado los procesos de degradación ambiental y la dinámica hidrológica del sistema lacustre. Algunas investigaciones señalan que factores como el crecimiento urbano, los cambios en el uso del suelo y el incremento

en la demanda de agua han contribuido al deterioro ambiental de la cuenca (López Granados et al., 2002; Mendoza, 2002). De manera más reciente, el análisis de registros climáticos e imágenes satelitales ha permitido evaluar la dinámica del lago y su relación con las condiciones climáticas regionales. Estos trabajos han identificado fluctuaciones importantes en la superficie del lago, tendencias de incremento en la temperatura máxima y la posible intensificación de eventos de sequía en el futuro (Jiménez Ángeles et al., 2025; Rodríguez-Gómez et al., 2025; Hernández Santoyo et al., 2024; Sánchez Quispe et al., 2014; Carlón Allende et al., 2007).

Autor (año)	Área de estudio	Objetivo	Metodología	Resultados relevantes
Arantxa Jiménez Ángeles et al., 2025.	Lago de Cuitzeo, Michoacán	Analizar las variaciones en la superficie del lago entre 1997 y 2021.	Interpretación de imágenes satelitales y análisis de datos de precipitación del SMN.	Se identificaron periodos secos asociados a una reducción importante del espejo de agua, con una superficie mínima de 75.8 km ² en 2021 y máxima de 306 km ² en 1999.
Rodríguez-Gómez, et al., 2025.	Lago de Cuitzeo	Analizar los cambios en la superficie del lago y su relación con variables climáticas.	Análisis multitemporal de imágenes Landsat y cálculo del índice NDWI, junto con datos de precipitación y temperatura.	Se observaron variaciones importantes en la superficie del lago asociadas principalmente a cambios en la precipitación y a periodos secos en la región.
Agustín Hernández Santoyo et al., 2024.	Cuenca de Cuitzeo	Evaluar los efectos del cambio climático en la agricultura de la región.	Análisis de registros de 25 estaciones meteorológicas con series de al menos 25 años.	Se detectó una tendencia creciente en la temperatura máxima en la mayoría de las estaciones y una distribución heterogénea de la precipitación.
Sonia Tatiana Sánchez Quispe et al., 2014.	Cuenca del Lago de Cuitzeo	Evaluar sequías meteorológicas e hidrológicas bajo escenarios de cambio climático.	Generación de escenarios climáticos y análisis de índices de sequía.	Se proyectan sequías más intensas y prolongadas hacia finales del siglo XXI, con duraciones de hasta ocho años y contrastes hidrológicos dentro de la cuenca, con aumentos de escurrimiento en algunas zonas y disminuciones en otras, especialmente en el norte.
Teodoro Carlón Allende y Manuel Mendoza, 2007.	Cuenca del Lago de Cuitzeo	Analizar la relación entre el clima y el régimen hidrológico de la cuenca.	Análisis de series históricas de precipitación, temperatura y escurrimiento	Se identificaron variaciones temporales en precipitación y escurrimiento que reflejan la influencia de la variabilidad climática en la dinámica hidrológica de la cuenca.

Tabla 3. Estudios sobre cambio climático y variabilidad climática en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente: Elaboración propia, 2025.

En conjunto, los antecedentes revisados muestran que, tanto a nivel internacional como nacional y estatal-regional, la temperatura presenta tendencias más claras hacia condiciones más cálidas, mientras que la precipitación mantiene un comportamiento más variable y heterogéneo. Además, varios estudios coinciden en la influencia de fenómenos como ENSO sobre la ocurrencia de sequías y las variaciones en la disponibilidad hídrica. En la Cuenca del Lago de Cuitzeo, estas dinámicas también se reflejan en las fluctuaciones de la superficie del lago, la variabilidad de la precipitación y las tendencias de incremento térmico observadas en distintos sectores de la cuenca.

1.2. Justificación

La Cuenca del Lago de Cuitzeo, ubicada en el estado de Michoacán, México, es una región de gran relevancia ambiental, económica y social. Este cuerpo de agua, el segundo lago más grande del país, constituye un ecosistema de importancia crítica, no solo por su diversidad biológica, sino también por las funciones ecológicas y los beneficios ambientales que aporta a los ecosistemas y a las comunidades de la región. Sin embargo, en las últimas décadas, la cuenca ha experimentado una serie de cambios adversos, aparentemente vinculados a la variabilidad climática y al cambio climático (Bocco et al., 2012).

A nivel regional, la cuenca ocupa un lugar estratégico dentro de los sistemas hidrológicos; por ello, los cambios en su ecosistema han generado consecuencias negativas en el abastecimiento de agua, la producción agrícola y en las condiciones sociales de las comunidades que dependen del lago. Estas poblaciones se han beneficiado históricamente de los servicios ecosistémicos que ofrece, como la pesca, el turismo, la regulación natural del clima, entre otros. Sin embargo, estos problemas se han intensificado debido a la construcción de infraestructuras viales que atraviesan el cuerpo de agua, el crecimiento urbano no planificado, la sobreexplotación del recurso hídrico y la pérdida de cobertura vegetal asociada a procesos de deforestación.

Mencionado lo anterior, la presente investigación se justifica por la necesidad de comprender con mayor detalle cómo la variabilidad climática y el cambio climático están afectando a la cuenca del Lago de Cuitzeo. Comprender estos procesos es fundamental para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación que puedan implementarse a nivel local y regional.

Finalmente, los resultados de este trabajo buscan aportar información útil para orientar la toma de decisiones por parte de autoridades ambientales, organismos de cuenca, gobiernos locales y comunidades. Al vincular el conocimiento científico con las necesidades del territorio, se espera contribuir al fortalecimiento de estrategias de adaptación y mitigación que favorezcan la sostenibilidad en la región.

En este contexto, es necesario profundizar en el análisis de la variabilidad climática y las posibles señales de cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, considerando la importancia ambiental, social y económica que este sistema representa para la región. Analizar la evolución histórica de variables como la precipitación y la temperatura, así como identificar periodos secos y húmedos; y examinar la dinámica del lago, permitirá comprender mejor los cambios recientes del sistema lacustre y sus posibles implicaciones a futuro.

1.3. Preguntas de investigación

a. Pregunta general

¿Cómo se manifiestan la variabilidad climática en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, para el periodo 1970–2050?

b. Preguntas específicas

1. ¿Cuál es el comportamiento de la precipitación y la temperatura del clima observado?
2. ¿Cuáles son las señales de cambio climático proyectadas a nivel regional en la Cuenca del Lago de Cuitzeo?
3. ¿Cuál es la dinámica hidrológica del Lago de Cuitzeo por efecto de la variabilidad climática?

1.4. Hipótesis

a. Hipótesis general

La variabilidad climática observada y proyectada en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, durante el periodo 1970–2050, presenta cambios significativos en los patrones de precipitación y temperatura, asociados al cambio climático.

b. Hipótesis específicas

1. Durante el periodo 1970–2020, las variables de precipitación y temperatura observadas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo presentan cambios significativos.
2. Durante el periodo 2031–2050, los indicadores de precipitación y temperatura a nivel regional en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, estiman señales de cambio climático bajo los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5.
3. El Lago de Cuitzeo presenta procesos de desecación y recuperación asociados a la variabilidad climática.

1.5. Objetivos

a. Objetivo general

Caracterizar la variabilidad climática y el cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, a partir del análisis de las variables de precipitación y temperatura en el periodo 1970–2050.

b. Objetivos específicos

1. Analizar el comportamiento climático de la precipitación y la temperatura usando registros de estaciones meteorológicas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo para el periodo 1970–2020.

2. Identificar las señales de cambio climático a nivel regional usando indicadores de precipitación y temperatura obtenidos mediante la herramienta Climate Explorer del KNMI, bajo los escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5 para el periodo 2031–2050.
3. Determinar los periodos secos y húmedos mediante el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y la respuesta espacio-temporal del Lago de Cuitzeo ante la variabilidad climática, a través del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).

Capítulo 2

Marco teórico de la investigación

2.1. Tiempo y clima

La Sociedad Meteorológica de los Estados Unidos de América describe el tiempo meteorológico como el estado actual de la atmósfera y la manera en que éste influye en las actividades que las personas realizan en su vida cotidiana. Además, el tiempo suele caracterizarse mediante variables como la temperatura, precipitación, humedad, nubosidad y viento (Torres Puente, 2019).

Por otra parte, Vernor (1955: Romero Contreras et al., 2001), plantea que el tiempo atmosférico es el conjunto de condiciones que se presentan en la atmósfera en un lugar determinado durante un periodo corto; es decir describe lo que está ocurriendo en ese momento. El tiempo se manifiesta desde unos minutos hasta unas cuatro semanas, periodo en el que, por ejemplo, puede ocurrir una tormenta o desarrollarse un ciclón tropical.

Entonces se entiende que el tiempo representa una condición atmosférica de corto plazo, la cual influye de manera directa en el desarrollo de actividades cotidianas de las personas, tales como la agricultura, pesca, transporte, salud, recreación. Debido a su variabilidad, las fluctuaciones en el tiempo pueden alterar las condiciones del entorno de manera inmediata. Junto con su monitoreo continuo, estas variaciones ofrecen la información esencial para analizar el comportamiento climático de una región.

A partir de lo expuesto, puede afirmarse que el tiempo atmosférico constituye la base de los registros meteorológicos de variables como: temperatura, precipitación, evaporación, humedad, viento. Cuando esta información se analiza en conjunto en un periodo determinado, es posible identificar los promedios y las tendencias que permiten definir el tipo de clima que presenta una región. Conocer cómo se comporta el tiempo resulta esencial para comprender los procesos climáticos y sus efectos en el territorio, especialmente en áreas como la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde la altitud, el relieve y la disponibilidad de humedad influyen directamente en las condiciones meteorológicas del día a día.

Por su parte, el clima hace referencia a las variaciones del sistema atmósfera-hidrosfera que se presentan durante periodos largos de tiempo. En términos generales, se entiende como el comportamiento medio del tiempo durante lapsos suficientemente largos como para identificar

patrones y tendencias (Torres Puente, 2019). La Organización Meteorológica Mundial (OMM) sugiere utilizar registros con un mínimo de 30 años para describir las condiciones promedio.

Etimológicamente, la palabra *clima* proviene del griego *klino*, que significa “inclinación”. Este término hace referencia al ángulo con el que los rayos del sol llegan a la superficie terrestre a lo largo del año. A partir de esta observación, los antiguos griegos comprendieron que las variaciones en dicha inclinación influían en la diversidad de condiciones atmosféricas presentes en cada región (Romero Contreras et al., 2001).

De acuerdo con Romero Contreras et al. (2001), el clima se entiende a través de análisis estadísticos de variables atmosféricas como la precipitación, la temperatura, la presión y la humedad. Estos análisis se realizan en un área específica de la superficie terrestre y consideran un periodo lo suficientemente largo como para identificar tanto el comportamiento promedio de estas variables como sus valores extremos, tanto máximos como mínimos.

A diferencia del tiempo, el clima se analiza en periodos prolongados y permite identificar patrones, tendencias y cambios en variables como la temperatura y precipitación. Comprender su definición resulta fundamental ya que permite distinguir entre las fluctuaciones naturales del sistema climático y las transformaciones persistentes derivadas de la actividad humana.

Una vez aclarados los conceptos de tiempo y clima, es posible avanzar hacia la comprensión de la variabilidad climática, sus distintos tipos y la forma en que influye en el funcionamiento del sistema climático.

2.2. Variabilidad climática: definición y escalas

Bernex (2006: Ortiz Arenas et al., 2017) señala que la variabilidad climática ayuda a comprender las causas de los eventos extremos como sequías o lluvias intensas, así como interpretar la respuesta del sistema natural ante la presión ocasionada por la industrialización y las actividades humanas. Esta variabilidad proviene tanto de procesos naturales como: El Fenómeno de El Niño, Oscilación Decadal del Pacífico y antropogénicos como las emisiones de gases de efecto invernadero, deforestación, cambio en el uso del suelo, sobreexplotación, etc.

Por otra parte, Montealegre (2000), señala que la variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones naturales que ocurren en el clima dentro de ciclos relativamente cortos. Estas variaciones se manifiestan en valores que pueden ser superiores o inferiores a lo que se considera normal. Para

determinar esta normal, se utilizan promedios basados en registros climáticos continuos de largo periodo.

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), variables climatológicas como la precipitación, temperatura pueden experimentar variaciones a lo largo del tiempo, resultando en valores superiores o inferiores a lo que se considera "normal". Estos cambios reflejan la variabilidad natural del sistema climático, lo cual, en términos de la superficie terrestre, se traduce en días más lluviosos o más cálidos en comparación con el promedio esperado. Para analizar esta variabilidad natural del clima, se emplean las normales climatológicas, que son promedios calculados a partir de registros diarios de datos observados durante un período mínimo de 30 años, tal como recomienda la OMM.

Así mismo, esta variabilidad climática se presenta en diferentes escalas de tiempo y espacio, considerando a continuación las más relevantes para la determinación y regulación de los procesos de la atmósfera.

Escalas de variabilidad	Tiempo característico	Espacio donde se manifiesta	Ejemplos representativos
Estacional	Meses; corresponde al ciclo anual.	Latitudes medias y regiones tropicales.	En zonas tropicales, alternancia entre temporada seca y lluviosa; en latitudes medias, estaciones de invierno, primavera, verano y otoño.
Intraestacional	30 a 60 días; fluctuaciones dentro de una misma estación.	Principalmente en áreas tropicales.	Ondas de Madden–Julian que modifican la convección y la precipitación; periodos cortos de pausa seca dentro de la temporada de lluvias (“veranillo”).
Interanual	Años; cambios de un año a otro.	Regional y global.	Episodios de El Niño y La Niña que generan años más secos o más húmedos; variaciones anuales en la intensidad de la temporada de lluvias.
Interdecadal	Décadas; oscilaciones de largo plazo	Cuencas oceánicas y continentes	Oscilación Decadal del Pacífico, asociada a periodos prolongados de sequía o de mayor humedad.

Tabla 4. Escalas de variabilidad climática y sus características generales.

Fuente. Elaboración propia con base en Montealegre (2000).

Las diferentes escalas de variabilidad climática descritas en la Tabla 4 permiten distinguir cómo los procesos atmosféricos cambian desde fluctuaciones de corto plazo, vinculadas al tiempo meteorológico, hasta oscilaciones de varios años o incluso décadas que influyen de manera directa en la dinámica del clima.

Como complemento, en la Figura 2, se visualizan estas escalas y los fenómenos atmosféricos asociados a cada una de ellas. Esta clasificación es muy importante para la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde los diferentes tipos de escalas explican en gran medida la variabilidad en la precipitación y temperatura, así como periodos prolongados de humedad o sequías que afectan la disponibilidad hídrica del lago.

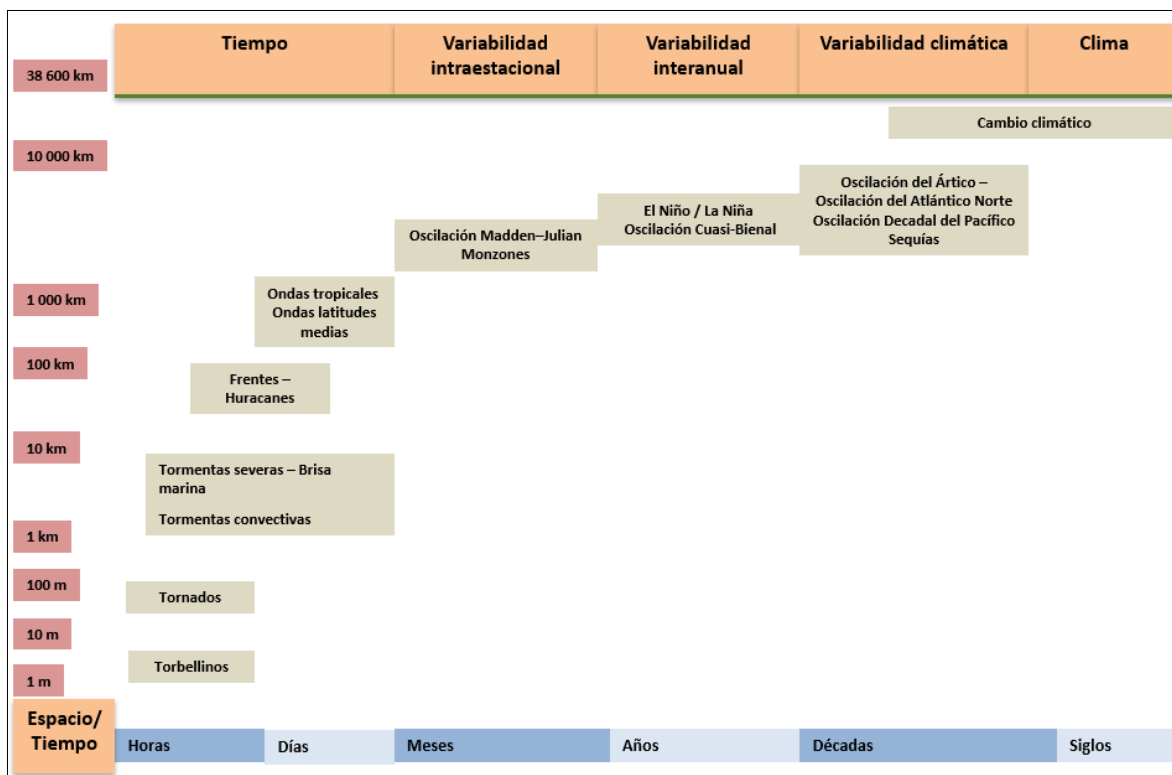


Figura 2. Escalas temporales y espaciales de los principales fenómenos atmosféricos.

Fuente. Elaboración propia con en base en “Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático”, por V. M. Torres Puente, 2019, *Revista Digital Universitaria*, 20(1).

Con las definiciones de tiempo, clima y variabilidad climática establecidas, es posible avanzar hacia la comprensión del cambio climático.

2.3. Cambio climático

A lo largo de la historia, el clima ha mostrado variaciones continuas, lo cual lo podemos observar en las diferentes eras geológicas. Estas variaciones forman parte del comportamiento natural del clima. No obstante, el cambio climático que se observa en la actualidad no responde a causas naturales. De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), el aumento reciente de las temperaturas está principalmente relacionado con las acciones humanas, respaldado por un alto nivel de evidencia científica. La principal causa de este

cambio es el uso de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, que libera grandes cantidades de dióxido de carbono. Al aumentar su concentración, el calor se queda por más tiempo en la atmósfera, lo que contribuye al calentamiento del planeta (Rodríguez Becerra & Mance, 2009).

La Convención Marco de las Naciones Unidas (1992) sobre el Cambio Climático establece que el cambio climático corresponde a modificaciones en el clima derivadas de actividades humanas. Estas pueden presentarse de forma directa, como ocurre con las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la quema de combustibles fósiles, la agricultura intensiva o el uso excesivo de recursos; o de manera indirecta, a través de cambios en el uso del suelo, la pérdida de ecosistemas o el crecimiento urbano no planificado. Estos factores modifican la composición atmosférica y contribuyen a la variabilidad natural del clima, la cual se manifiesta a lo largo del tiempo.

El cambio climático se refiere a variaciones en el estado del clima que pueden identificarse mediante análisis estadísticos; es decir, no cualquier fluctuación implica un cambio climático. Para que un cambio sea reconocido como tal, debe ser medible y verificable, y reflejar alteraciones en los valores promedio o en la variabilidad de distintas variables climáticas. Esto significa que no solo se trata de un aumento en la temperatura o una disminución en la precipitación, sino de modificaciones más amplias en los patrones climáticos que se mantienen durante largos periodos, generalmente décadas o incluso más. Con la evidencia disponible, el IPCC señala que el cambio climático actual está principalmente asociado a actividades antropogénicas (IPCC, 2013).

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015, el Objetivo 13 hace énfasis en la necesidad de adoptar medidas urgentes para enfrentar el cambio climático y sus impactos. Este objetivo reconoce que no todos los países cuentan con la misma capacidad para responder a sus efectos, lo que provoca que las naciones con mayores niveles de pobreza, aunque son las que menos contribuyen a las emisiones globales sean también las más vulnerables. Si bien, el cambio climático es un fenómeno de escala global, sus efectos no se presentan uniformemente en el territorio, si no que varían de acuerdo a las condiciones sociales, económicas y ambientales de cada región (CEPAL, 2019).

Marco Institucional

En 1988, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) fundaron el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con el objetivo de ofrecer información científica confiable, imparcial y evaluada por expertos para apoyar las decisiones gubernamentales. En su primer informe, publicado en 1990, el IPCC validó la evidencia científica sobre el cambio climático, lo que motivó a la Asamblea General de la ONU a promover la creación de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992.

El cambio climático ha adquirido un papel fundamental en las agendas de los países debido a sus repercusiones económicas y socioambientales. Esta relevancia llevó a que, en mayo de 1992, en Nueva York, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático incorporara formalmente el término y estableciera una definición que orienta la acción internacional frente a este fenómeno. Este tratado marcó el inicio del marco legal y político que posteriormente dio lugar al Protocolo de Kioto (1997) y al Acuerdo de París (2015) (Naciones Unidas, 1992).

Según Naciones Unidas (1997), el Protocolo de Kioto fue el primer acuerdo internacional que estableció metas obligatorias de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) para los países desarrollados. En contraste, los países en desarrollo como China en aquel momento no estaban sujetos a estos compromisos. Su primera fase planteó la reducción colectiva de las emisiones en un 5 % por debajo de los niveles de 1990. Además, el Protocolo creó mecanismos de flexibilidad para facilitar el cumplimiento de estas metas, los cuales dieron origen a lo que hoy se conoce como el mercado de carbono.

Después, en 2015, se adoptó el Acuerdo de París, cuyo objetivo principal fue limitar el aumento de la temperatura global a menos de 2 °C, y, si es posible, reducirlo a 1.5 °C. A diferencia de acuerdos anteriores, aquí participan todos los países. El Acuerdo también establece que los países desarrollados deben proporcionar apoyo económico a las naciones en desarrollo para ayudarlas a afrontar los impactos del cambio climático. Cada país tiene que presentar sus propios planes para reducir emisiones y adaptarse, y estos compromisos deben revisarse y actualizarse cada cinco años para ir aumentando su ambición (Naciones Unidas, 2015).

Adaptar los conceptos de cambio climático al contexto local es clave para identificar riesgos y patrones específicos. En el caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, este análisis resulta crucial debido

a su relevancia social, económica y ambiental. Dado que la cuenca depende en gran medida de las precipitaciones y los escurrimientos superficiales, es indispensable caracterizar tanto la variabilidad como el cambio climático. Esto permitirá comprender mejor la exposición y vulnerabilidad de la población y los ecosistemas ante los cambios en el clima, un aspecto que se aborda a través del concepto de vulnerabilidad.

2.4. Vulnerabilidad al cambio climático

Según Ruiz Rivera (2011), la vulnerabilidad se relaciona siempre con algún tipo de amenaza, sean eventos de origen físico o naturales como sequías, terremotos, inundaciones, huracanes, ciclones; o amenazas originadas por el ser humano como contaminación, accidentes, hambrunas o pérdida de empleo. Por su parte, Caram Pérez (2006: Reyes Rivero et al., 2017) plantea que la vulnerabilidad está estrechamente relacionada con las condiciones en las que vive una población como su nivel socioeconómico, el acceso a servicios básicos, la calidad de la vivienda o la atención en salud, así como con las capacidades que posee para responder ante un fenómeno inesperado, entre ellas sus conocimientos, educación, recursos disponibles y acceso a tecnología.

El Tercer Informe del IPCC señala que un sistema es vulnerable cuando puede verse afectado o no tiene la capacidad necesaria para hacer frente a los impactos del cambio climático, incluidos tanto la variabilidad climática como los eventos extremos. Esta vulnerabilidad está determinada por la naturaleza y el ritmo de los cambios en el clima, el grado de exposición del sistema, su sensibilidad y la capacidad que tiene para adaptarse.

Estas definiciones coinciden en que la vulnerabilidad no solo depende de la presencia de una amenaza, ya sea de origen natural o antropogénico, sino que, más allá de ello, hace hincapié en la capacidad de respuesta de la sociedad, la naturaleza y los distintos componentes que conforman el medio ambiente. Por esta razón, al analizarla en el contexto del cambio climático, la vulnerabilidad adquiere una importancia especial, pues este fenómeno combina procesos naturales y sociales que interactúan y se manifiestan a lo largo del tiempo.

En este contexto, la vulnerabilidad al cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo es el resultado de la interacción entre procesos naturales, antrópicos y sociales. Por un lado, las variaciones en la precipitación, la temperatura y la evaporación modifican la dinámica del sistema lacustre; por otro, las actividades humanas intensifican los efectos de estos cambios mediante la sobreexplotación del recurso hídrico, la deforestación en las zonas altas de la cuenca, el vertido de aguas residuales sin tratamiento especialmente por el principal aportador del Lago de Cuitzeo el Río

Grande de Morelia, y las transformaciones del uso del suelo que alteran el paisaje y degradan los ecosistemas.

Según el *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático* de España 2021-2030, los impactos reales y potenciales del cambio climático no se distribuyen de manera uniforme en el territorio, ya que dependen de factores geográficos, económicos, sociales y demográficos. El PNACC señala que los estudios de vulnerabilidad deben incorporar una perspectiva territorial que permita identificar los espacios más expuestos al riesgo, ya sea por su localización física, por su dependencia de sectores económicos sensibles o por el progresivo despoblamiento de las zonas rurales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).

En este mismo sentido el PNACC, enfatiza la vulnerabilidad de carácter social, directamente vinculada con variables sociodemográficas como la edad, el género, el nivel educativo, los ingresos, la dinámica poblacional y las condiciones laborales. Estos factores afectan directamente la capacidad de la población para enfrentar los impactos del cambio climático. Identificar a los grupos más vulnerables y su ubicación geográfica permite orientar las acciones de adaptación hacia la reducción efectiva de las desigualdades, estableciendo medidas específicas para cada contexto.

En la Cuenca del Lago de Cuitzeo los enfoques social y territorial se entrelazan de manera clara. Las desigualdades económicas, educativas, la pérdida de población rural y la dependencia de actividades agrícolas y pesqueras, se combinan con la degradación ambiental, la deforestación y la presión sobre el recurso hídrico. Esto provoca que los efectos del cambio climático impacten con mayor intensidad en los sectores más vulnerables y en las áreas ecológicamente frágiles. Por ende, reconocer la importancia de la vulnerabilidad social y territorial es fundamental para impulsar estrategias de adaptación que fortalezcan la capacidad del territorio para responder al cambio climático y mantener el equilibrio ecológico y social de la cuenca.

Una vez abordado el concepto de vulnerabilidad, pasamos a la siguiente definición: la capacidad de adaptación al cambio climático.

2.5. Capacidad de adaptación al cambio climático

Según el IPCC (2018), la adaptación en la población implica el proceso de hacer ajustes para enfrentar el clima o las condiciones climáticas proyectadas para el futuro. Este proceso busca reducir los efectos negativos del cambio climático y, cuando es posible, aprovechar las oportunidades que puedan surgir a partir de estas nuevas condiciones.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2024), define la adaptación al cambio climático como el conjunto de acciones orientadas a reducir la vulnerabilidad frente a los impactos actuales o previstos del cambio climático, entre ellos los fenómenos meteorológicos extremos, los desastres naturales, el aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad y la inseguridad alimentaria e hídrica.

La adaptación al cambio climático puede entenderse como un proceso en el que interactúan el ser humano y el medio ambiente, realizando ajustes frente a las condiciones climáticas actuales o esperadas. Su propósito es disminuir los posibles daños y, al mismo tiempo, aprovechar los efectos positivos que puedan derivarse de dichos cambios. La adaptación implica la implementación de medidas que contribuyan a reducir la vulnerabilidad ante los riesgos asociados al cambio climático, como los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, el incremento del nivel del mar, la pérdida de flora y fauna, el estrés hídrico y la inseguridad alimentaria.

Durante los últimos años, se han logrado avances significativos en la adaptación al cambio climático, tanto en el desarrollo de estrategias como su puesta en práctica. Sin embargo, persisten carencias relevantes. La planificación de la adaptación ha generado beneficios en distintos sectores y regiones, pero con frecuencia se enfoca en reducir riesgos a corto plazo, lo que limita la posibilidad de alcanzar una adaptación transformadora. La mayoría de las acciones se han orientado a mitigar los efectos de sequías e inundaciones pluviales, fluviales y costeras. Aun así, persisten límites físicos, económicos y sociales que dificultan una adaptación verdaderamente efectiva. Aunque las políticas climáticas han ampliado su alcance y ambición, todavía existen brechas de conocimiento, de financiamiento y de seguimiento, además de una distribución desigual de los avances entre sectores y regiones (IPCC, 2022).

Es de gran importancia impulsar la adaptación al cambio climático, puesto que es un problema que progresa a un ritmo acelerado cuyos efectos ya son evidentes en todo el planeta. Según el PNUD (2024), varios estudios científicos indican que la temperatura media global se ha incrementado 1.1 °C en relación con los valores del siglo XIX. Aunado a ello, se proyecta que, sin medidas serias de mitigación, el aumento podría llegar a estar entre los 2.5 °C y 2.9 °C para finales del siglo XXI, superando los límites considerados por la comunidad científica.

España se encuentra entre los países de la Unión Europea que han tomado la delantera en temas de adaptación al cambio climático. A través del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, ha desarrollado el *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) 2021-*

2030, cuyo objetivo principal es prevenir o reducir los daños presentes y futuros asociados al cambio climático, y avanzar hacia una sociedad y una economía más resilientes. Este plan se ha consolidado como el principal instrumento que guía las políticas públicas de adaptación en España, promoviendo una acción conjunta entre distintos sectores y niveles de gobierno.

En este contexto el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) constituye un referente importante, ya que articula sus acciones en diecinueve ámbitos de trabajo. Para esta investigación se consideran únicamente aquellos relacionados con el clima (Tabla 5), los escenarios climáticos y los recursos hídricos, por su estrecha vinculación con los objetivos de la investigación.

Objetivos	Estrategias	Aplicación para la Cuenca del Lago de Cuitzeo (CLC)
Cambio y escenarios climáticos		
-Consolidar y ampliar el conocimiento sobre la variabilidad y el cambio climático. -Facilitar el acceso a la información climática garantizando la disponibilidad. -Integrar los escenarios climáticos en los diferentes procesos de planificación. -Promover la cooperación interinstitucional, es decir entre los diferentes niveles de gobierno, instituciones educativas, investigadores, etc.	-Actualización de los escenarios climáticos por regiones. -Observación y seguimiento del clima. -Mejorar las plataformas digitales que permitan acceder a los usuarios a proyecciones climáticas. - Definir un conjunto homogéneo de indicadores que permitan evaluar la evolución del cambio climático. - Incluir la información de escenarios en los instrumentos de planificación. -Fomentar la investigación aplicada.	En la Cuenca del Lago de Cuitzeo, estas acciones se reflejan en la necesidad de contar con información climática actualizada y de calidad que permita analizar la variabilidad y el cambio climático. Este estudio busca aportar conocimiento local sobre temperatura máxima, media y mínima, así como sobre la precipitación, identificando tendencias y escenarios futuros (2020–2050). Dicha información es esencial para la gestión del agua, la planificación territorial y el diseño de estrategias de adaptación frente a esta problemática.
Agua y recursos hídricos		
-Asegurar la disponibilidad hídrica aún frente a escenarios de cambio climático. -Mejorar la gestión del ciclo del agua. -Proteger la calidad del agua y por ende los ecosistemas acuáticos, ante riesgos de sequías y contaminación. - Integrar la adaptación en los instrumentos de planificación del agua, como los planes hidrológicos de cuenca, así como en los sistemas de gobernanza y toma de decisiones.	-Incorporar la información climática y los escenarios futuros en los instrumentos de planificación y gestión del agua. - Promover el uso eficiente del agua y la reutilización de fuentes alternativas. -Anticipar los efectos de la sequía mediante planes preventivos y sistemas de alerta temprana. -Atender el riesgo de inundaciones mediante soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de humedales y riberas. -Fortalecer el monitoreo y los indicadores para evaluar los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos.	Las estrategias del PNACC pueden aplicarse en la Cuenca del Lago de Cuitzeo para fortalecer la gestión y el uso sostenible del agua ante escenarios de mayor variabilidad climática. Integrar la información climática en la planificación hidrológica contribuiría a orientar decisiones más acertadas sobre el manejo del recurso. También resulta fundamental promover la eficiencia en el uso del agua, proteger los acuíferos y fortalecer los sistemas de monitoreo para anticipar los efectos de sequías e inundaciones.

Tabla 5. Ámbitos del PNACC relacionados con el clima y los recursos hídricos aplicados a la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el PNACC de España 2020.

He considerado hacer un énfasis especial en el sector agrícola, ya que en la Cuenca del Lago de Cuitzeo esta actividad representa una de las principales fuentes productivas y demanda una gran cantidad de agua. Como señalan Sandoval y Diaz (2016), el reto de la adaptación en las cuencas agrícolas radica en comprender la magnitud de los cambios en los caudales en un punto específico de la cuenca, así como la variación en la temporalidad de estos. Es necesario evaluar los impactos,

tanto económicos como en otras áreas de la producción, y analizar los costos y beneficios de las distintas estrategias de adaptación. Esto debe realizarse con el fin de alcanzar los objetivos tanto a corto como a largo plazo, minimizando al máximo la incertidumbre, lo que facilitará la toma de decisiones para cumplir con dichos objetivos.

En resumen, la adaptación debería considerarse como una respuesta esencial frente al cambio climático, ya que permite reducir los riesgos y mejorar la capacidad de respuesta ante sus impactos. Su aplicación demanda integrar el conocimiento climático en la toma de decisiones y en la gestión del territorio. Desde esta perspectiva, la resiliencia representa el siguiente paso hacia comunidades más preparadas y capaces de recuperarse frente a los cambios del clima.

2.6. Resiliencia al cambio climático

Según el IPCC (2018), la resiliencia es la capacidad que tienen los ecosistemas para sobrellevar un evento, perturbación o suceso respondiendo o reorganizándose de manera que se conserve su función fundamental, identidad y estructura mientras mantiene su capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

Folke (2016), plantea que la resiliencia es la capacidad de persistir ante el cambio, de seguir desarrollándose en entornos en constante transformación. El pensamiento sobre la resiliencia se centra en cómo los periodos de cambios graduales interactúan con los cambios abruptos, y en la capacidad de las personas, las comunidades, las sociedades y las culturas para adaptarse o incluso transformarse hacia nuevas vías de desarrollo ante el cambio dinámico.

En un estudio realizado por Altieri et al. (2014: Santiago Vera et al., 2018), define a la resiliencia como la habilidad de un sistema para soportar y recuperarse de perturbaciones, especialmente las relacionadas con cambios climáticos. En este sentido, el concepto de resiliencia social se enfoca en la habilidad de las comunidades para mantener su cohesión y estructura frente a situaciones externas que puedan amenazarla.

Según Morecroft et al. (2012: Santiago Vera et al., 2018), la resiliencia tiene al menos tres formas de manifestarse reconocidas por varios autores; en primer lugar, como la capacidad de reaccionar eficientemente a un evento dado. En una segunda acepción también se acepta como la capacidad de recuperarse rápido del evento y en una tercera acepción se asume como resiliencia, y mantener las funciones vitales o estructurales a pesar de estar ante un evento.

Es importante distinguir las definiciones de adaptación y resiliencia, ya que, aunque están relacionadas, cada una tiene un alcance distinto. La adaptación se entiende como un proceso en el que se adoptan medidas para disminuir la vulnerabilidad y prepararse frente a cambios climáticos presentes o futuros. La resiliencia, en cambio, alude a la capacidad de un sistema para resistir, recuperarse o transformarse ante una perturbación sin perder sus funciones esenciales.

En este contexto, la resiliencia se entiende como un proceso que integra dimensiones ecológicas, sociales, políticas e institucionales. No constituye un atributo fijo del territorio, sino el resultado de la interacción entre sus recursos, su economía y su población frente al cambio climático y la variabilidad climática. Estos elementos también dependen del conocimiento que las comunidades tienen de su entorno y de la forma en que se organizan.

En la Cuenca del Lago de Cuitzeo esta dinámica es especialmente evidente, pues se trata de un ecosistema frágil y profundamente transformado, con bases sociales aún poco consolidadas. En este territorio, la resiliencia se manifiesta en la capacidad de las comunidades para reorganizar prácticas agrícolas y de manejo del agua ante variaciones prolongadas en el nivel del lago y sequías recurrentes. Por ello, la resiliencia territorial se construye a partir de procesos sociales, económicos y ambientales que influyen directamente en la preparación, respuesta y capacidad de recuperación frente a las variaciones del clima.

Después de explicar la resiliencia, corresponde analizar el último subtema de este apartado: la mitigación del cambio climático.

2.7. Mitigación al cambio climático

La mitigación es una acción humana diseñada para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero o para aumentar los sumideros que los absorben. Esto implica modificar la manera en que se produce y se consume energía, gestionar de forma más eficiente los recursos naturales y promover prácticas que disminuyan la emisión de gases como dióxido de carbono, metano u óxido nitroso; en otras palabras, avanzar hacia energías limpias y opciones más sostenibles para el medio ambiente (IPCC, 2014).

Internacionalmente, la mitigación es tan relevante como la adaptación y la resiliencia. Mientras la adaptación se orienta a implementar medidas que permitan enfrentar los efectos del cambio climático, la mitigación actúa sobre las causas que lo originan, especialmente aquellas vinculadas al uso de combustibles fósiles, que continúan siendo la principal fuente de gases de efecto

invernadero. Por ello, acuerdos como el Acuerdo de París establecen compromisos para que los países reduzcan sus emisiones y colaboren en limitar la magnitud del cambio climático a escala global.

En el caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, la mitigación adquiere relevancia debido a la transformación del paisaje y al uso intensivo del recurso hídrico, contaminación, deforestación y crecimiento territorial no planificado. La pérdida de cobertura vegetal, el cambio constante en el uso del suelo y la presión sobre los recursos hídricos reducen la capacidad del territorio para funcionar como sumidero de carbono. Además, las actividades agrícolas, el transporte y la expansión urbana contribuyen a las emisiones locales, que, aunque son menores en comparación con las de las grandes ciudades, se vuelven más significativas debido a la fragilidad ambiental de la cuenca.

A ello se suma la degradación del suelo en zonas agrícolas, la disminución de áreas de recarga y la presencia de prácticas productivas que requieren un alto consumo de recursos, lo que limita la capacidad natural del territorio para absorber carbono y mantener su equilibrio ecológico. Por esta razón, incorporar criterios de mitigación en la planificación del territorio resulta fundamental para mejorar la eficiencia del uso del suelo, conservar áreas naturales estratégicas y promover prácticas productivas más sostenibles. Estas acciones, además de reducir emisiones locales, contribuyen a fortalecer la resiliencia ambiental de la cuenca y a mantener funciones ecosistémicas esenciales para su estabilidad a largo plazo.

Una vez revisada la literatura y teniendo claras las definiciones de cada uno de los apartados descritos, resulta pertinente destacar los conceptos de tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático, ya que constituyen la base fundamental para comprender los análisis que se presentan a continuación en metodología y resultados.

Capítulo 3

Caracterización del área de estudio

3.1. Localización y delimitación del área de estudio

La Cuenca del Lago de Cuitzeo se localiza dentro del Campo Volcánico Michoacán–Guanajuato y se caracteriza por la presencia de numerosas estructuras de origen volcánico. Estas estructuras se encuentran controladas por sistemas de fallas normales y laterales, cuya presencia es más evidente en el sector norte y sur de la cuenca. El lago tiene un origen asociado a procesos de distensión tectónica ocurridos durante el Mioceno tardío, los cuales favorecieron el desplazamiento progresivo del cuerpo de agua hacia el norte, hasta alcanzar su posición actual (Israde-Alcántara & Garduño-Monroy, 1999).

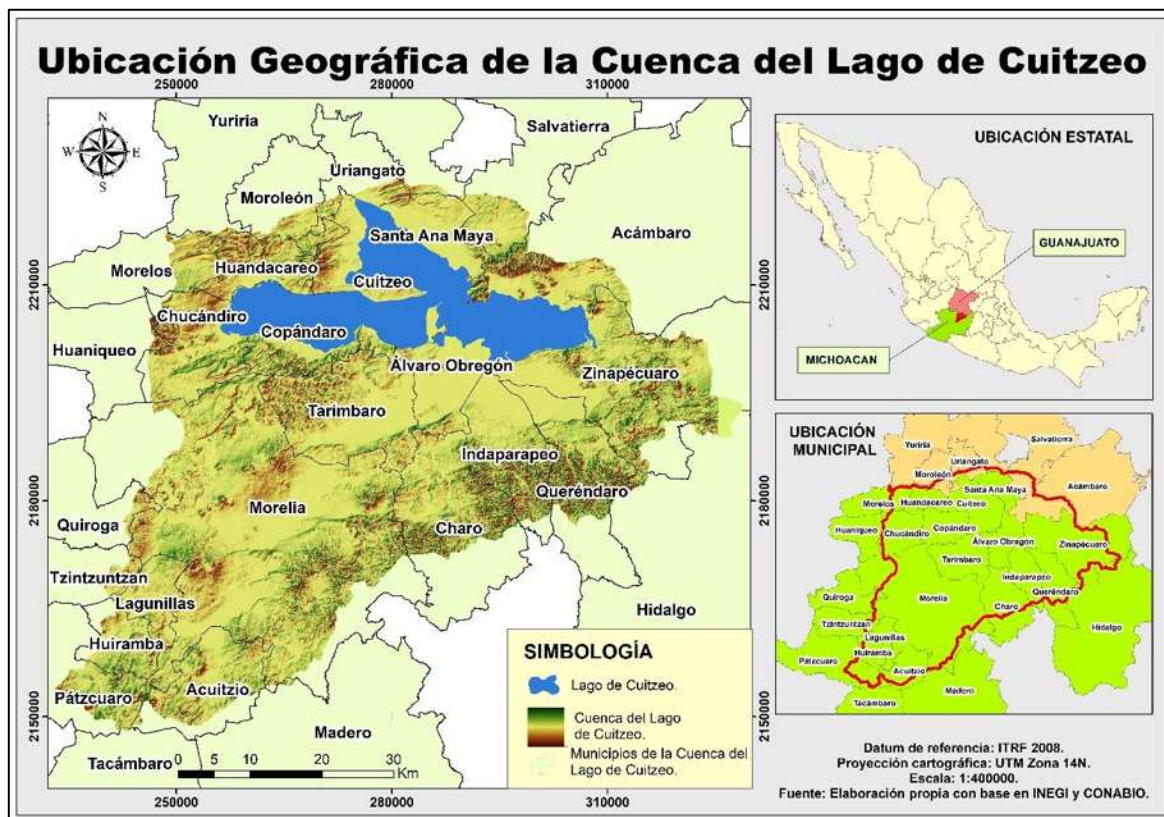


Figura 3. Ubicación geográfica de la cuenca del Lago de Cuitzeo.
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI y CONABIO, 2024.

La cuenca se localiza en la región centro-occidental de México. Limita al norte con las cuencas hidrológicas Río Lerma 4 y Laguna de Yuriria, mientras que hacia el sur colinda con las cuencas de los ríos Zirahuén, Tacámbaro y Cutzamala, pertenecientes a la región hidrológica Balsas (RH18). Al

este se encuentra delimitada por la cuenca del Río Lerma 3 y al oeste por el Lago de Pátzcuaro y el Río Angulo.

La cuenca tiene un área de 4 023.61 km² y presenta un perímetro de 354.51 km. El rango altitudinal varía desde los 1 774 msnm en el Lago de Cuitzeo hasta los 3 428 m s.n.m. en el cerro La Nieve, localizado en el sector suroccidental de la cuenca (INEGI, 2020).

3.2. Contexto físico-ambiental

En la cuenca del Lago de Cuitzeo convergen diversos componentes físico-ambientales, entre los que destacan el clima, la hidrología y la geomorfología, los cuales interactúan entre sí e influyen de manera directa en la dinámica del cuerpo de agua.

a. Clima

Con base en la clasificación climática de Köppen (1936), modificada por García (1973), en la Cuenca del Lago de Cuitzeo se identifican diversos tipos de clima. Predomina el clima templado subhúmedo, con variaciones en el grado de humedad, el cual se distribuye principalmente en las localidades de Villa Morelos, Zinapécuaro de Figueroa, Morelia, Capula y Acuitzio del Canje.

En la parte baja de la cuenca predomina un clima semicálido subhúmedo, presente principalmente en los municipios de Huandacareo, Cuitzeo del Porvenir, Santa Ana Maya y Chucándiro, donde las condiciones tienden a ser relativamente más secas. En contraste, la parte alta de la cuenca como en los cerros Zacatonal y Providencia, así como en el sector sureste del cerro Lanudo presenta un clima semifrío subhúmedo. Estas diferencias climáticas están estrechamente relacionadas con la influencia del relieve y la altitud dentro de la cuenca.

En términos de temperatura y precipitación media anual, la cuenca registra una temperatura media anual de 17.3 °C, donde diciembre y enero corresponden al periodo más frío del año, mientras que mayo y junio presentan las condiciones térmicas más elevadas. La precipitación media anual es de 778.4 mm, concentrándose principalmente durante los meses de julio, agosto y septiembre, cuando se alcanzan los valores más altos (INEGI, 2020).

b. Geología

La Cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra asociada a una depresión tectónica controlada por sistemas de fallas con orientación este-oeste en el centro de México, característica de regiones volcánico-tectónicas vinculadas al Arco Volcánico Transmexicano. Su origen se remonta al Mioceno medio, hace aproximadamente 8 millones de años (Garduño-Monroy & Israde-Alcántara, 2010).

Además, en la cuenca se distribuyen más de 50 estructuras volcánicas (Figura 4), las cuales presentan diversas formas geomorfológicas asociadas a la actividad volcánica desarrollada en la región (Gómez-Vasconcelos et al., 2021).

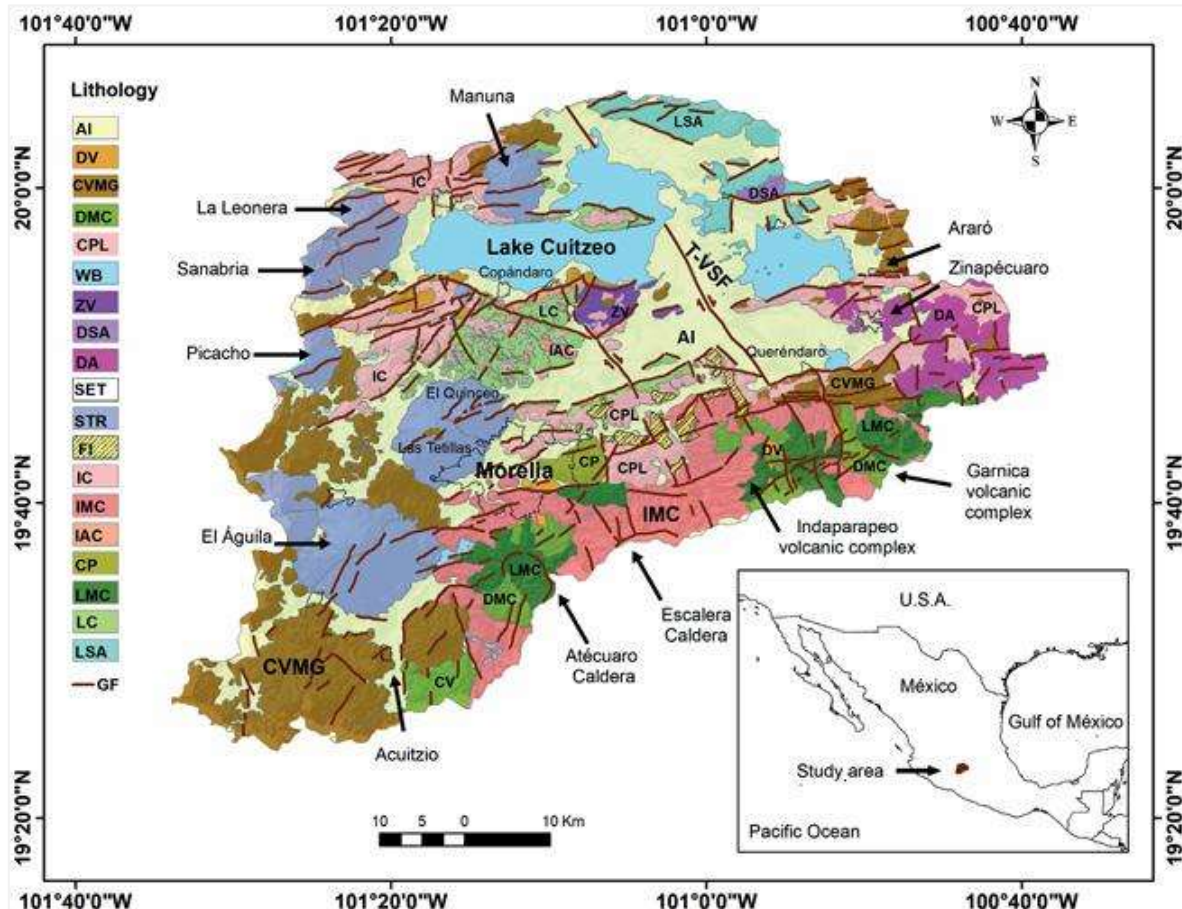


Figura 4. Mapa geológico de la cuenca del Lago de Cuitzeo.
Fuente. Gómez-Sandoval et al. (2025).

Entre los relieves más representativos destacan la Sierra de Mil Cumbres al sur, así como los volcanes El Águila y Quinceo-Las Tetillas al oeste de la cuenca. El cerro El Águila constituye además una zona importante para la recarga del acuífero que alimenta el sistema lacustre. Hacia el oriente destaca la región volcánica de Los Azufres, integrada por domos, depósitos piroclásticos y otras estructuras volcánicas asociadas al Cinturón Volcánico Transmexicano (Garduño-Monroy & Israde-Alcántara, 2010).

En términos geomorfológicos predominan lomeríos bajos, valles y planicies lacustres, mientras que, desde el punto de vista litológico, destacan materiales de origen volcánico como andesitas, basaltos, ignimbritas y depósitos piroclásticos, además de sedimentos lacustres y fluviales. La configuración topográfica de la cuenca influye directamente en los procesos de infiltración, escurrimiento y

transporte de sedimentos hacia las zonas bajas, condicionando la dinámica hidrológica y ambiental del Lago de Cuitzeo. Como consecuencia, el aporte continuo de sedimentos al sistema lacustre favorece el proceso de azolvamiento, reduciendo el tirante de agua y afectando su capacidad de almacenamiento.

En conjunto, las condiciones geológicas y geomorfológicas de la cuenca influyen en los procesos de infiltración, escurrimiento y almacenamiento de agua, lo que resulta clave para comprender la respuesta del Lago de Cuitzeo.

c. Hidrología

Hidrológicamente la Cuenca del Lago de Cuitzeo forma parte de la región hidrológica Lerma–Santiago (RH12), la cual se integra a su vez en la región hidrológico-administrativa Lerma–Santiago–Pacífico. Se trata de una cuenca cerrada, cuyo principal aportador es el Río Grande de Morelia. El Lago de Cuitzeo se considera como el segundo cuerpo de agua más extenso del país, después del Lago de Chapala (INEGI, 2020).

En la Cuenca del Lago de Cuitzeo predominan las corrientes intermitentes. No obstante, existen algunas corrientes permanentes, entre las que destacan el Río Grande de Morelia. El patrón de drenaje en la parte alta de la cuenca es de tipo dendrítico a subdendrítico, como consecuencia de un relieve más accidentado, lo que favorece una mayor generación de escurrimiento superficial. En contraste, en la parte baja de la cuenca la red de drenaje se encuentra poco desarrollada, condición asociada a la presencia de vulcanismo reciente, el cual favorece la infiltración y, por ende, reduce el escurrimiento superficial.

El Río Grande de Morelia constituye el principal aportador del Lago de Cuitzeo. Durante su recorrido alimenta la presa de Cointzio y recibe aportes del Río Chiquito, así como de los manantiales de La Mintzita, Itzícuaru y La Quemada, además de descargas residuales urbanas provenientes de la ciudad de Morelia y retornos de la fábrica de papel *Celulosa y Papel de Michoacán, S.A.* (hoy CRIBOSA) (INEGI 2020). En este sentido, el lago no recibe únicamente agua de origen natural, sino también escurrimientos superficiales, contribuciones subterráneas y descargas de origen antrópico, lo que sugiere que este afluente constituye una de las principales vías de incorporación de contaminantes al sistema lacustre, contribuyendo al deterioro de la calidad del agua.

Una parte importante del recurso hídrico es destinada al uso agrícola en localidades como Charo, Álvaro Obregón y Tarímbaro, lo que ha implicado la construcción de canales de riego que modifican

el drenaje natural. Finalmente, estos escurrimientos descargan al sector sur del lago, en una zona caracterizada por la presencia de humedales (Allende et al., 2010).

d. Importancia del Lago como sistema lacustre

El Lago de Cuitzeo desempeña funciones vitales para la fauna y flora de la cuenca, además de actuar como un regulador hidrológico y climático del sistema. Sin embargo, al tratarse de un lago somero, con una profundidad media aproximada de 0.76 m y una profundidad máxima de 1.85 m en el vaso este, mientras que el vaso oeste mantiene únicamente pocos centímetros de profundidad durante el periodo estivo (Israde-Alcántara et al., 2002), presenta una alta sensibilidad a las variaciones climáticas. En este contexto, pequeñas fluctuaciones, particularmente en la precipitación, pueden generar cambios significativos en la extensión superficial del lago.

Además de su relevancia hidrológica y climática, el Lago de Cuitzeo constituye un sistema lacustre de alta importancia ambiental y territorial, al albergar humedales que desempeñan funciones ecológicas fundamentales, como el soporte de biodiversidad y la regulación de procesos ambientales a escala regional. Así mismo, el lago cumple un papel relevante como espacio donde se desarrollan diversas actividades productivas, entre las que destacan la agricultura, la pesca, la ganadería y el turismo. Sin embargo, las condiciones actuales del Lago de Cuitzeo son el resultado de múltiples factores que actúan en toda la cuenca, entre ellos el desarrollo de actividades agrícolas, la descarga de aguas contaminadas y la variabilidad climática. De esta manera, el lago sintetiza los efectos combinados de procesos naturales y de la intervención humana que se generan a lo largo del territorio.

3.3. Caracterización socioeconómica de la cuenca

El componente socioeconómico desempeña un rol fundamental en la dinámica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, ya que la población que habita en su entorno depende directamente del uso de los recursos naturales que proporciona este ecosistema para el desarrollo de sus actividades productivas. Esta relación ha implicado una intervención constante sobre el sistema, generando presiones que influyen en su funcionamiento ambiental e hidrológico.

a. Población y asentamientos humanos

La Cuenca del Lago de Cuitzeo está integrada por 28 municipios, de los cuales 23 pertenecen al estado de Michoacán, lo que representa aproximadamente el 82.14 % de la superficie de la cuenca, mientras que los cinco restantes corresponden al estado de Guanajuato, con el 17.86 %. En este

territorio se localizan 15 cabeceras municipales, entre las que destaca la ciudad de Morelia, al constituir el principal centro económico, social y poblacional de la región, además de ser capital del estado de Michoacán (Bravo-Espinosa et al., 2008).

Con base en los Censos de Población y Vivienda de 2010 y 2020, se identifica una tendencia general de crecimiento poblacional en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. De manera histórica, en 1970 la cuenca registraba 380,787 habitantes (Bravo-Espinosa et al., 2008), cifra que aumentó a 1,751,707 habitantes en 2010 y a 1,949,964 habitantes en 2020, lo que refleja un incremento sostenido de la población y, en consecuencia, una mayor demanda de recursos naturales, particularmente del agua y del suelo.

El municipio de Morelia concentra la mayor población de la cuenca, lo que se traduce en un mayor consumo de agua y, en consecuencia, en una mayor generación de descargas residuales urbanas, las cuales influyen de manera indirecta en el Lago de Cuitzeo. Por su parte, los municipios ubicados en la ribera del lago, como Cuitzeo, Huandacareo, Chucándiro, Santa Ana Maya y Copándaro, si bien presentan una población menor en comparación con municipios como Tarímbaro o Pátzcuaro, mantienen una relación directa con el sistema lacustre, ya que una parte importante de sus actividades productivas depende del lago.

b. Cambio de uso de suelo y vegetación

De acuerdo con la cartografía de uso de suelo y vegetación correspondiente al año 2021 (Figura 5), la Cuenca del Lago de Cuitzeo presenta una marcada predominancia de usos asociados a actividades agrícolas, principalmente agricultura de temporal y de riego, así como amplias superficies de pastizal inducido. Esta configuración refleja la vocación productiva de la cuenca y su estrecha relación con el aprovechamiento del recurso hídrico, especialmente en las zonas de valle y planicies que rodean al lago.

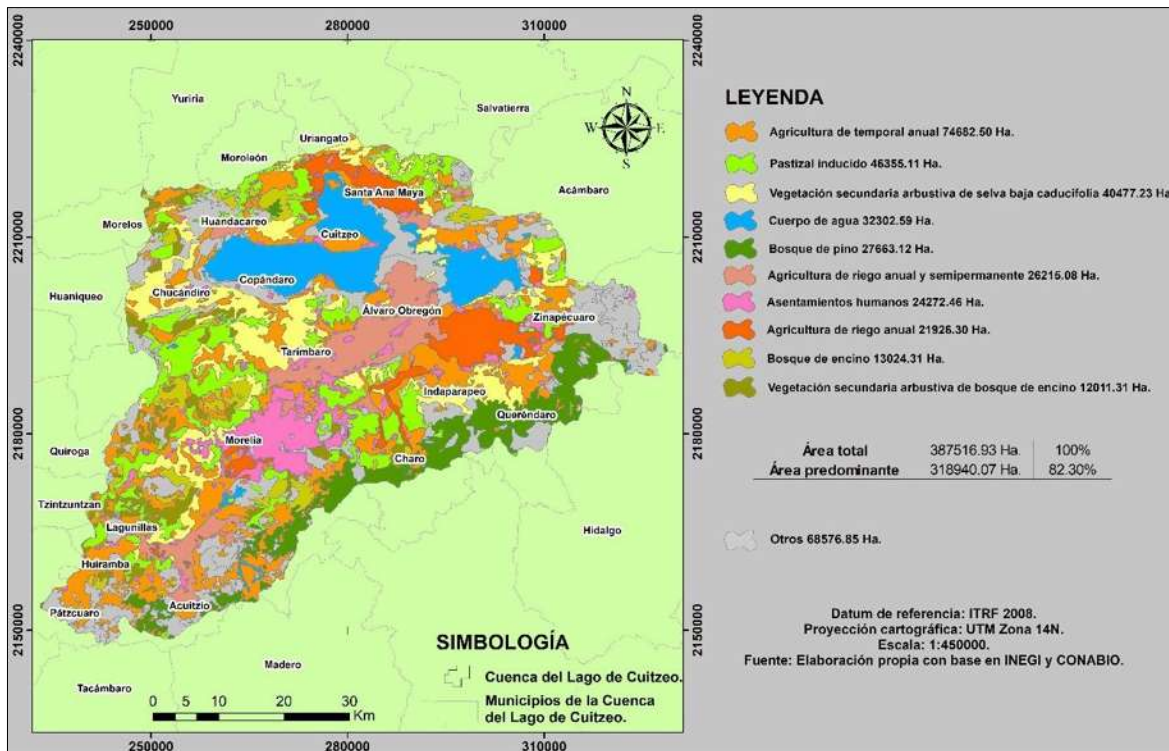


Figura 5. Uso de Suelo y Vegetación de la Cuenca del Lago de Cuitzeo año 2021.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI y CONABIO.

Las áreas agrícolas se distribuyen de manera amplia en los sectores central y norte de la cuenca, en estrecha relación con municipios de carácter rural y periurbano. De la misma manera, se identifican asentamientos humanos concentrados en torno a los principales centros poblacionales, destacando la zona metropolitana de Morelia y su área de influencia, lo que ha favorecido una transformación progresiva del uso del suelo y una mayor presión sobre el territorio y los recursos naturales de la cuenca.

En cuanto a la cobertura vegetal, la cuenca conserva remanentes de bosque de pino y encino, así como extensas áreas de vegetación secundaria, principalmente arbustiva y asociada a selva baja caducifolia. Estas coberturas se localizan predominantemente en zonas de mayor altitud y pendientes más pronunciadas, donde las condiciones topográficas han limitado la expansión de las actividades agrícolas. No obstante, la vegetación se presenta de manera fragmentada, lo que sugiere procesos previos de modificación del paisaje y cambios en el uso del suelo.

La configuración actual del uso de suelo y la cobertura vegetal tiene implicaciones directas en la dinámica hidrológica de la cuenca, al influir en procesos como el escurrimiento superficial, la infiltración y la conservación de humedales asociados al Lago de Cuitzeo. En este sentido, el sistema lacustre refleja la interacción entre las condiciones naturales y las actividades humanas

desarrolladas en la cuenca, lo que refuerza su carácter de sistema sensible a las presiones socioambientales.

c. Actividades productivas y uso del agua

El uso del agua en la Cuenca del Lago de Cuitzeo está estrechamente vinculado a las actividades productivas y a la expansión de asentamientos humanos, lo cual genera una presión constante sobre el recurso hídrico. La disponibilidad y distribución del agua dependen tanto de las condiciones del clima como de las prácticas de aprovechamiento desarrolladas en la cuenca, particularmente en los sectores agrícola y urbano.

-Uso agrícola del agua

La agricultura constituye el principal usuario del recurso hídrico en la cuenca, destacando tanto la agricultura de temporal como la de riego. Las áreas agrícolas se concentran principalmente en las zonas de valle y planicies que rodean al lago, donde las condiciones topográficas y edáficas favorecen esta actividad. En municipios como Charo, Álvaro Obregón, Tarímbaro, Queréndaro y Santa Ana Maya, el uso del agua para riego ha implicado la construcción de canales y obras hidráulicas que modifican el patrón natural de escurrimiento superficial.

Durante los periodos secos, la dependencia del riego se incrementa, lo que intensifica la extracción de agua superficial y subterránea. Esta situación adquiere especial relevancia en un contexto de variabilidad climática, donde la ocurrencia de sequías prolongadas puede reducir la disponibilidad hídrica y amplificar la presión sobre el Lago de Cuitzeo, afectando su extensión superficial y su dinámica hidrológica.

-Uso urbano e industrial del agua

El uso urbano del agua se concentra principalmente en la ciudad de Morelia, principal centro poblacional de la cuenca. El crecimiento demográfico y la expansión urbana han incrementado la demanda de agua potable, así como la generación de aguas residuales. Una parte de estas descargas es incorporada al sistema hidrológico a través del Río Grande de Morelia y el Río Chiquito, los cuales funcionan como vías de transporte de escurrimientos urbanos hacia el lago.

Adicionalmente, en la cuenca se desarrollan actividades industriales que utilizan el recurso hídrico, entre las que destacan aquellas asociadas al sector papelerero y a servicios urbanos. Estas actividades, junto con las descargas domésticas, representan una fuente de presión adicional sobre la calidad

del agua del sistema lacustre, especialmente durante periodos de bajo caudal, cuando la capacidad de dilución del sistema se ve reducida.

En este contexto, el Lago de Cuitzeo puede ser entendido como un sistema altamente sensible, cuya respuesta hidrológica refleja la interacción entre las condiciones climáticas y las actividades humanas desarrolladas en la cuenca. Esta relación resulta fundamental para interpretar los procesos de desecación y recuperación del lago.

Capítulo 4

Metodología de la investigación

4.1. Análisis del comportamiento climático de la precipitación y la temperatura en la CLC

Para analizar la información climática y el comportamiento del clima en la Cuenca del Lago de Cuitzeo en el periodo 1971-2020, se utilizaron datos observados de temperatura máxima y mínima; y precipitaciones disponibles en la página del Sistema Meteorológico Nacional (SMN).

a. Comportamiento climático de la precipitación y la temperatura

A partir de la información disponible en la base de datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), se seleccionaron 32 estaciones meteorológicas ubicadas tanto dentro como en el entorno de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 6), con la finalidad de caracterizar las condiciones climáticas de la región.

Para cada estación se consideraron las variables de precipitación (Pcp), temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin), correspondientes al periodo 1970–2020. Este periodo de tiempo se definió con la finalidad de incluir las tres normales climatológicas más recientes 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020; cada una de ellas con un periodo de tiempo de 30 años como lo sugiere la Organización Meteorológica Mundial (OMM).



Figura 6. Distribución de estaciones meteorológicas.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, CONABIO y SMN, 2024.

Con el objetivo de conocer la disponibilidad de información en cada estación meteorológica y variable analizada, se utilizó el lenguaje de programación R dentro del entorno RStudio. Esta herramienta permitió calcular el porcentaje de datos existentes en cada serie temporal e identificar su continuidad, lo que facilitó la selección de aquellas estaciones con registros más completos y consistentes para el análisis.

Una vez obtenidos los resultados, se realizó un segundo filtrado de las estaciones meteorológicas, considerando únicamente aquellas que presentaron más del 80 % de datos disponibles en las tres variables analizadas. Este criterio se fundamentó en el documento *Guidelines on the Calculation of*

Climate Normals (OMM, 2017), el cual recomienda calcular una normal climatológica solo cuando se dispone de información válida en al menos el 80 % de los años del periodo de referencia.

En versiones anteriores se sugería evitar tres o más años consecutivos sin datos, con el argumento de que esos vacíos podían alterar el promedio; sin embargo, el estudio *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate* (OMM, 2007) demostró que esta condición no era necesaria, ya que la relación entre los valores climáticos de un año y los de la siguiente conocida como autocorrelación suele ser baja. Por ello, la OMM concluyó que el requisito del 80 % de datos disponibles es suficiente para garantizar la representatividad estadística y la confiabilidad de las normales climatológicas.

Mediante el uso de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM), un software desarrollado con apoyo de la Organización Meteorológica Mundial para la gestión de información climatológica, se realizó el análisis gráfico de los valores anuales registrados en cada estación. A partir de una interpretación visual de las series temporales (Figura 7), basada en criterios de coherencia y continuidad, se determinó la aceptación o el descarte de los registros. Este procedimiento permitió identificar vacíos de información, saltos no justificables y valores atípicos, mientras que aquellas estaciones que presentaron una continuidad razonable y una variabilidad consistente con las condiciones climáticas de la región fueron consideradas adecuadas para el análisis. De esta forma, se garantizó la homogeneidad y confiabilidad de las series empleadas en la caracterización climática.

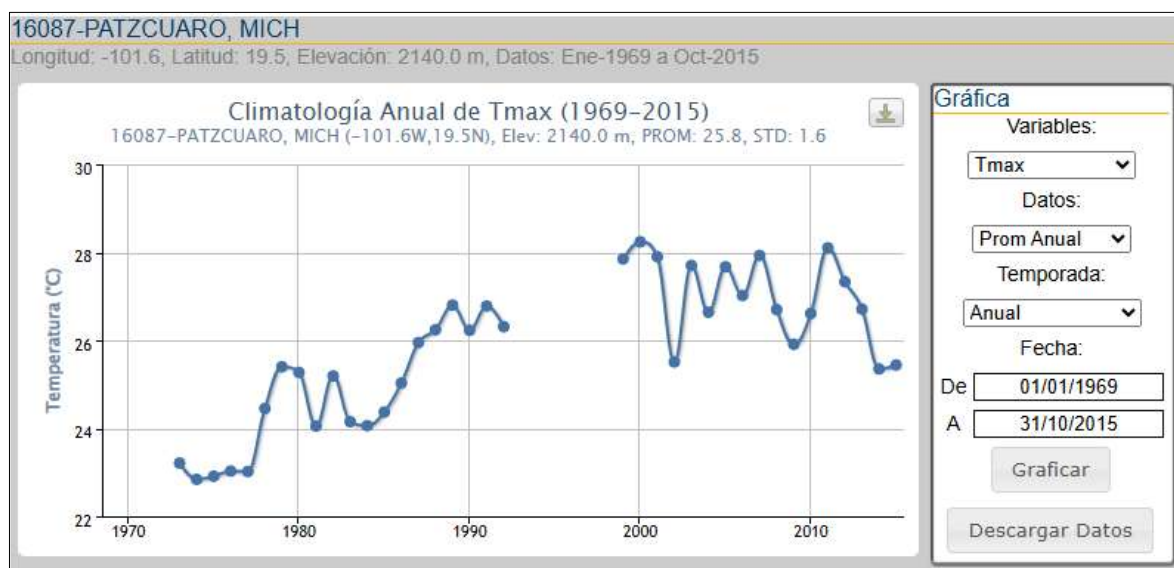


Figura 7. Variación anual de la temperatura máxima en la estación meteorológica de Pátzcuaro (1969–2015).

Fuente: Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>)

Una vez realizada la depuración y selección de estaciones consideradas aceptables para la caracterización climática de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se consideraron las normales climatológicas publicadas por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Dichas normales representan los valores promedio de variables como temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, calculados a partir de registros históricos de 30 años conforme a los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) explicado anteriormente. La incorporación de estas normales permitió establecer una referencia comparativa y robusta para analizar las condiciones observadas y detectar posibles tendencias o desviaciones en el comportamiento climático de la cuenca.

Posteriormente para fortalecer la caracterización climática e identificar tendencias o cambios en temperatura y precipitación, se utilizó el software Statistica 8, una herramienta de análisis y visualización de datos que fue necesaria para complementar la evaluación de las series temporales. Con este programa se construyó boxplot con todos los datos diarios observados distribuidos decadalmente, esto para cada una de las estaciones previamente seleccionadas, ello permitió observar valores extremos, rangos de variabilidad y comportamientos anómalos; un boxplots es una representación gráfica resumida de un conjunto de datos numéricos que nos permite visualizar de manera clara y rápida la distribución estadística, asimetría y valores atípicos (Figura 8).

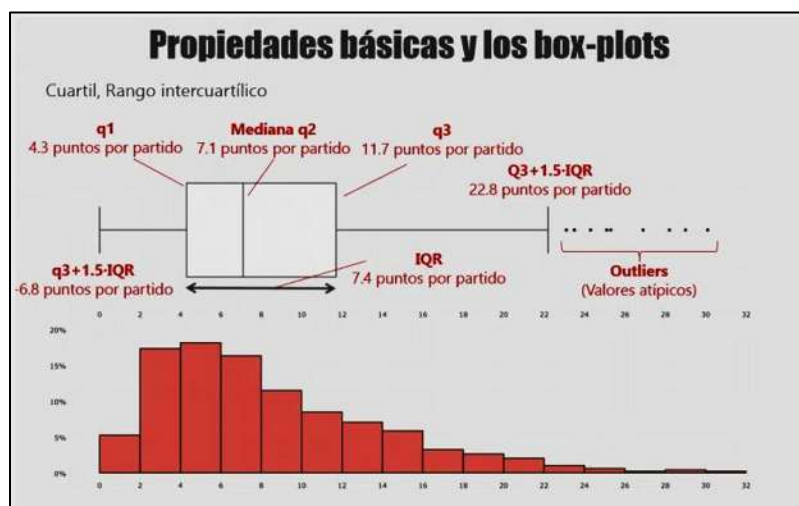


Figura 8. Estructura básica de un diagrama de caja (boxplot).
Fuente: (Ollé, 2017).

Finalmente, se llevó a cabo la caracterización climática de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, con el objetivo de analizar la evolución de las variables de temperatura y precipitación a lo largo del

periodo de estudio (50 años). Con este análisis se pudo identificar patrones de variabilidad climática y posibles señales de cambio climático, proporcionando una base para comprender la dinámica climática regional y la relación que tiene con las diferentes actividades que se desarrollan en la misma y la disponibilidad del recurso hídrico.

Este análisis permitió identificar patrones de variabilidad climática y posibles señales de cambio, proporcionando una base para comprender la dinámica climática regional y su relación con los procesos ambientales y la disponibilidad del recurso hídrico.

4.2. Análisis de indicadores de cambio climático a escala regional

Para determinar los indicadores de cambio climático en la zona de estudio se utilizó Climate Explorer que es una aplicación web para la investigación climática, gestionada por el Real Instituto Meteorológico de los Países Bajos (KNMI), que contiene una completa colección de conjuntos de datos climáticos y herramientas de análisis. Además, forma parte del Centro Regional sobre el Clima de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

a. Selección del área de estudio

El Atlas de cambio climático del KNMI admite tres formas de seleccionar un área para la obtención de mapas o gráficos de series temporales, estas son:

1. Áreas predefinidas por el Grupo de Trabajo 1 del IPCC, que actualmente abarcan el mundo entero (tierra y mar), los continentes y las áreas utilizadas en el "Atlas" del Anexo I del Quinto Informe de Evaluación del IPCC.
2. Una lista de países y regiones autónomas. Los modelos climáticos globales dividen la superficie terrestre en una rejilla de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.
3. Un lugar definido por coordenadas de latitud y longitud. Los campos se interpolan hasta este punto (coordenada) y se mostrará un mapa con un margen de 10° .

Para la presente investigación se seleccionó un punto representativo dentro de la cuenca, definido a partir de las coordenadas 19.8° N de latitud y 101.2° W de longitud, el cual corresponde de manera aproximada al centro geográfico de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. La elección de este punto permite analizar las señales de cambio climático a escala regional y se relaciona con la resolución espacial de los modelos climáticos empleados. En los modelos globales del conjunto CMIP5, las variables atmosféricas se representan mediante una cuadrícula espacial en la que cada celda suele abarcar áreas del orden de 100 km por lado, por lo que los valores obtenidos corresponden al promedio de

las condiciones climáticas dentro de esa región (Taylor, Stouffer y Meehl, 2012). Considerando que la Cuenca del Lago de Cuitzeo presenta una superficie aproximada de 4 025 km², esta resolución resulta adecuada para identificar tendencias climáticas regionales, más que variaciones locales o puntuales.

b. Conjunto de datos e indicadores

Se tomó el conjunto de datos GCM: Extremos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados CMIP5 (conjunto completo); elaborado por el Equipo de Expertos en Detección del Cambio Climático e Índices (ETCCDI) del Centro Canadiense de Modelado y Análisis del Clima, quienes han calculado varios índices de extremos a partir de los datos diarios CMIP5. Este conjunto fue ampliamente utilizado como base científica para la elaboración del Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR5), publicado entre 2013 y 2014.

Para identificar las señales de cambio climático, se seleccionaron indicadores climáticos orientados a caracterizar las variaciones de las variables de precipitación y temperatura, no solo en términos de valores promedios, sino también considerando la ocurrencia de eventos extremos y las tendencias de largo plazo. Estos elementos resultan clave para comprender la dinámica de los procesos hidrológicos y atmosféricos que operan en la cuenca.

-Indicadores de precipitación

Los indicadores seleccionados evalúan variaciones tanto en la frecuencia como en la intensidad de los días con lluvia, lo cual resulta fundamental para analizar la disminución del volumen del cuerpo de agua. El Lago de Cuitzeo depende fundamentalmente del agua proveniente de las precipitaciones, ya sea de manera directa (precipitación sobre el lago) o indirecta (escurrimientos y filtraciones de las zonas altas de la cuenca); por lo que cualquier cambio en la distribución o intensidad de las lluvias podría tener un efecto directo en el volumen del cuerpo de agua.

Indicadores para precipitación	
Indicador	Definición
PRCPTOT.	Precipitación total anual en días húmedos
R1mm	Conteo anual de días con precipitación ≥ 1 mm
R10mm	Conteo anual de días con precipitación ≥ 10 mm
R20mm	Conteo anual de días con precipitación ≥ 20 mm
R95pTOT	PRCP total anual cuando RR > 95p. Sea RR _{wj} la cantidad de precipitación diaria en un día lluvioso

Tabla 6. Indicadores climáticos de extremos utilizados para el análisis de precipitación.

Fuente. Elaboración propia con base en *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI, s.f.); Karl, Nicholls y Ghazi (1999); y Peterson (2001).

-Indicadores de temperatura

Los indicadores de temperatura permiten identificar variaciones en la frecuencia de noches frías y días cálidos, así como cambios en los valores extremos de temperatura mínima y máxima. A través de su análisis es posible evaluar si las temperaturas han experimentado incrementos y si se ha intensificado la ocurrencia de eventos de calor extremo. Estas variaciones térmicas influyen de manera directa en los procesos hidrológicos, agrícolas y ecológicos de la cuenca, afectando la disponibilidad del recurso hídrico, los ciclos productivos de los cultivos y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Indicadores para temperatura	
TN10p	Porcentaje de noches en que TN < percentil 10
TN90p	Porcentaje de noches en que TN > percentil 90
TNn	Valor mínimo mensual de la temperatura mínima diaria
TNx	Valor máximo mensual de la temperatura mínima diaria
TX10p	Porcentaje de días en que TX < percentil 10
TX90p	Porcentaje de días en que TX > percentil 90

Tabla 713. Indicadores climáticos de extremos utilizados para el análisis de temperatura.

Fuente. Elaboración propia con base en *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI, s.f.); Karl, Nicholls y Ghazi (1999); y Peterson (2001).

c. Opciones de series temporales: Escenarios.

El clima futuro depende de cuánto modifiquemos la composición de la atmósfera y los cambios en el uso del suelo; que a su vez depende del crecimiento económico, el desarrollo tecnológico, concientización ambiental y las decisiones políticas que se tomen sobre si limitar o no las emisiones. Para representar las posibles trayectorias futuras del clima se emplean los escenarios de concentración representativos (RCP). Estos escenarios describen distintos caminos posibles en la evolución del sistema climático, en función de las concentraciones futuras de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Para esta investigación se consideraron los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, la selección se basó en que estos escenarios son ampliamente utilizados en muchos estudios en México y América Latina; y por representar trayectorias contrastantes de concentración de gases de efecto invernadero, en la Figura 9 se puede observar la proyección del cambio en la temperatura media superficial terrestre a nivel global bajo diferentes escenarios de emisiones

Según el KNMI, el escenario RCP 4.5: supone una acción más rápida para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, con emisiones que alcanzarán su punto máximo en 2040 y disminuirán fuertemente hasta 2080, por otra parte, **el escenario RCP 8.5:** es un escenario en el que se mantiene

la situación actual, con emisiones de gases de efecto invernadero en aumento a lo largo del tiempo, lo que conduce a altos niveles de concentración de gases de efecto invernadero.

No se seleccionó el escenario RCP 2.6 debido a que describe un esfuerzo total para limitar el calentamiento global a menos de 2 °C disminuyendo las emisiones drásticamente después de 2020 y llegando a cero a partir de 2080; aunque interesante, es poco realista a mediano plazo (2020–2050). Y el escenario RCP 6.0 ofrece resultados similares al RCP4.5.

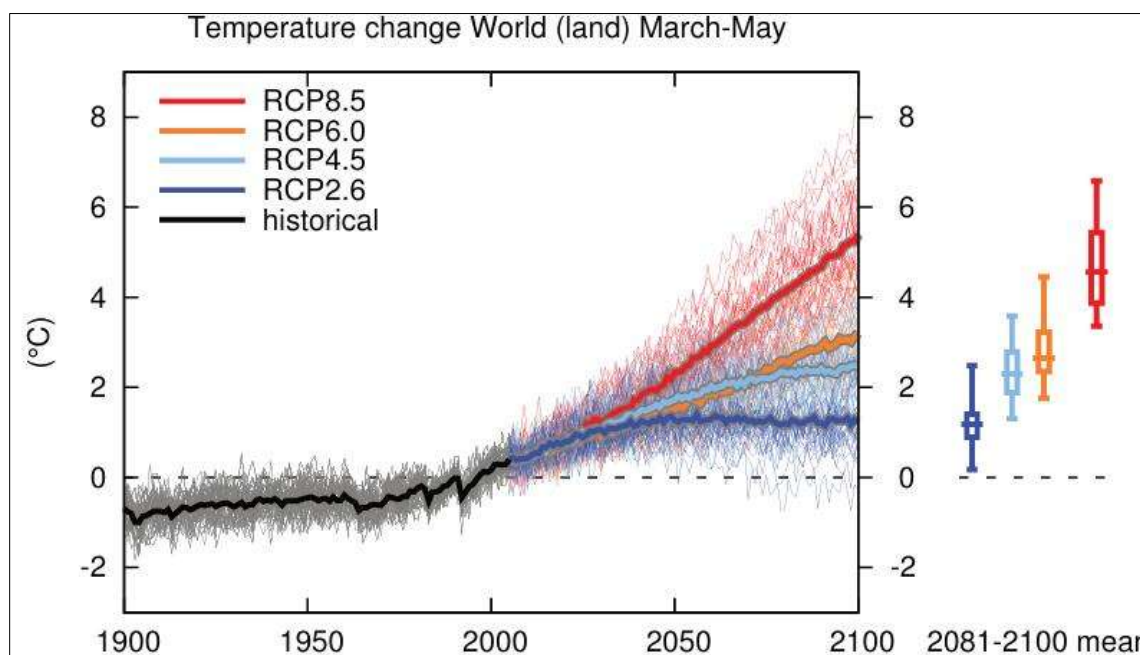


Figura 9. Proyección del cambio en la temperatura media superficial terrestre a nivel global bajo diferentes escenarios de emisiones (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) para el periodo 1900–2100.

Fuente: IPCC (2013).

Para complementar los resultados de los indicadores climáticos, se incluyeron dos índices que permitieron analizar y comprender la relación entre el clima y la disponibilidad del recurso hídrico en el Lago de Cuitzeo. Estos fueron el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), los cuales se emplearon para observar cómo las variaciones en la precipitación se reflejan en los cambios de la superficie del lago.

4.3. Análisis de la variabilidad climática y la respuesta hidrológica del Lago de Cuitzeo mediante SPI y NDWI

Para la identificación de la presencia de periodos secos y húmedos en la cuenca del Lago de Cuitzeo y su relación con la dinámica del lago, se emplearon el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI). Mediante la aplicación de estos índices se

analizaron las condiciones de sequía y humedad en la cuenca, así como los cambios en la superficie de agua del lago, considerando los años húmedos y secos más representativos.

a. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) se basa en información de precipitación que puede provenir de distintos tipos de datos climáticos. Para este estudio se utilizaron datos de reanálisis obtenidos a través del Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad (IRI). Se encuentran conjuntos de datos de reanálisis que integran información proveniente de estaciones meteorológicas, observaciones satelitales y modelos atmosféricos, lo que permite generar series climáticas continuas.

Este tipo de información resulta esencial para el estudio de fenómenos hidrometeorológicos, como las sequías, al permitir analizar la variabilidad de la precipitación en un periodo largo de tiempo. En el caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde la precipitación constituye una de las principales fuentes de recarga hídrica, el análisis de estos eventos resulta fundamental para comprender la influencia de la variabilidad climática en la disponibilidad del agua.

El proceso de cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) fue descrito por McKee et al., 1993 de la siguiente manera:

- Se utiliza una serie de datos mensuales de precipitación correspondiente a un periodo prolongado; diversos estudios recomiendan contar con al menos 50 años de registros para obtener resultados estadísticamente confiables.
- A partir de estos datos se establecen diferentes escalas temporales de análisis, mediante la acumulación de precipitación en j meses.
- Las escalas de tiempo más utilizadas corresponden a 3, 6, 12, 24 y 48 meses, dependiendo del tipo de análisis que se desea realizar.
- Los valores de precipitación acumulada se ajustan a una distribución Gamma (Figura 10), lo que permite establecer la relación entre la cantidad de lluvia registrada y su probabilidad de ocurrencia.
- A partir de esta distribución se calcula la probabilidad acumulada asociada a cada valor de precipitación.

- Posteriormente, esta probabilidad se transforma a una distribución normal estandarizada, lo que permite expresar los resultados mediante valores del SPI que facilitan su interpretación. La interpretación de los valores del SPI se realiza de la siguiente manera:
 - Si el valor es **positivo**, indica que **llovió más de lo normal** (condición húmeda).
 - Si es **negativo**, indica **déficit de lluvia** (condición seca o sequía).

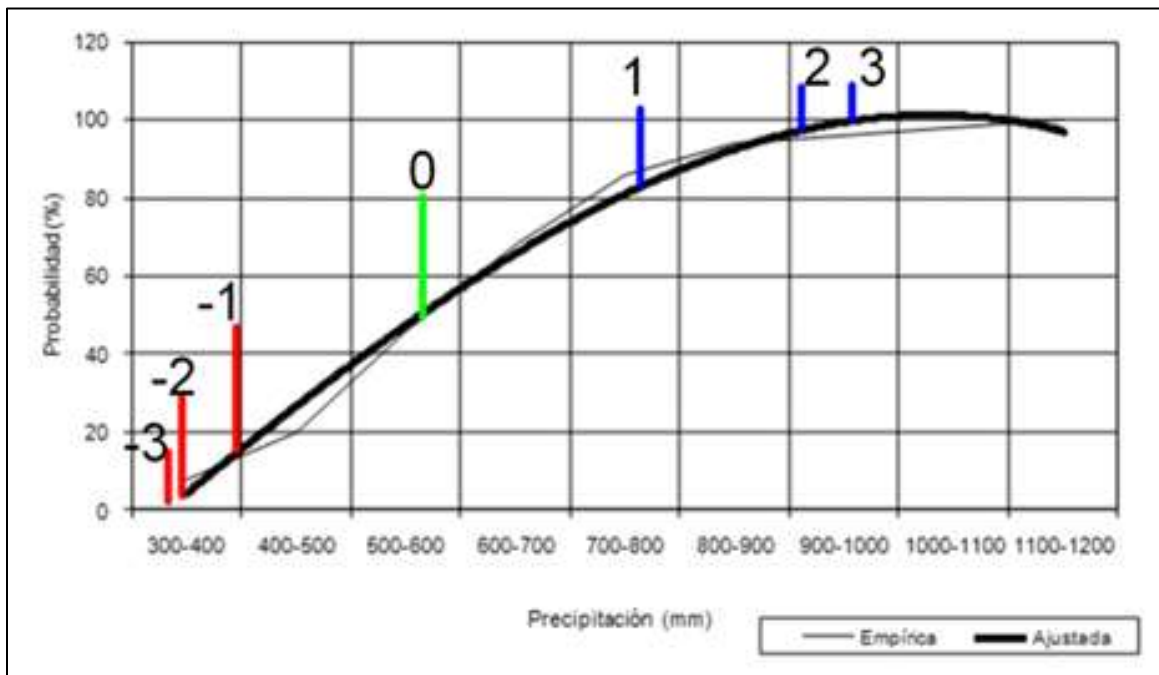


Figura 10. Ejemplo de la relación de la distribución gama y su transformación a desviación estándar.

Fuente. Galván Ortiz, 2011.

Para el presente trabajo se utilizó el SPI a seis meses (SPI-6). Este índice compara la precipitación acumulada en un periodo de seis meses con los registros históricos correspondientes al mismo intervalo temporal. En este caso, el SPI-6 se calculó para el mes de octubre, por lo que se consideró la precipitación acumulada entre mayo y octubre de cada año y se comparó con los acumulados registrados para ese mismo periodo en la serie histórica. Esta elección se debe a que en la Cuenca del Lago de Cuitzeo la temporada de lluvias inicia generalmente en el mes de mayo, por lo que el análisis del periodo mayo–octubre permite representar de mejor manera las condiciones de precipitación durante la época lluviosa en la región. La Tabla 8 presenta la clasificación de las condiciones de sequía de acuerdo con los rangos del SPI y los posibles impactos asociados.

Categoría	Posibles impactos	Rango de SPI
Condición normal	Condiciones normales de precipitación	0 a -0.5
Condición anormal seco	Inicia la sequía, período corto en que se secan lentamente las siembras, cultivos y pastizales, empieza a haber peligro de incendios, déficit de agua, pasturas y cultivos no se recuperan completamente.	-0.5 a -0.8
Sequía moderada	Algo de daño a cultivos y pastizales, riesgo alto de incendio. Corrientes, represas y pozos con bajo nivel de agua, escasez de agua inminente, lo que implica la petición del cuidado del agua.	-0.8 a -1.3
Sequía severa	Posible pérdida de cultivos y pastos, riesgo de incendio alto, escasez de agua común, restricciones en el uso del agua.	-1.3 a -1.6
Sequía extrema	Pérdida mayor de cultivos/pasto, peligro extremo de incendios, restricciones estrictas de uso del agua.	-1.6 a -2.0
Sequía excepcional	Pérdida de cultivos/pasto excepcional y extendida, riesgo inminente de incendios, escasez de agua en represas, corrientes y pozos, creación de un estado de emergencia.	-2.0 o menos

Tabla 8. Clasificación de la sequía de acuerdo con valores de SPI.

Fuente: Centro Nacional de Mitigación de Sequías (2018). Generador SPI [software]. Universidad de Nebraska-Lincoln. <https://drought.unl.edu/Monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>

El SPI-6 se utilizó para identificar los periodos secos y húmedos en la Cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de la variación de la precipitación registrada en la serie histórica. La identificación de estos periodos sirvió como base para analizar posteriormente la respuesta del cuerpo de agua ante condiciones de humedad y sequía.

b. Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI)

Como complemento al análisis realizado con el SPI-6, se incorporó el uso de herramientas de teledetección que permitieron obtener información de la superficie terrestre sin tener contacto directo con ella, esto se hizo a través de la aplicación Climate Engine (<https://app.climateengine.org/climateEngine>) la cual nos permitió acceder a datos satelitales históricos y generar mapas comparativos en función de diferentes índices climáticos. La aplicación es usada ampliamente en estudios de sequías, cobertura vegetal, agricultura, balance hídrico, incendios y cambio climático.

El Índice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI) fue desarrollado por McFeeters (1996), para realzar las características relacionadas con el agua en los paisajes. Este índice utiliza las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR), representado en la siguiente ecuación.

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Las imágenes satelitales con color natural muestran la superficie terrestre tal como es registrada por los sensores, por lo que en algunos casos puede resultar difícil diferenciar los cuerpos de agua de otras coberturas del terreno. Al aplicar índices espectrales como el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), es posible resaltar las áreas donde existe presencia de agua, lo que facilita su identificación. En la Figura 11 se presenta un ejemplo comparativo entre una imagen satelital en color natural y el resultado obtenido mediante la aplicación del NDWI, donde se puede observar con mayor claridad la delimitación de los cuerpos de agua.



Figura 11. Comparación entre una imagen satelital en color natural (a) y una imagen procesada mediante el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) (b), donde se resaltan los cuerpos de agua de la laguna San Antonio Atocha, municipio de Apan, Hidalgo, México.

Fuente: Hernández y Pavón, 2024.

El NDWI tiene diferentes aplicaciones entre ellas están:

- Identificación de cuerpos de agua superficiales.
- Evaluación de cambios en la superficie de agua.
- Apoyo en el análisis de condiciones de sequía.
- Diferenciación de tipos de cobertura del suelo.

El NDWI se empleó con el propósito de analizar las variaciones espaciales en la superficie de agua del Lago de Cuitzeo a partir de imágenes satelitales. La aplicación de este índice permitió delimitar las áreas cubiertas por agua y comparar su extensión en diferentes momentos del periodo de estudio. Esta información se utilizó posteriormente para relacionar los cambios en la superficie del lago con los periodos secos y húmedos identificados mediante el análisis del SPI-6.

En la Figura 12 se presenta de manera esquemática la metodología de la investigación, en la cual se sintetizan los principales procedimientos descritos previamente. Este esquema permite visualizar

de forma integrada las distintas etapas, desde la obtención y depuración de los datos climáticos, hasta la evaluación de los indicadores de cambio climático y el análisis de la respuesta hidrológica del lago. La metodología se encuentra organizada en función de los objetivos específicos planteados, lo que facilita comprender la relación entre cada fase del análisis y los resultados esperados.

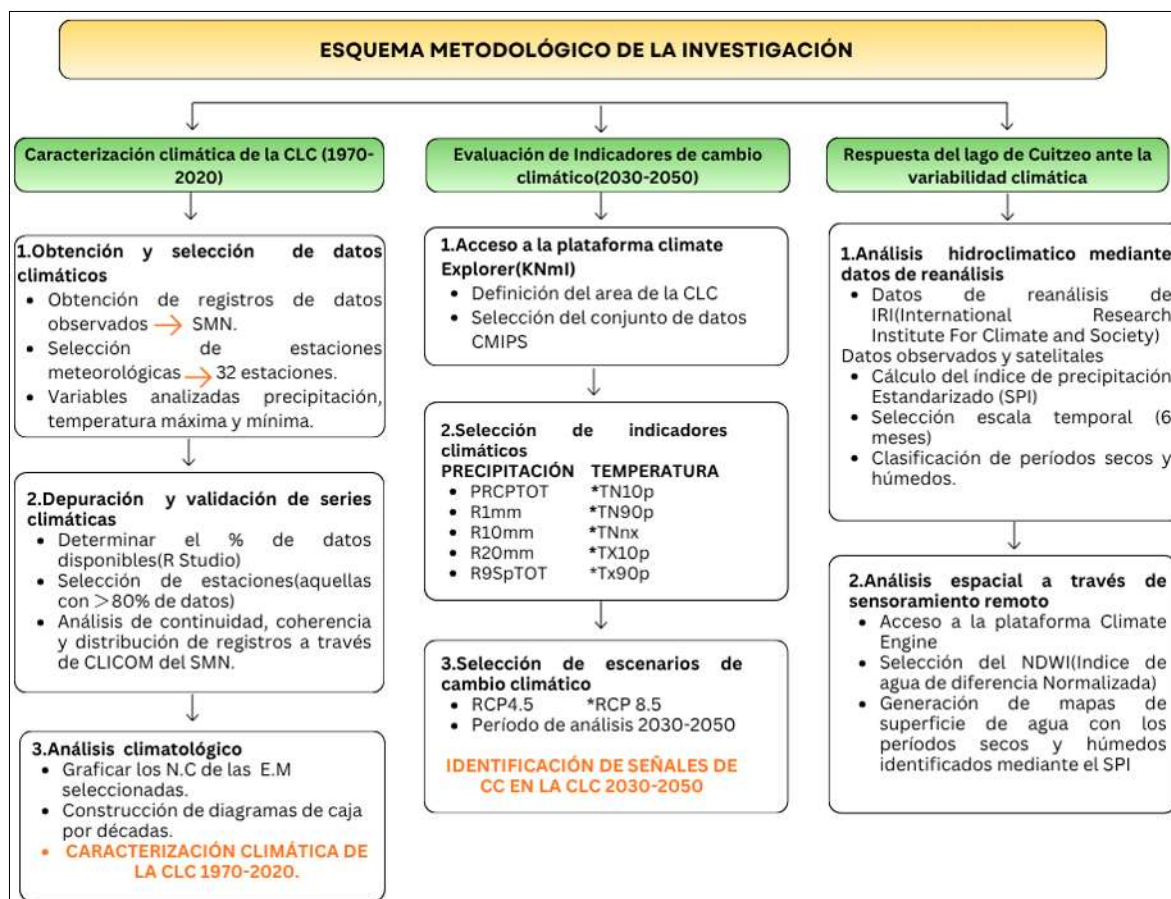


Figura 12. Esquema metodológico para el análisis de la variabilidad y cambio climático en la cuenca del Lago de Cuitzeo.
Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Resultados e interpretación

5.1. Comportamiento climático de la precipitación y temperatura

En este apartado se presentan los resultados relacionados con la disponibilidad y consistencia de los datos de las estaciones meteorológicas, así como la caracterización general de las condiciones de precipitación y temperatura en el área de estudio.

a. Análisis de las bases de datos de estaciones meteorológicas

Una vez realizado el análisis de los registros de las 32 estaciones meteorológicas mediante el software RStudio, se determinó que 12 estaciones presentan una disponibilidad de datos superior al 80 % para las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Por su parte, 17 estaciones registran porcentajes de información entre el 50 % y el 80 %, mientras que 3 estaciones presentan una disponibilidad menor al 50 %. Estos resultados se muestran en la Tabla 9.

Estaciones meteorológicas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo				
Nombre	Código	P (mm)	T Max (C°)	T Min (C°)
Cuitzillo Grande	16028	71.45 %	65.98 %	65.98 %
Cuitzeo	16027	85.11 %	84.14 %	84.14 %
San Miguel del Monte	16114	78.74 %	77.51 %	77.51 %
Acuitzio del Canje	16001	83.06 %	54.87 %	54.87 %
Santiago Undameo	16120	73.17 %	72.93 %	72.93 %
Álvaro Obregón	16004	31.52 %	28.89 %	28.89 %
Cointzio	16022	78.67 %	78.54 %	78.54 %
Álvaro Obregón	16091	96.69 %	96.62 %	96.62 %
El Temazcal	16045	98.44 %	98.41 %	98.41 %
Carrillo Puerto	16016	89.08 %	89.01 %	89.01 %
Capula	16247	56.08 %	56.28 %	56.28 %
Copándaro de Galeana	16023	56.98 %	55.63 %	55.63 %
Pátzcuaro	16087	87.66 %	81.54 %	81.54 %
El Jacal	16034	27.29 %	27.15 %	27.15 %
Santa Fe	16118	89.94 %	89.90 %	89.90 %
Huandacareo	16250	58.98 %	58.76 %	58.76 %
Cerano	11010	91.22 %	91.18 %	91.18 %
Quirio	16105	94.59 %	93.57 %	93.57 %
Moroleón	11047	74.14 %	73.96 %	73.96 %
Presa Malpaís	16096	76.43 %	76.10 %	76.10 %
El Dormido	11156	68.70 %	68.64 %	68.64 %
El Colegio	16512	62.57 %	62.44 %	62.44 %
Piñicuro	11158	64.97 %	63.61 %	63.61 %
Las Cruces Barreras	16231	54.08 %	57.17 %	57.17 %
Zinapécuaro	16145	83.31 %	82.88 %	82.88 %
El Jacal	16513	50.69 %	46.77 %	46.77 %
Huingo	16052	96.07 %	96.05 %	96.05 %
Santa Rita	16119	65.50 %	65.75 %	65.75 %
Ucareo	16255	73.29 %	73.95 %	73.95 %
Morelia	16080	82.28 %	79.64 %	79.64 %
Morelia	16081	98.69 %	98.06 %	98.06 %
Jesús del Monte	16055	95.84 %	95.71 %	95.71 %

Tabla 914. Porcentajes de datos obtenidos para cada estación meteorológica a través de RStudio.
Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA, 2025.

Para la caracterización del clima en la Cuenca del Lago de Cuitzeo se consideraron únicamente aquellas estaciones meteorológicas que presentan una disponibilidad de datos igual o superior al 80 % (Tabla 10), este criterio con base a lo que recomienda la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Estaciones meteorológicas seleccionadas				
Nombre	Código	P (mm)	T Max (C°)	T Min (C°)
Cuitzeo	16027	85.11%	84.14%	84.14%
Álvaro Obregón	16091	96.69%	96.62%	96.62%
El Temazcal	16045	98.44%	98.41%	98.41%
Carrillo Puerto	16016	89.08%	89.01%	89.01%
Pátzcuaro	16087	87.66%	81.54%	81.54%
Santa Fe	16118	89.94%	89.90%	89.90%
Cerano	11010	91.22%	91.18%	91.18%
Quirio	16105	94.59%	93.57%	93.57%
Zinapécuaro	16145	83.31%	82.88%	82.88%
Huingo	16052	96.07%	96.05%	96.05%
Morelia	16081	98.69%	98.06%	98.06%
Jesús del Monte	16055	95.84%	95.71%	95.71%

Tabla 1015. Estaciones meteorológicas con más del 80% de datos en precipitación, temperatura máxima y mínima.

Fuente: Elaboración propia con base en el Sistema Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA, 2025.

En la Tabla 10 se observa que, únicamente 12 estaciones presentan una disponibilidad de datos superior al 80 %. No obstante, este porcentaje de disponibilidad no garantiza por sí mismo la calidad ni la continuidad de los registros. En este sentido, no siempre es posible asegurar que los datos disponibles sean completamente confiables o que estén libres de errores. Además, en muchos casos no resulta evidente a qué periodos corresponden los datos faltantes, lo cual podría afectar la representatividad temporal de las series y, en consecuencia, la solidez del análisis climático.

b. Análisis de la distribución de datos con CLICOM

Posteriormente, se realizó un análisis visual de las series climáticas a través del software CLICOM, enfocado en la identificación de la distribución de los datos, posibles saltos y valores atípicos (Tabla 11).

Estación	Código	Estado de la serie	Observación breve
Cuitzeo	16027	No considerada	Vacío de datos 2005–2011
Álvaro Obregón	16091	No considerada	Alta variabilidad en T min
El Temazcal	16045	No considerada	Salto abrupto en T max
Carrillo Puerto	16016	Considerada	Serie continua y consistente
Pátzcuaro	16087	No considerada	Cambios abruptos en temperatura
Santa Fe	16118	No considerada	Vacíos prolongados en registros
Cerano	11010	No considerada	Salto en T max (1982–1984)
Quirio	16105	No considerada	Inconsistencias y picos aislados
Zinapécuaro	16145	No considerada	Evento extremo de precipitación
Huingo	16052	Considerada	Serie continua y coherente
Morelia	16081	Considerada	Datos consistentes
Jesús del Monte	16055	No considerada	Salto abruptos en temperatura

Tabla 11. Evaluación de la calidad y continuidad de los registros de las estaciones meteorológicas a través de Clicom. **Fuente:** Elaboración propia con base en el Sistema Meteorológico Nacional (SMN), CONAGUA, 2025.

El análisis visual de las series de datos permitió identificar inconsistencias en la continuidad y el comportamiento de los registros meteorológicos en varias estaciones. En las series analizadas se observaron vacíos prolongados, saltos abruptos en los valores de temperatura y algunos eventos extremos aislados que no son consistentes con el comportamiento climático de la región.

Estos comportamientos se observaron principalmente en estaciones como Cuitzeo, Santa Fe y Quirio, donde se identificaron periodos sin registros o discontinuidades. De igual forma, en estaciones como El Temazcal, Cerano y Zinapécuaro se detectaron saltos en las series en los valores de temperatura o precipitación, lo que podría estar asociado con errores de medición, cambios en el instrumental o modificaciones en las condiciones de registro.

En contraste, las estaciones de Carrillo Puerto, Huingo y Morelia presentan registros más continuos y consistentes en las variables analizadas, con una variabilidad interanual acorde con el comportamiento climático de la región. Por ello, se consideraron adecuadas para el análisis climático de la cuenca.

Finalmente, se presenta la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas analizadas en las Figuras 13, 14 y 15; con el fin de entender mejor el contexto en el que se encuentran. Esto permite considerar las características del entorno, tanto naturales como humanas, que podrían influir en el comportamiento de las variables climáticas, especialmente en los registros de temperatura y precipitación.

Al observar la localización de cada estación, se identifican diferencias claras en aspectos como el tipo de cobertura del suelo, el nivel de urbanización, la cercanía a cuerpos de agua y las actividades que predominan en cada zona. Considerar estos elementos resulta importante para interpretar los

resultados de una manera más completa, ya que ayuda a relacionar los patrones climáticos observados con las condiciones propias del lugar donde se ubica cada estación.

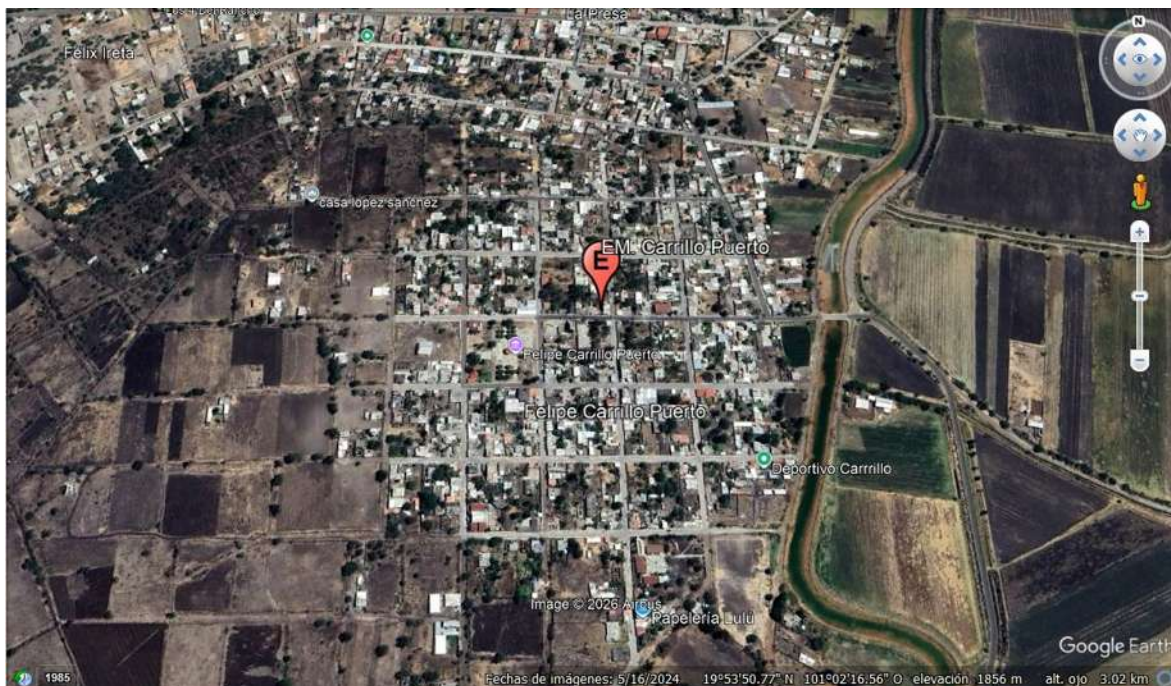


Figura 13. Ubicación geográfica y características del entorno de la estación Carrillo Puerto (16016).

Fuente. Elaboración propia con base en imágenes de Google Earth (2024).

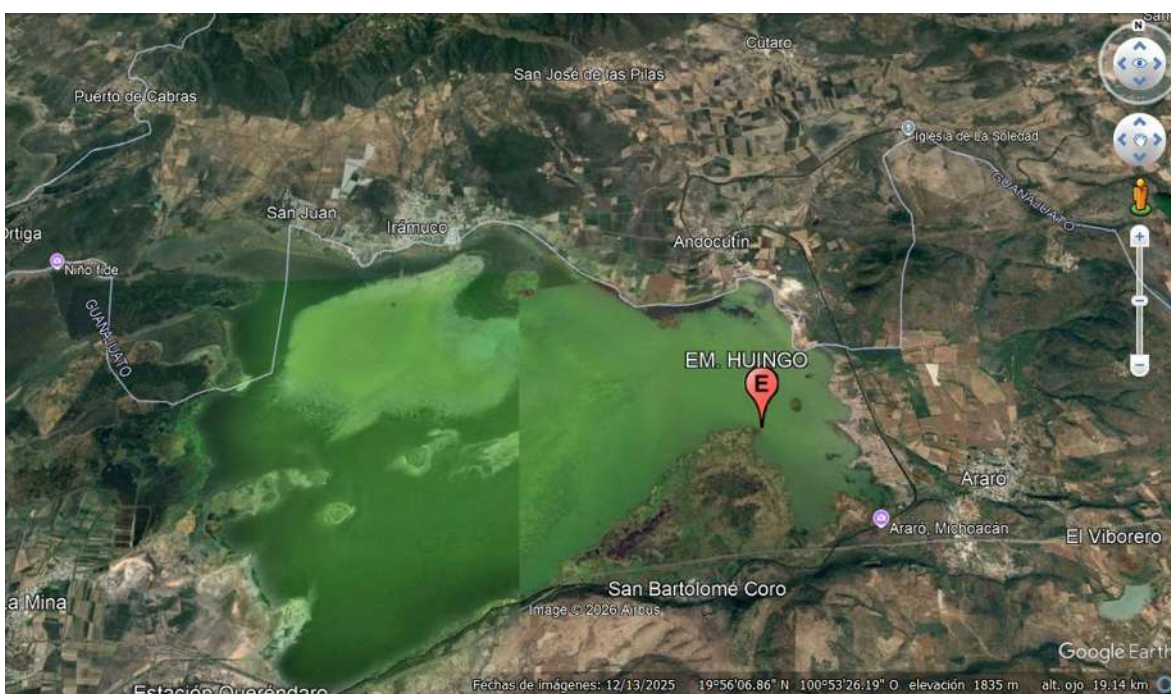


Figura 14. Ubicación geográfica y entorno de la estación meteorológica de Huingo (16052).

Fuente. Elaboración propia con base en imágenes de Google Earth (2024).

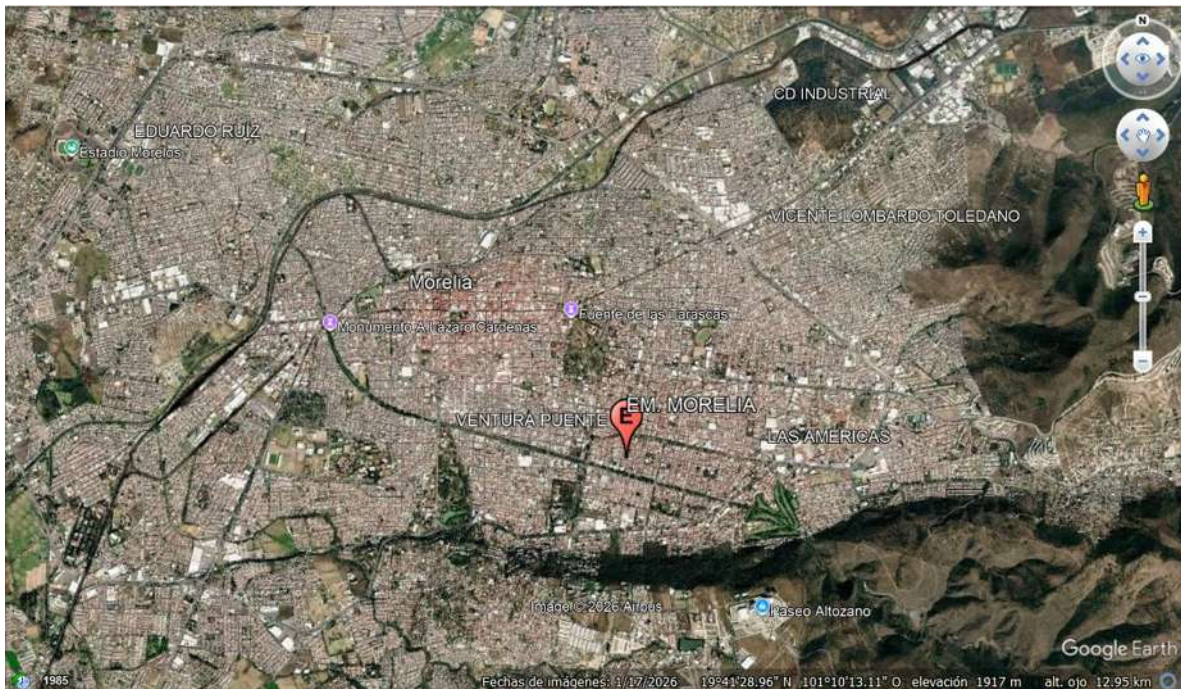


Figura 15. Ubicación geográfica de la estación meteorológica Morelia (16081).

Fuente. Elaboración propia con base en imágenes de Google Earth (2024).

c. Análisis comparativo: Normales Climatológicas de las estaciones meteorológicas: Carrillo Puerto (16016), Huingo (16052) y Morelia (16081).

Con base en las estaciones seleccionadas, se realizó la caracterización del clima en la Cuenca del Lago de Cuitzeo a partir de las normales climatológicas proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional. A partir de estas, se describió el comportamiento de la precipitación, así como de la temperatura, considerando la temperatura máxima mensual, la temperatura mínima mensual, y la temperatura media mensual.

-Precipitación normal mensual

Para iniciar, la Cuenca del Lago de Cuitzeo se caracteriza por un régimen climático bien definido, con periodos secos y húmedos claramente establecidos, lo cual queda reflejado en los gráficos de las normales climatológicas que se presentan a continuación. La temporada de lluvias se presenta a partir de mayo, con un aumento gradual de la precipitación que alcanza su máximo durante los meses de julio y agosto; este comportamiento es representativo del régimen de lluvias de verano que predomina en el centro-occidente de México. Por otro lado, los meses secos van de noviembre a abril, con acumulados de precipitación significativamente más bajos.

La Figura 16, muestra el acumulado medio mensual de precipitación de la estación Carrillo Puerto (16016). Se observa un aumento en la precipitación en el periodo 1991-2020, especialmente en los

meses de mayo, junio, agosto, septiembre y octubre, durante la temporada de lluvias. Además, en los meses secos de marzo, noviembre y diciembre, también se aprecia un incremento en el acumulado, destacando especialmente marzo.

Por otro lado, en los meses de enero, abril y julio, la precipitación disminuyó ligeramente, aunque no de manera significativa. Esto sugiere que, a pesar de algunos cambios, las precipitaciones en estos meses siguen siendo relativamente parecidas en comparación con los otros periodos (1981-2000 y 1991-2010).

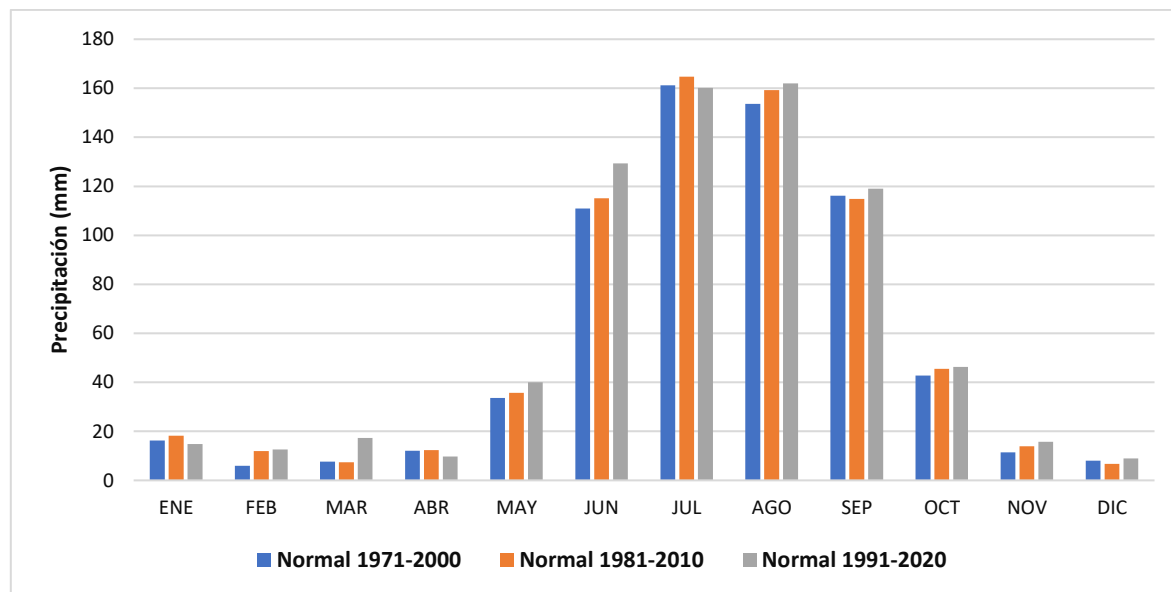


Figura 16. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 17, se presenta el acumulado medio mensual de precipitación de la estación meteorológica Huingo (16052). En este análisis, se observa un incremento en la precipitación durante los meses de mayo, junio, agosto, septiembre y octubre en el periodo más reciente (1991-2020) respecto a los dos anteriores.

Adicionalmente, febrero, marzo y noviembre, meses tradicionalmente secos, también muestran un incremento en la precipitación en el periodo 1991-2020. Esto podría sugerir un cambio en los patrones estacionales de la región, posiblemente asociado con la variabilidad climática. En contraste, los meses de enero, abril, julio y diciembre presentan una ligera reducción en el acumulado mensual, aunque la disminución no es drástica. El mes con mayor precipitación fue agosto, con 198.4 mm en el periodo 1991-2020, destacándose como el mes más lluvioso del año.

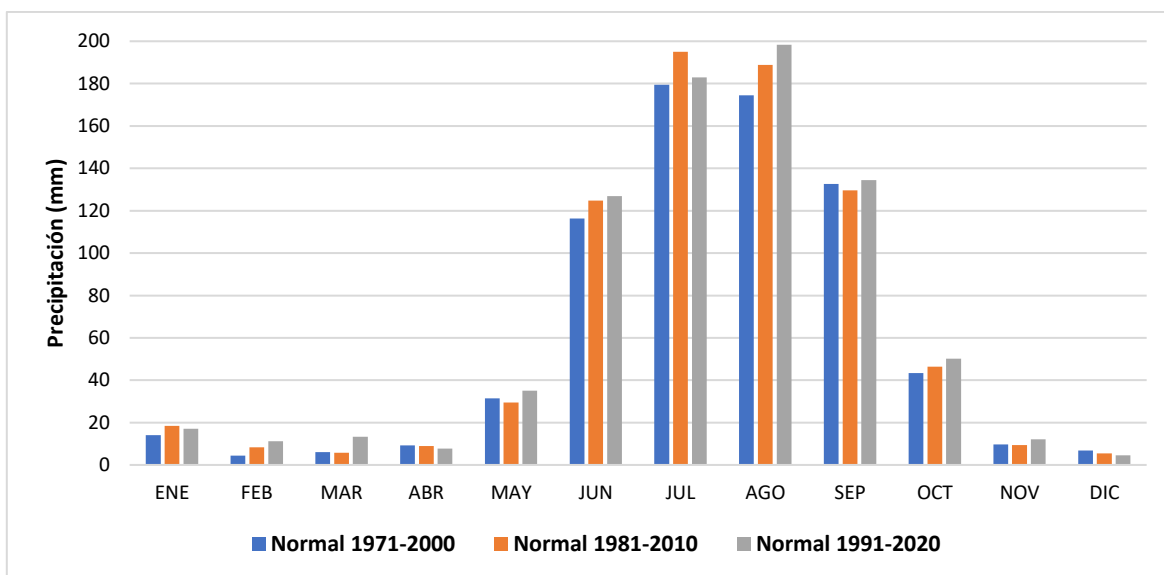


Figura 17. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 18, que muestra el acumulado medio mensual de precipitación de la estación meteorológica Morelia (16081), se observa que, durante la temporada de lluvias, solo mayo experimenta un ligero aumento en el acumulado, con valores que superan los registros de los periodos anteriores. Por otra parte, meses típicos de la temporada de lluvias, como junio, julio, agosto, septiembre y octubre, presentan una reducción en sus valores, especialmente en julio, mes que, en el periodo 1971-2000, marca el mayor acumulado con 184.3 mm.

En cuanto a la temporada seca, enero y diciembre también registran una disminución en el acumulado, lo que resalta una tendencia general de reducción de la precipitación, especialmente en el periodo más reciente (1991-2020). Esta disminución refleja cambios en los patrones de precipitación a lo largo del año, con un énfasis particular en la temporada de lluvias.

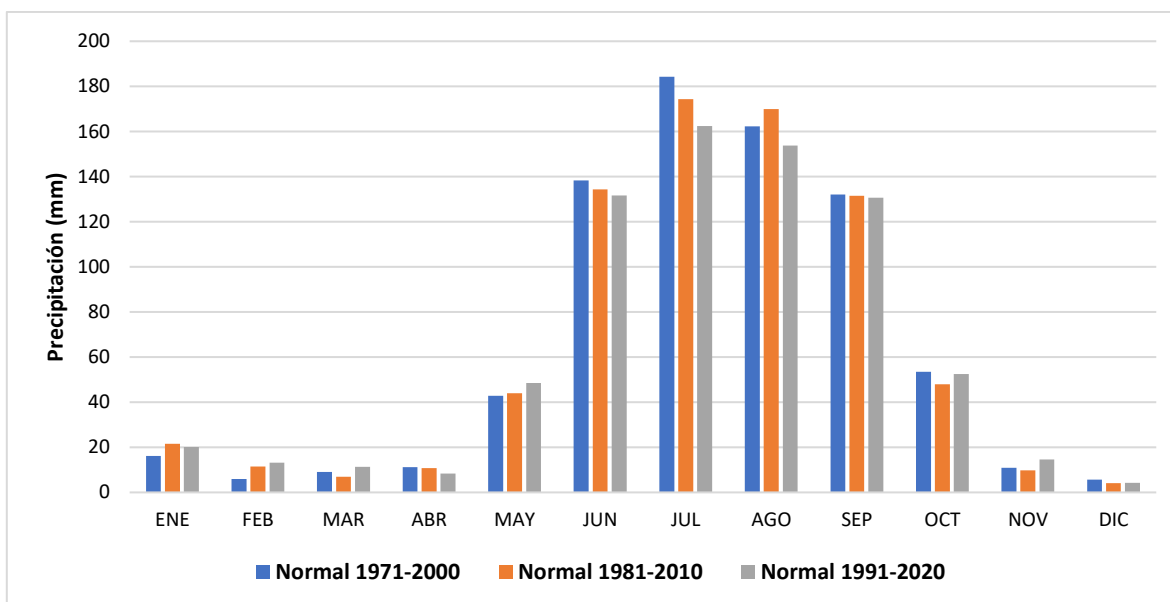


Figura 18. Normales climatológicas del acumulado medio mensual de precipitación (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

Al comparar el acumulado medio mensual de precipitación en las estaciones de Carrillo Puerto (16016), Huingo (16052) y Morelia (16081), se pueden identificar algunos patrones que sugieren cambios en la frecuencia de lluvias en la cuenca. Tanto en Carrillo Puerto como en Huingo, los meses de mayo, junio, agosto, septiembre y octubre muestran un aumento en la precipitación durante el periodo 1991-2020, lo cual podría estar relacionado con fenómenos como El Niño o La Niña, cambio climático global, cambio en el uso del suelo. Además, se observa que en meses secos como marzo y noviembre también existe un incremento, lo que podría indicar que los patrones estacionales están cambiando.

En contraste, en Morelia, los meses de la temporada de lluvias (junio, julio, agosto, septiembre y octubre) muestran una disminución en las precipitaciones, al igual que los meses secos (enero y diciembre), lo que podría reflejar una mayor variabilidad climática o incluso la influencia de factores locales. Por otro lado, en Carrillo Puerto y Huingo se observan cambios en la distribución de las lluvias, con incrementos en los meses de mayor precipitación.

El incremento en la precipitación en meses tradicionalmente secos, como marzo y noviembre, podría ser indicativo de un cambio en los patrones estacionales en la región. Este fenómeno podría estar relacionado con la variabilidad climática natural, aunque también es posible que sea una manifestación de tendencias más amplias de cambio climático que alteran las estaciones. En la

sección de discusión se analizarán a profundidad estos posibles cambios y su relación con fenómenos climáticos globales.

-Temperatura máxima mensual

En la variable de temperatura máxima se observa un comportamiento estacional bien definido, con un incremento progresivo desde enero hasta mayo, mes en el que se alcanzan los valores más altos. Posteriormente, la temperatura disminuye de manera más marcada hacia julio, coincidiendo con el inicio de la temporada de lluvias, y a partir de este punto presenta un descenso gradual hasta diciembre.

Es importante señalar que la temperatura máxima generalmente se mide entre las 2:00 pm y las 4:00 pm, horas de la tarde en las que la radiación solar es más intensa. Durante este tiempo, la superficie terrestre ha absorbido el calor del sol a lo largo del día, lo que provoca que la temperatura alcance su valor máximo. Después de estas horas, la temperatura empieza a bajar gradualmente, ya que el calor acumulado se pierde por radiación, marcando el comienzo del enfriamiento nocturno.

En la Figura 19, se observa el comportamiento de la temperatura máxima mensual en la estación Carrillo Puerto (16016). En el mes de mayo se alcanzan los valores más altos, con 28.4 °C en la normal más reciente (1991–2020), en comparación con 27.5 °C en el periodo 1971–2000, lo que representa un incremento de 1 °C aproximadamente. A partir de mayo, la temperatura disminuye hacia julio, donde alcanza los 24.4 °C en la normal más reciente, y posteriormente continúa con un descenso gradual hasta alrededor de 24 °C en diciembre.

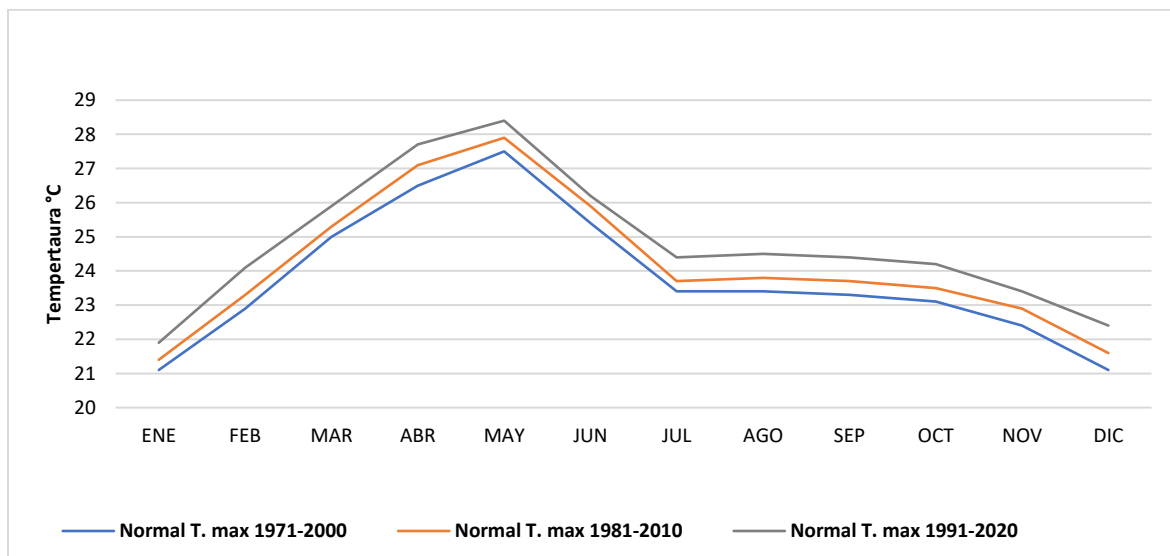


Figura 19. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 20 se presenta el comportamiento de la temperatura máxima mensual en la estación Huingo (16051). En este caso, no se identifica una tendencia clara de incremento o disminución entre los periodos analizados. El valor máximo se presenta en el mes de mayo en la normal más reciente, con 29.8 °C. Posteriormente, la temperatura desciende hacia julio, donde alcanza 25.9 °C, y continúa con un descenso gradual hasta 23.2 °C en diciembre.

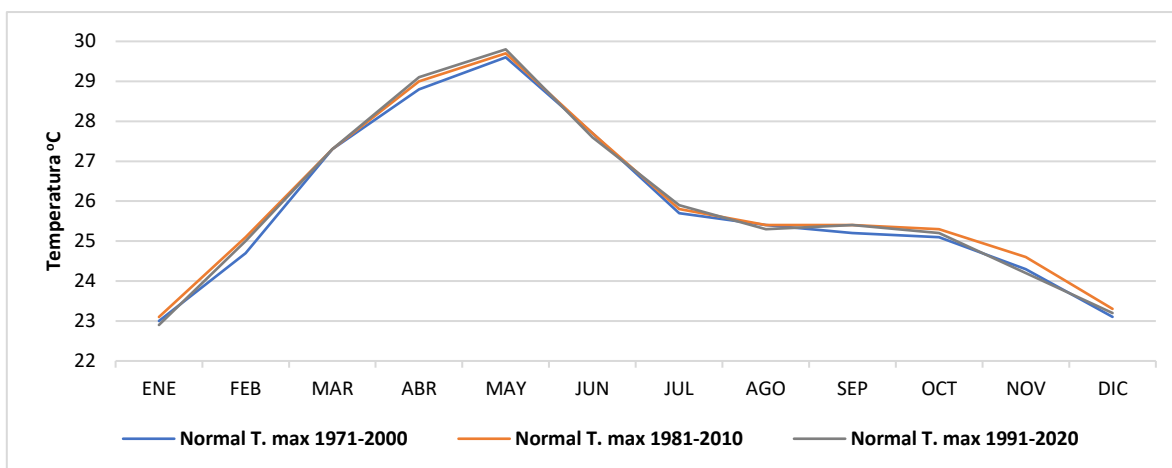


Figura 20. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 21 se puede evidenciar como la temperatura máxima mensual en la estación Morelia (16081) se ha manifestado. A diferencia de lo observado en Carrillo Puerto y Huingo, la normal más reciente (1991–2020) presenta los valores más bajos. El valor máximo se registra en el mes de mayo, con 29.9 °C, en contraste con los 31.5 °C del periodo 1971–2000, lo que representa una disminución de 1.6 °C.

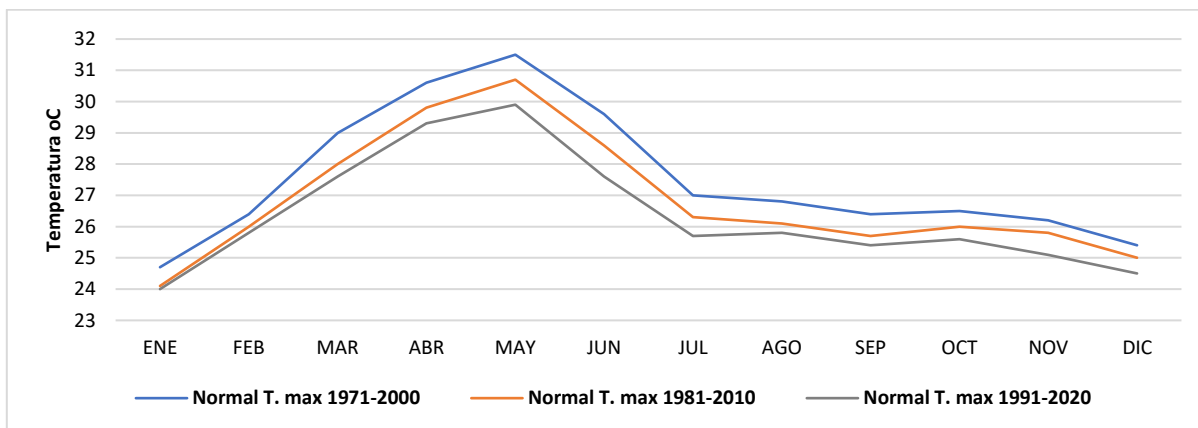


Figura 21. Normales climatológicas mensuales de temperatura máxima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

El incremento térmico observado en la estación de Carrillo Puerto puede estar asociado al crecimiento urbano de la localidad. La modificación de la cobertura del suelo y la falta de vegetación contribuyen al efecto de isla de calor, generando un aumento en las temperaturas máximas. En contraste, Huingo, situada a mayor altitud y con una proximidad al Lago de Cuitzeo, muestra un comportamiento térmico más estable. La cercanía al agua actúa como un regulador térmico natural, mientras que la menor urbanización y el entorno rural favorecen una moderación de las temperaturas a lo largo del año.

Por otro lado, en Morelia, se observa una disminución de 1.6 °C en las temperaturas máximas en la normal más reciente (1991–2020). Este enfriamiento podría explicarse por un aumento en la nubosidad y la mayor urbanización, lo que genera sombra urbana y distribución irregular de la radiación solar, limitando el calentamiento durante el día. A pesar de tener una altitud similar a la de Huingo, la combinación de estos factores podría estar reduciendo el calentamiento en la ciudad, especialmente durante los meses de mayor temperatura.

El calentamiento observado en Carrillo Puerto y el enfriamiento en Morelia sugieren que el cambio climático global podría influir tanto en el aumento como en la disminución de las temperaturas máximas, dependiendo de las características locales de cada estación y su entorno específico.

-Temperatura mínima mensual

En la variable de temperatura mínima, se observa un patrón estacional claro, con un aumento gradual desde enero hasta junio, cuando se alcanzan las temperaturas más altas del año. A partir de junio, la temperatura experimenta una disminución leve hasta septiembre, seguida de un descenso más pronunciado hacia diciembre.

La temperatura mínima se mide en las primeras horas de la mañana, entre las 5:00 am y las 7:00 am, cuando la radiación solar es casi nula y la superficie terrestre ha perdido el calor acumulado durante la noche. En este momento, la atmósfera alcanza su punto más frío, ya que no hay radiación solar para contrarrestar la pérdida de calor. Después de estas horas, la temperatura comienza a subir gradualmente marcando el inicio del calentamiento diurno.

En la Figura 22 se presenta el comportamiento de la temperatura mínima mensual en la estación Carrillo Puerto (16016). La normal más reciente (1991–2020) muestra una disminución en los meses de enero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto y diciembre, con una reducción promedio de 0.3 °C en comparación con los periodos anteriores (1971–2000 y 1981–2010). Por otro lado, en los

meses de febrero, septiembre, octubre y noviembre, se observa un incremento de 0.1 °C. En el mes de junio, se registra la temperatura mínima más alta en los tres periodos, alcanzando 13.1 °C en la normal de 1971–2000 y 12.8 °C en la normal más reciente, lo que implica una ligera disminución en comparación con los valores más antiguos. Las temperaturas más bajas se registran en los meses de enero y diciembre, con valores por debajo de 5 °C en todos los periodos.

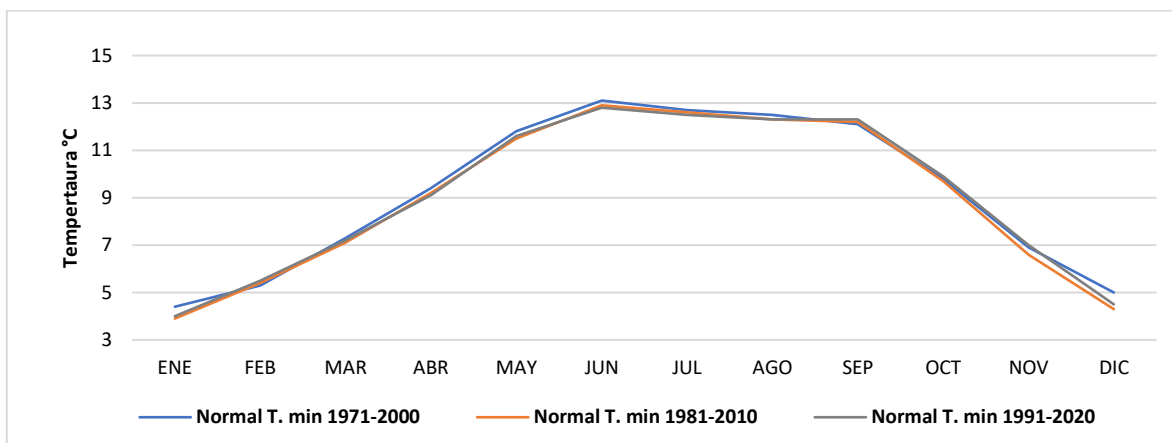


Figura 22. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 23, se observa la tendencia de la temperatura mínima mensual para la estación de Huingo (16052). En comparación con la normal 1971–2000, la temperatura mínima en la normal más reciente (1991–2020) presenta un incremento promedio de 0.45 °C desde enero hasta noviembre, lo que indica un ligero incremento en las temperaturas mínimas a lo largo del año. Sin embargo, en el mes de diciembre, se observa una disminución de 0.5 °C, lo que sugiere una variabilidad estacional dentro de los meses más fríos. El mes de junio es el que registra la temperatura mínima más alta de los tres periodos, alcanzando 13.6 °C en la normal más reciente (1991–2020). En cuanto a las temperaturas más bajas, los meses de enero, febrero y diciembre presentan valores inferiores a 5 °C en las tres normales climatológicas.

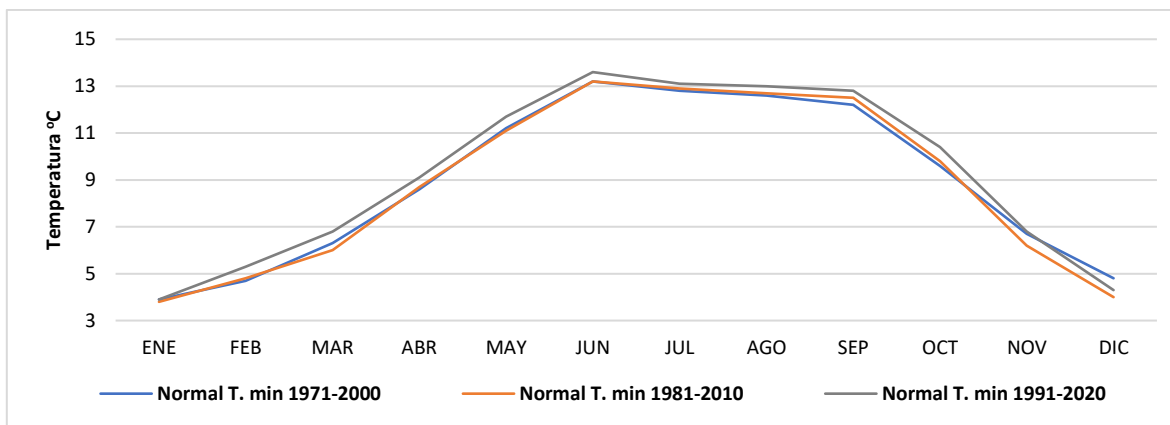


Figura 23. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 24, se presenta el patrón de la temperatura mínima mensual en la estación de Morelia (16081). En general, se observa un incremento promedio de 1.6 °C en la temperatura mínima a lo largo del año, con un aumento más pronunciado en el mes de febrero, que pasa de 6.3 °C en la normal 1971–2000 a 8.5 °C en la normal 1991–2020, lo que representa un incremento de 2.2 °C. Este comportamiento sugiere una tendencia a temperaturas nocturnas más cálidas. El mes de junio presenta la temperatura mínima más alta de todo el año, alcanzando 14.1 °C en la normal más reciente. En cuanto a las temperaturas más bajas, se registran en los meses de enero y diciembre, con valores menores a 8 °C en todas las normales climatológicas.

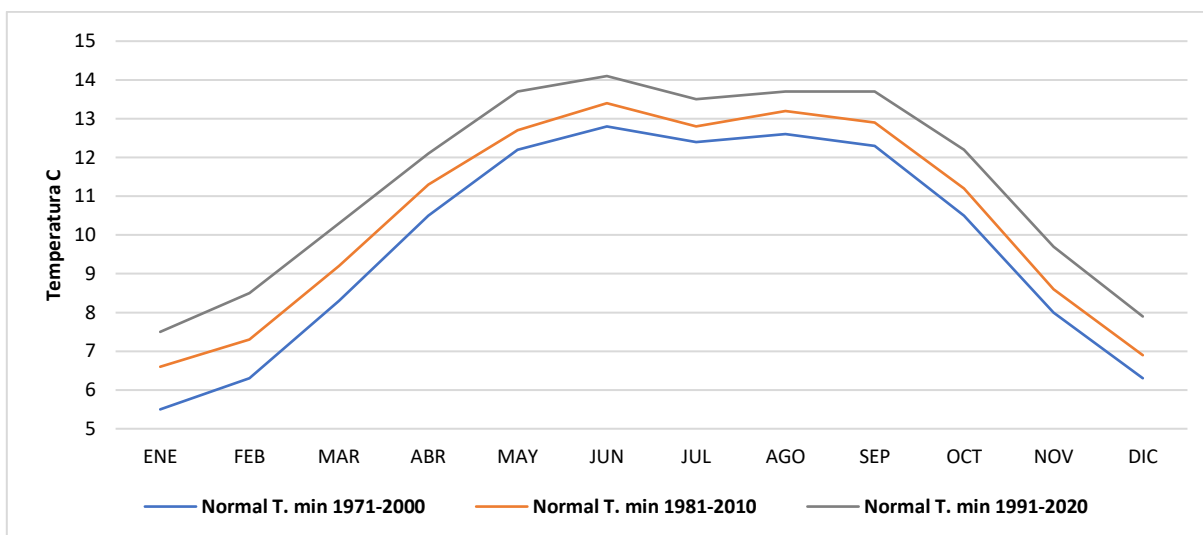


Figura 24. Normales climatológicas mensuales de temperatura mínima mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

La temperatura mínima está influenciada por las condiciones nocturnas. Durante la temporada de lluvias (mayo-octubre), la nubosidad reduce el enfriamiento nocturno, lo que genera temperaturas mínimas más altas. En los meses secos (noviembre-abril) con cielos despejados, el enfriamiento nocturno es más marcado, resultando en temperaturas mínimas más bajas.

Al comparar las normales climatológicas de cada estación, se aprecian cambios en los valores de temperatura mínima, aunque el patrón anual se mantiene similar. En las estaciones de Huingo y Morelia, las normales más recientes (1991-2020) muestran valores más altos en comparación con la normal de 1971-2000. Este incremento indica que, en general, las noches y mañanas son menos frías en los períodos más recientes, lo que podría estar ligado con la tendencia global de calentamiento nocturno que se ha observado en muchas regiones debido al cambio climático y al aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. La humedad relativa más alta durante los meses de lluvias también puede haber favorecido este incremento de las temperaturas mínimas.

Por otro lado, en la estación de Carrillo Puerto, la temperatura mínima ha disminuido muy ligeramente, con un promedio de 0.27 °C en la normal más reciente. Este leve descenso puede estar relacionado con factores más específicos de la región, como la variabilidad climática natural, cambios en la cobertura del suelo o las condiciones meteorológicas locales. A pesar de la tendencia general de aumento en las temperaturas mínimas, ciertos factores específicos de la estación, como la menor urbanización y posibles variaciones en los fenómenos climáticos locales, podrían haber generado este ligero enfriamiento nocturno.

-Temperatura media mensual

La temperatura media nos permite comprender el comportamiento general del clima en la cuenca durante el periodo en análisis. Representa el promedio de las temperaturas máximas y mínimas registradas, y permite observar tendencias generales sin la influencia de extremos tan marcados como las temperaturas máximas o mínimas.

La temperatura media mensual muestra un aumento progresivo desde los meses de enero hasta su punto máximo en mayo, seguido por un descenso gradual hasta septiembre y luego una caída más evidente hasta diciembre en las tres estaciones meteorológicas. Este patrón refleja las características estacionales del clima de la cuenca, influenciado por varios factores naturales y locales.

En la Figura 25, se muestra el comportamiento de la temperatura media mensual en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016). Se observa que la normal correspondiente al periodo más reciente (1991-2020) es más alta que las normales de los periodos anteriores, alcanzando una temperatura máxima de 20 °C en el mes de mayo. A lo largo del periodo, la temperatura media incrementó en promedio 0.5 °C, destacándose el mes de febrero, que experimentó un aumento de 0.7 °C con respecto a las normales anteriores.

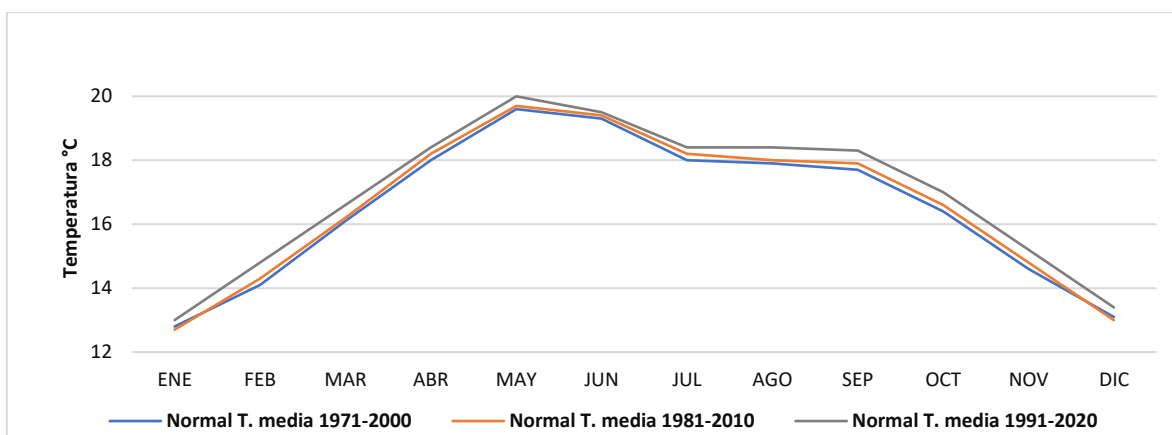


Figura 25. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 26 se analiza la variación de la temperatura media mensual de la estación meteorológica Huingo (16052). Se observa que la normal climatológica más reciente (1991-2020) presenta un incremento de 0.2 °C con respecto a la normal de 1971-2000. El mes de mayo registra la temperatura media más alta, alcanzando 20.8 °C. Los meses con el mayor incremento en comparación con la normal más antigua son febrero y octubre, con un aumento de 0.5 °C en cada uno.

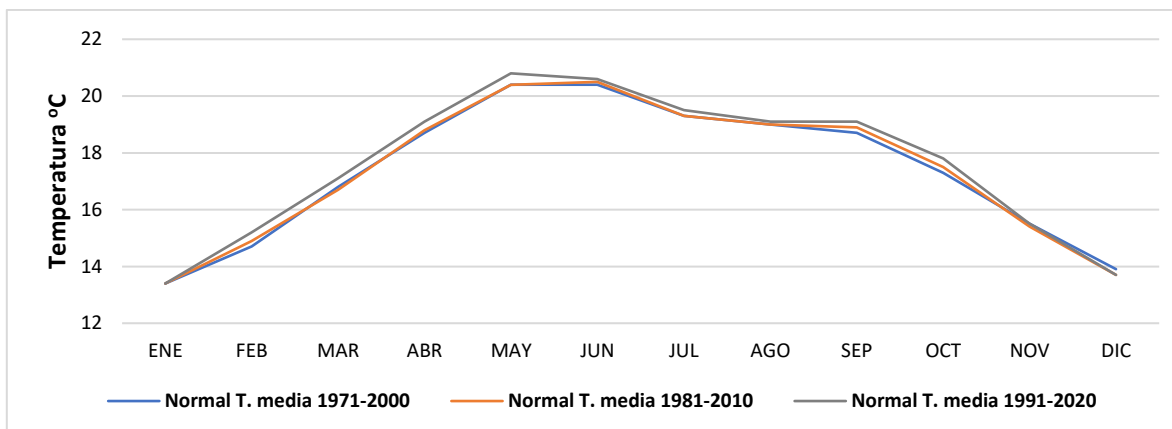


Figura 26. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Huingo (16052), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

En la Figura 27 se presenta la tendencia climática de la temperatura media de la estación meteorológica Morelia (16081). En la normal climatológica más reciente, la temperatura media muestra un incremento promedio de 0.3 °C, con la excepción de los meses de junio y julio, donde se observa una ligera disminución. Los meses que destacan por su aumento son enero y febrero, con incrementos de 0.7 °C y 0.9 °C, respectivamente. Finalmente, mayo es el mes con la temperatura media más alta, alcanzando un valor de 21.8 °C.

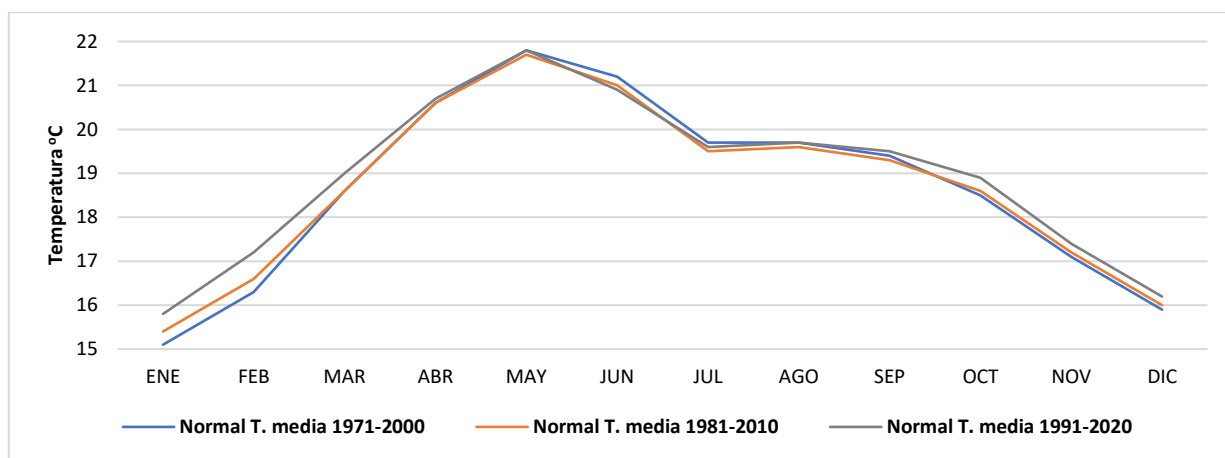


Figura 27. Normales climatológicas mensuales de temperatura media mensual (1971–2000, 1981–2010 y 1991–2020) en la estación meteorológica Morelia (16081), cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el SMN.

Entre las estaciones meteorológicas analizadas se observan diferencias en los valores de temperatura media mensual. En términos generales, las estaciones de Morelia y Huingo registran temperaturas ligeramente superiores en comparación con Carrillo Puerto, particularmente durante los meses más cálidos del año. Estas variaciones pueden estar asociadas a condiciones locales propias de cada estación, como la altitud, las características del entorno inmediato y el uso del suelo, factores que influyen directamente en el balance térmico.

A lo largo de los distintos periodos climatológicos (1971-2000, 1981-2010, y 1991-2020), el patrón anual de la temperatura media mensual se mantiene en las tres estaciones. Sin embargo, en los periodos más recientes, los valores de la temperatura media tienden a ser ligeramente más altos, lo que es consistente con las tendencias observadas en las temperaturas mínimas y máximas mensuales. Este incremento refleja, en parte, el calentamiento global y los cambios climáticos locales. Además, en la estación de Morelia, donde las noches tienden a ser menos frías debido al efecto urbano, este incremento es aún más evidente.

En términos generales, la temperatura media mensual refleja el comportamiento general de las variables térmicas analizadas, manteniendo una estacionalidad definida, pero con diferencias en los

valores entre estaciones y periodos. Estas variaciones pueden asociarse tanto a la variabilidad climática natural como al cambio climático global, y también a las condiciones locales específicas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, que modulan la forma en que las temperaturas se comportan en cada estación.

d. Boxplots (Diagramas de cajas)

Para profundizar en el análisis del comportamiento climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se construyeron diagramas de caja (boxplots) con datos diarios distribuidos en periodos de 10 años (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020) para las estaciones meteorológicas de Carrillo Puerto (16016), Huingo (16052) y Morelia (16081). Este intervalo de tiempo facilita la identificación de cambios significativos en el clima de la cuenca, permitiendo una visión más estable de la variabilidad climática y posibles señales de cambio climático. Los boxplots ayudan a identificar no solo eventos extremos, sino también variaciones importantes en los valores de las variables que se presentan a continuación: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media.

-Precipitación media diaria

La precipitación, como se mencionó en apartados anteriores, es un factor fundamental para comprender el clima de la Cuenca del Lago de Cuitzeo y su relación directa con el cuerpo de agua. Dado que la recarga del lago depende en gran medida del agua proveniente de las lluvias y los escurrimientos superficiales, el análisis de la precipitación es esencial para evaluar cómo la variabilidad climática puede influir en el balance hídrico de la región. Este análisis proporciona información clave sobre los patrones de lluvia y cómo los cambios en la intensidad o distribución de las precipitaciones.

En la Figura 28 se observa la distribución de la precipitación diaria agrupada en décadas (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020) de la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016). Aunque no se evidencia un aumento claro en la precipitación media a lo largo de los periodos, se observa una gran variabilidad entre las décadas. La mediana de la precipitación oscila generalmente alrededor de los 4 mm, lo que indica que la mayoría de los valores se encuentran cercanos a este valor. El primer cuartil (Q1) se sitúa cerca de los 1.5 mm, mientras que el tercer cuartil (Q3) se aproxima a los 8 mm, lo que sugiere que el 50% de las precipitaciones están concentradas en este rango. El valor máximo en todos los periodos se acerca a los 20 mm, lo que

indica que las precipitaciones diarias no exceden significativamente este valor en la mayoría de los casos.

La presencia de valores atípicos en todos los períodos es notable, lo que indica que han ocurrido eventos de precipitación inusualmente altos en cada década. Estos valores atípicos varían entre los 20 mm y los 30 mm. Además, los valores extremos (puntos más alejados de los bigotes) también están presentes en todas las décadas. Sin embargo, se observa que en los periodos 1991-2000 y 2001-2010 los valores extremos alcanzan los 91 mm y 98 mm, respectivamente, lo que sugiere que en estos años se produjeron eventos de precipitación muy intensos.

Por último, el sesgo positivo (asimetría a la derecha) del boxplot indica que la mayor parte de los registros están concentrados en valores inferiores a los 20 mm, con algunos picos de precipitación mucho mayores, lo que resalta la variabilidad en los eventos de precipitación en la región.

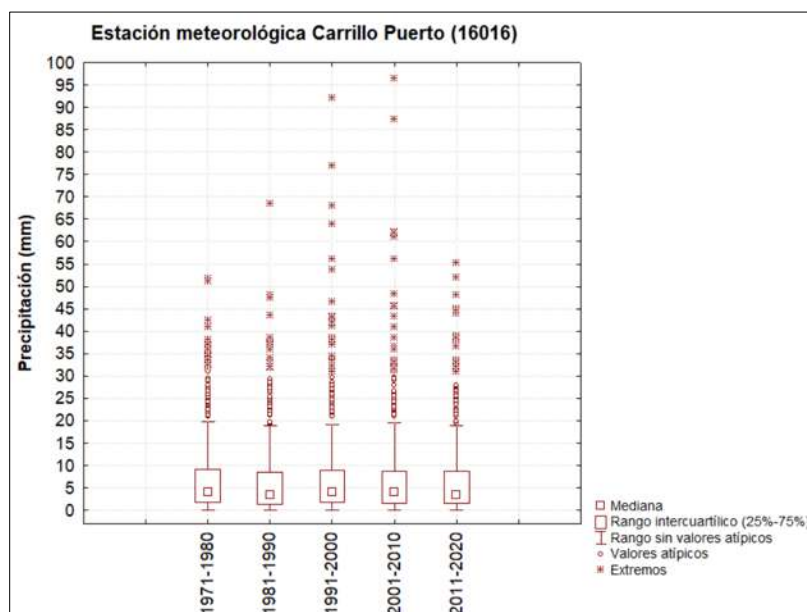


Figura 28. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 29 se presenta la distribución de la precipitación diaria agrupada en décadas de la estación Huingo (16052) para los periodos 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020. No se observa un incremento sostenido en la precipitación a lo largo de las décadas, sino una marcada variabilidad. En términos de los cuartiles, el primer cuartil (Q1) muestra una ligera tendencia a la baja, aunque esta variación es poco pronunciada, llegando a los 2 mm en la última década (2011-2020). La mediana de las precipitaciones se mantiene relativamente constante, con

un valor cercano a los 5 mm en todos los periodos, lo que sugiere que la distribución central se mantiene estable. El tercer cuartil (Q3) se sitúa en torno a los 9 mm en la mayoría de los periodos.

El valor máximo de la precipitación muestra una mayor variabilidad entre décadas, con picos más altos en la década de 1991-2000, donde el máximo se encuentra entre los 18 mm y 21 mm. Sin embargo, la presencia de valores atípicos es significativa en todas las décadas, siendo los más altos en el periodo 1991-2000, con valores que oscilan entre los 22 mm y 33 mm. Estos valores atípicos reflejan eventos de precipitación inusualmente altos, que pueden estar relacionados con fenómenos climáticos extremos o eventos de tormentas intensas.

Por otro lado, los valores extremos también se presentan en todas las décadas. Aunque estos valores son más notorios en los periodos más recientes, especialmente en 2011-2020, donde el valor más alto registrado alcanza los 95 mm, un incremento considerable con respecto a los periodos anteriores. Este comportamiento sugiere que, aunque no hay un aumento sostenido en la precipitación promedio, sí se han intensificado los eventos de precipitación extrema en los últimos años.

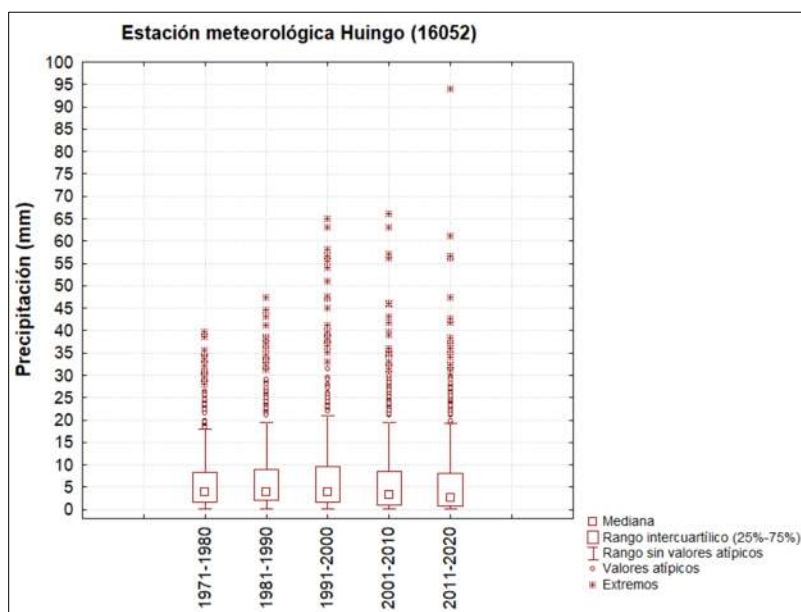


Figura 29. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 30 se presenta la distribución de la precipitación diaria agrupada en décadas para la estación meteorológica Morelia (16081) en los periodos 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020. A diferencia de las estaciones anteriores, en este caso se observa una tendencia general a la disminución en la precipitación.

Esta reducción es evidente tanto en el primer cuartil (Q1) como en la mediana, la cual pasa de aproximadamente 4 mm en la década de 1971-1980 a cerca de 2 mm en el periodo más reciente (2011-2020). Aunque se presentan ligeras fluctuaciones entre décadas, el comportamiento general muestra una disminución progresiva en la distribución central de los datos.

En cuanto a los valores máximos, también se observa una reducción, pasando de aproximadamente 19 mm a 14 mm, lo que indica que incluso las precipitaciones más altas dentro del rango típico han disminuido. Los valores atípicos se presentan en todos los periodos, reflejando la ocurrencia de eventos de lluvia intensa; sin embargo, en la última década estos valores son menores en comparación con décadas anteriores, con registros que disminuyen hasta alrededor de 23 mm.

De manera similar, los valores extremos muestran una reducción en su magnitud. Mientras que en la década de 1971-1980 se registra un valor extremo cercano a 75 mm, y en 1991-2000 alrededor de 66 mm, en el periodo más reciente el valor máximo alcanza aproximadamente 64 mm, evidenciando una disminución en la intensidad de los eventos más extremos.

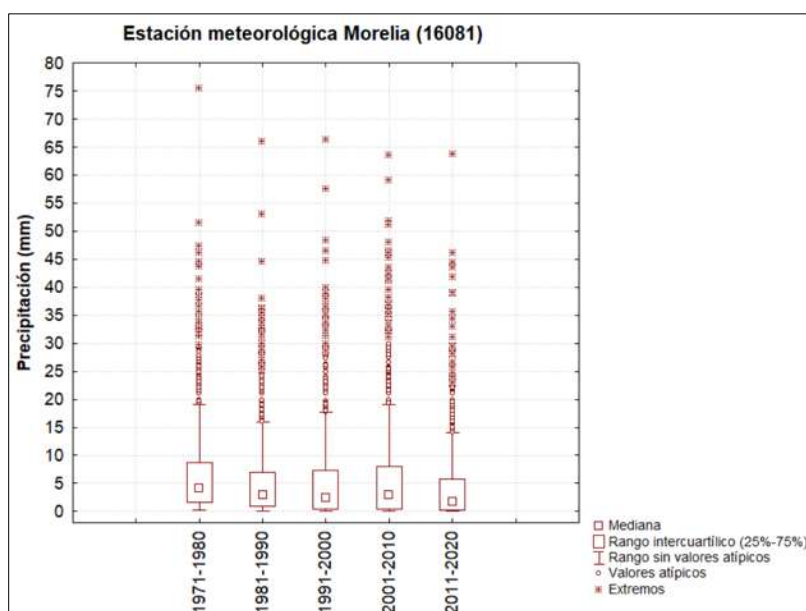


Figura 30. Distribución decadal de la precipitación diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

Al comparar la distribución de la precipitación diaria agrupada en décadas, entre las estaciones de Carrillo Puerto, Huingo y Morelia, se observan comportamientos distintos que permiten identificar cómo varía la lluvia dentro de la cuenca. En Carrillo Puerto y Huingo no se identifica una tendencia clara de incremento o disminución, sino más bien una variabilidad entre décadas. Sin embargo, en

ambas estaciones es constante la presencia de valores atípicos y extremos, los cuales se vuelven más notorios a partir de la década de 1991-2000. Esto sugiere que, aunque la precipitación en términos generales se mantiene, sí han ocurrido eventos de lluvia más intensos en las últimas décadas.

Por otro lado, la estación de Morelia presenta un comportamiento diferente, ya que muestra una disminución progresiva en la precipitación. Esta reducción no solo se observa en la mediana, sino también en los cuartiles y en los valores máximos, lo que indica que tanto las condiciones normales de precipitación como los eventos más intensos han disminuido con el tiempo.

Estas diferencias pueden estar relacionadas con condiciones locales de cada estación. Por ejemplo, en el caso de Huingo, su cercanía al Lago de Cuitzeo podría influir en la disponibilidad de humedad, favoreciendo la ocurrencia de eventos de precipitación más intensos. En Carrillo Puerto, las condiciones locales también podrían estar favoreciendo lluvias de tipo convectivo. Por otro lado, en Morelia, factores como la urbanización y los cambios en el uso de suelo podrían estar influyendo en la disminución de la precipitación y en la menor intensidad de los eventos extremos.

-Temperatura máxima diaria

La temperatura máxima permite analizar el comportamiento del calentamiento diurno en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. A partir de esta variable se puede observar cómo han cambiado los valores más altos a lo largo del tiempo, así como la frecuencia con la que se presentan temperaturas elevadas. Su análisis es relevante, ya que influye directamente en procesos como la evaporación y, en consecuencia, en la dinámica del cuerpo de agua.

Además, el estudio de su distribución permite identificar no solo cambios en los valores centrales, sino también en la dispersión y en la ocurrencia de eventos extremos, lo cual resulta clave para comprender posibles señales de variabilidad y cambio climático en la región.

La Figura 31 muestra el comportamiento de la temperatura máxima en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016) para el periodo 1971–2020, distribuido en décadas. En esta estación se observa un incremento progresivo en la temperatura máxima a lo largo del tiempo.

Este aumento es evidente en toda la distribución de los datos. Los valores mínimos pasan de aproximadamente 18 °C a 20 °C, mientras que el primer cuartil (Q1) se incrementa de 22 °C a 24 °C. De manera similar, la mediana aumenta de 23 °C a 26 °C, y el tercer cuartil (Q3) de 25 °C a 27 °C, lo

que indica que no solo los valores extremos, sino también la mediana de la temperatura, han aumentado con el tiempo.

En cuanto a los valores máximos, estos también muestran un incremento, pasando de alrededor de 29 °C a 31 °C. Además, se observa la presencia de valores atípicos tanto por encima como por debajo de la mediana en todas las décadas, lo que refleja la variabilidad en los registros.

Destaca también el aumento en los valores extremos superiores, alcanzando temperaturas cercanas a los 34 °C. Este comportamiento podría estar relacionado con un incremento en la radiación solar, la disminución de la cobertura vegetal o cambios en el uso de suelo, factores que favorecen un mayor calentamiento durante el día. Por otro lado, se identifican algunos valores extremos inferiores, particularmente en la última década, donde se registra un valor cercano a los 3 °C, lo cual podría estar asociado a condiciones atípicas de registro o eventos poco frecuentes.

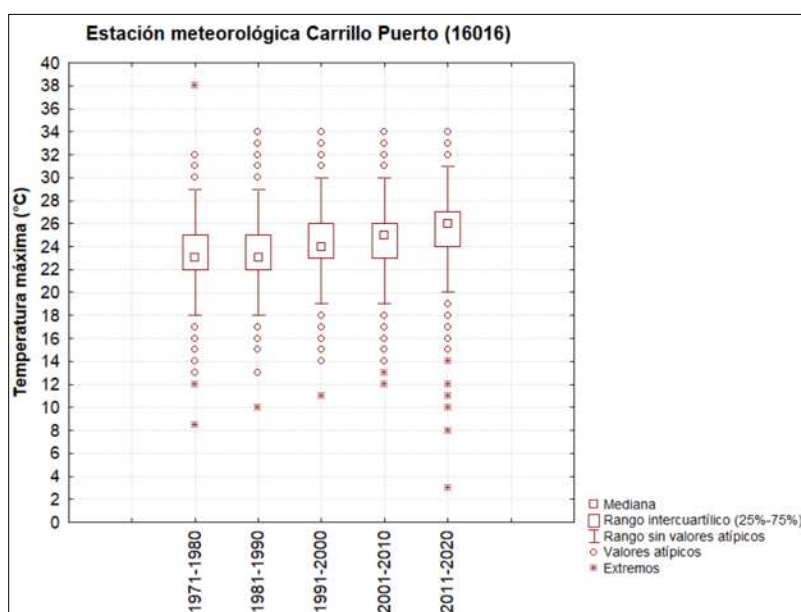


Figura 31. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 32 se muestra la distribución de la temperatura máxima en la estación meteorológica Huingo (16052), donde se aprecia un comportamiento variable a lo largo de las décadas. A diferencia de lo observado en la estación de Carrillo Puerto, aquí no se identifica una tendencia uniforme, sino cambios que dependen del nivel de la distribución. Los valores más bajos tienden a disminuir ligeramente, pasando de aproximadamente 19.5 °C a 17 °C, lo cual también se refleja en el primer cuartil (Q1), que desciende de 24 °C a cerca de 23.5 °C. En contraste, los valores más altos dentro

del rango típico muestran un ligero incremento, ya que el tercer cuartil (Q3) pasa de 27 °C a 28 °C, indicando que las temperaturas elevadas tienden a intensificarse en ciertos periodos.

La mediana se mantiene relativamente estable, oscilando entre 25 °C y 26 °C, con un valor cercano a 25.5 °C en la última década, lo que sugiere que la mediana no ha cambiado de forma significativa. Sin embargo, al observar los registros máximos, se identifica un incremento general de 31.5 °C a 34 °C, con una ligera disminución en la década 2001-2010. En cuanto a los valores atípicos, estos se distribuyen tanto por debajo como por encima de la mediana. Los valores inferiores muestran una tendencia a la baja, pasando de aproximadamente 15 °C a 12 °C, mientras que los superiores presentan variabilidad, alcanzando registros entre 33.5 °C y 37 °C. Por otro lado, los valores extremos se concentran por debajo de la mediana, destacando un valor cercano a 12 °C en la década de 2001-2010.

Este comportamiento, en el que los valores altos tienden a incrementarse mientras que los bajos disminuyen, podría estar asociado a una mayor amplitud térmica diaria, posiblemente influenciada por condiciones locales como la altitud, la cercanía al Lago de Cuitzeo y la menor urbanización. En conjunto, la estación Huingo refleja un comportamiento dominado por la variabilidad, más que por una tendencia clara de incremento o disminución.

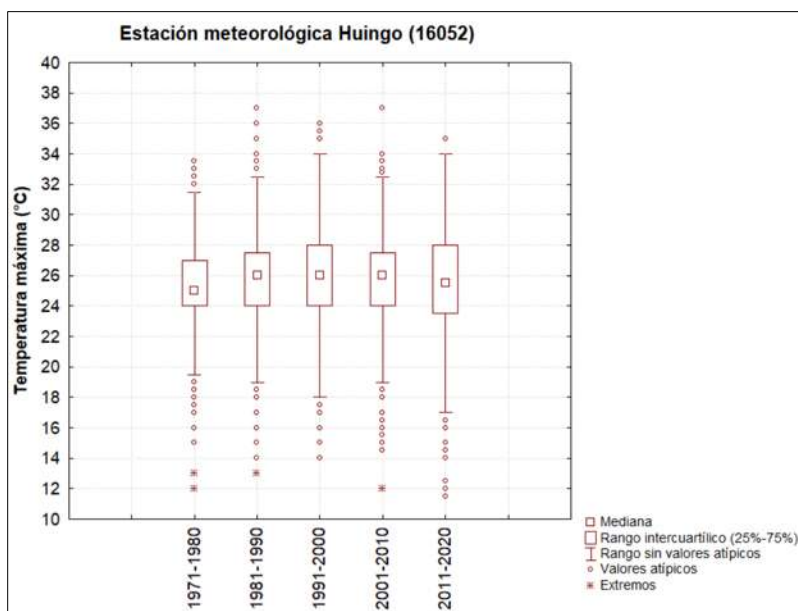


Figura 32. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 33 se observa el comportamiento de la temperatura máxima en la estación meteorológica Morelia (16081) para el periodo 1971-2020, distribuido en cinco décadas. En esta

estación se identifica, en general, una tendencia a la disminución. Esta reducción se aprecia en distintos niveles de la distribución. Los valores más bajos pasan de aproximadamente 20 °C a 18 °C, y el primer cuartil (Q1) disminuye de 26 °C a 24 °C. La mediana también presenta un descenso claro, pasando de 28 °C a 26 °C, lo anterior evidencia una tendencia a la disminución en el valor central (mediana) de la temperatura a lo largo del periodo analizado.

Algo similar ocurre en la parte superior de la distribución. El tercer cuartil (Q3), aunque muestra cierta variabilidad entre décadas, disminuye de 30 °C a 28 °C, y los valores más altos dentro del rango típico pasan de alrededor de 36 °C a 34 °C. Esto sugiere que no solo bajan los valores centrales, sino también las temperaturas máximas. En los valores atípicos también se observan cambios. En la última década, los registros por debajo de la mediana son los más bajos, alcanzando aproximadamente 12.5 °C. Por encima de la mediana, los valores también son menores en comparación con la primera década, donde se registraban hasta 38 °C, mientras que en el periodo más reciente se mantienen cerca de 36 °C.

Este comportamiento podría estar relacionado con condiciones locales, como cambios en el uso de suelo o un posible aumento en la nubosidad, que pueden limitar el calentamiento durante el día. Además, la expansión urbana y la reducción de la cobertura vegetal podrían estar influyendo en la forma en que se distribuye la radiación solar en la superficie. En conjunto, la estación muestra una disminución consistente en la temperatura máxima a lo largo de las décadas.

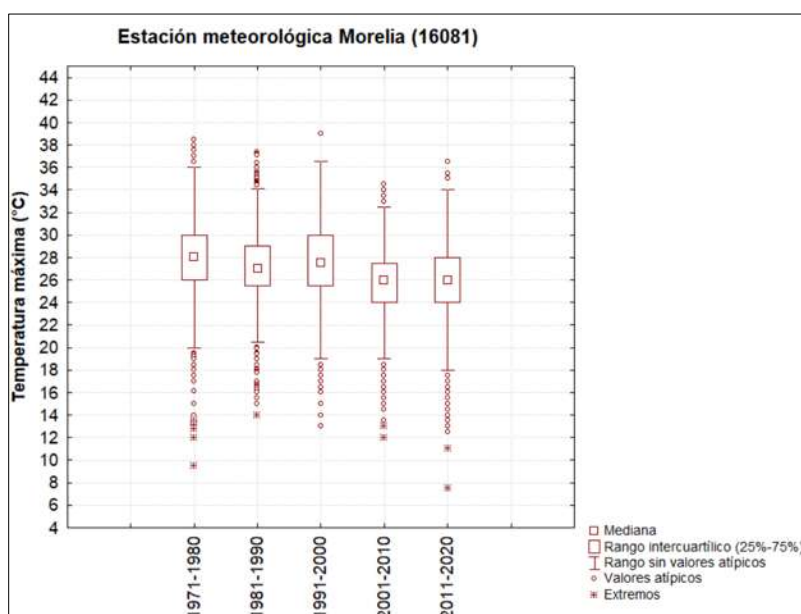


Figura 33. Distribución decadal de la temperatura máxima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020)

Fuente. Elaboración propia

Al comparar la temperatura máxima entre las estaciones de Carrillo Puerto, Huingo y Morelia, se observan diferencias claras en su comportamiento. En Carrillo Puerto, la temperatura máxima muestra un incremento en todos los niveles de la distribución, lo que indica que el calentamiento durante el día ha sido mayor entre décadas. Esto podría estar relacionado con las condiciones del entorno, ya que se trata de una zona con menor cobertura vegetal y presencia de actividades agrícolas.

En el caso de Huingo, el comportamiento es distinto, ya que no se observa una tendencia clara. Más bien, se presenta una combinación de cambios: los valores bajos tienden a disminuir, mientras que los valores más altos muestran ligeros incrementos. Esto sugiere una mayor amplitud térmica, lo cual puede estar influenciado por su altitud y su cercanía al Lago de Cuitzeo, donde la presencia de humedad y vegetación puede generar contrastes más marcados entre el día y la noche.

Por otro lado, en la estación de Morelia se observa una disminución en la temperatura máxima a lo largo de las décadas, tanto en los valores centrales como en los más altos. Este comportamiento podría estar relacionado con las condiciones propias de una zona urbana, como la presencia de construcciones, el tráfico vehicular y cambios en el uso de suelo, así como con un posible aumento en la nubosidad, lo que limita el calentamiento durante el día.

-Temperatura mínima diaria

La temperatura mínima permite analizar el comportamiento del enfriamiento nocturno en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. A partir de esta variable es posible observar cómo han cambiado las temperaturas más bajas a lo largo del tiempo, así como identificar cambios en la intensidad del enfriamiento durante la noche, es decir, si este se ha intensificado, disminuido o se ha mantenido relativamente estable.

La Figura 34 muestra el comportamiento de la temperatura mínima en la estación meteorológica Carrillo Puerto (16016) para el periodo 1971–2020, distribuido en décadas. En esta estación se observa un comportamiento variable, aunque en general con una ligera tendencia a la disminución en la mayoría de los estadísticos.

Los valores más bajos presentan variabilidad, con registros que en la última década oscilan entre -2 °C y -1 °C, lo que sugiere que en algunos periodos el enfriamiento nocturno puede ser más intenso. El primer cuartil (Q1) muestra una disminución cercana a 1 °C, alcanzando valores de

aproximadamente 6 °C en el periodo 2011–2020. Algo similar ocurre con la mediana, que pasa de 10 °C a 9 °C, lo que indica que la temperatura mínima en general tiende a ser más baja.

El tercer cuartil (Q3) también presenta una ligera disminución, de 13 °C a 12 °C, y en los valores más altos se observa el mismo comportamiento, pasando de alrededor de 18 °C a 17 °C. Este descenso en distintos niveles de la distribución podría estar relacionado con condiciones que favorecen la pérdida de calor durante la noche, como cielos más despejados, menor humedad o cambios en la cobertura del suelo. En conjunto, el comportamiento observado sugiere que, aunque existe variabilidad entre décadas, en ciertos periodos se presenta un enfriamiento nocturno más marcado en esta estación.

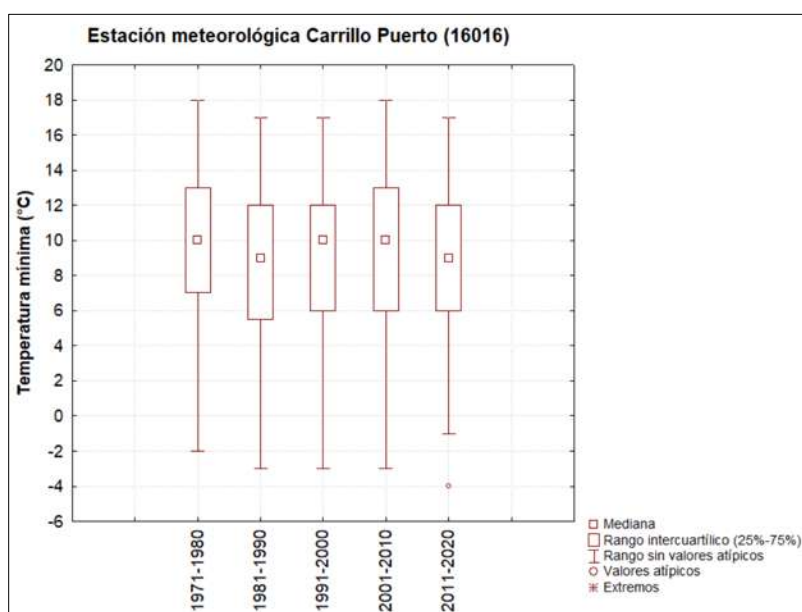


Figura 34. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Carrillo Puerto (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011–2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 35 se presenta la distribución de la temperatura mínima en la estación meteorológica Huingo (16052), agrupada por décadas. En esta estación se observa una variabilidad interdecadal, aunque con una tendencia al incremento en la mayoría de los estadísticos con respecto a la última década (2011–2020).

Los valores más bajos pasan de aproximadamente -3 °C en la década de 1971–1980 a cerca de -2 °C en el periodo más reciente, lo que indica un aumento de 1 °C. Este mismo comportamiento se refleja en el primer cuartil (Q1), que pasa de 6 °C a 7 °C, así como en la mediana, que se incrementa de 10 °C a 11 °C. De manera similar, el tercer cuartil (Q3) muestra un aumento, pasando de 12.5 °C a 13

°C, lo que sugiere que el incremento no solo ocurre en los valores bajos, sino también en los valores más altos dentro del rango analizado.

En las temperaturas más altas registradas también existe variabilidad entre décadas, aunque en el periodo más reciente se alcanzan valores cercanos a los 18 °C. Así mismo, se identifican valores atípicos en algunas décadas, destacando la más reciente, donde se registran valores por debajo de la mediana de hasta -3 °C y -5 °C, lo que refleja la ocurrencia de eventos fríos poco frecuentes.

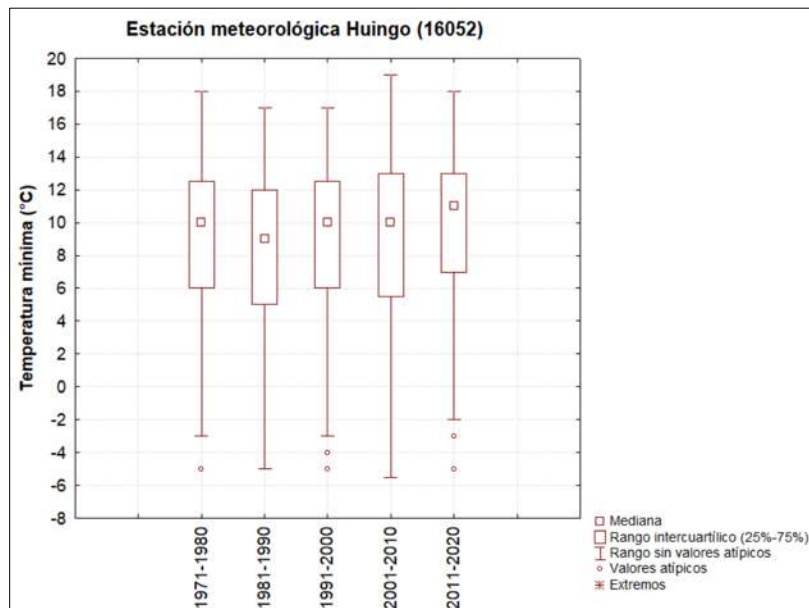


Figura 35. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Huingo (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 36 se muestra el comportamiento de la temperatura mínima en la estación meteorológica Morelia (16081), donde se observa un incremento claro a lo largo de las décadas (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020). Este aumento se nota desde los valores más bajos, que pasan de aproximadamente -1 °C a 3 °C, lo que sugiere que durante la noche ya no se alcanza el mismo nivel de enfriamiento que en décadas anteriores. Algo similar ocurre con el primer cuartil (Q1), que pasa de 6.5 °C a 10 °C, y con la mediana, que aumenta de 10 °C a 13 °C, mostrando que la temperatura mínima en general se ha incrementado.

En los valores más altos también se observa este mismo comportamiento. El tercer cuartil (Q3) pasa de 12.5 °C a 14.5 °C, y los valores máximos de la temperatura mínima aumentan de 17.5 °C a 19 °C, lo que indica que las noches más cálidas son ahora más cálidas que antes. Este comportamiento puede estar relacionado con las condiciones urbanas de Morelia, como el crecimiento de la ciudad,

la presencia de superficies construidas y el calor acumulado, que dificultan la pérdida de temperatura durante la noche.

En cuanto a los valores atípicos, estos se presentan en todas las décadas. En la década de 1971–1980 se registran valores cercanos a -3°C , mientras que en la más reciente se ubican entre 1°C y 2.5°C , lo que refuerza la idea de un aumento general en la temperatura mínima.

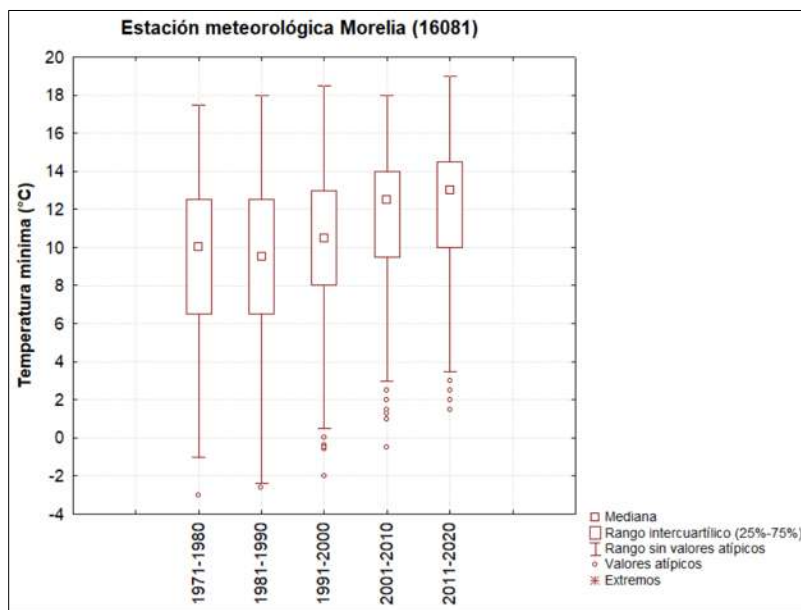


Figura 36. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia

Al comparar el comportamiento de la temperatura mínima entre las estaciones de Carrillo Puerto, Huingo y Morelia, se observan diferencias claras que reflejan la influencia de las condiciones locales en la cuenca. En Carrillo Puerto, la temperatura mínima muestra una ligera tendencia a la disminución, lo que sugiere que en algunos periodos el enfriamiento nocturno se intensifica. Este comportamiento puede estar relacionado con las características del entorno, ya que se trata de una zona con menor urbanización y predominio de áreas agrícolas, donde la menor retención de calor y la posible presencia de cielos más despejados favorecen la pérdida de energía durante la noche.

En contraste, la estación Huingo presenta un comportamiento distinto, con un incremento moderado en la temperatura mínima. Este aumento, aunque no tan marcado, se observa en varios niveles de la distribución, lo que indica que las noches tienden a ser ligeramente menos frías. Esta situación puede estar influenciada por su cercanía al Lago de Cuitzeo y la presencia de humedad, ya que el agua y la vegetación tienden a regular la temperatura y reducir el enfriamiento nocturno.

Por otro lado, en la estación de Morelia se observa un incremento más evidente en la temperatura mínima, presente tanto en los valores bajos como en los más altos. En este caso, el aumento parece estar relacionado con las condiciones urbanas de la ciudad, como la mayor densidad de población, la presencia de infraestructura, el tráfico vehicular y la acumulación de calor en superficies construidas, factores que dificultan la pérdida de calor durante la noche.

En conjunto, estos resultados muestran que la temperatura mínima no presenta un comportamiento homogéneo en la cuenca, sino que responde principalmente a factores locales como el uso del suelo, la cercanía a cuerpos de agua y el grado de urbanización. Mientras que en zonas menos intervenidas se favorece el enfriamiento nocturno, en áreas con mayor presencia de humedad o urbanización este proceso se ve limitado, dando lugar a noches más cálidas.

-Temperatura media diaria

La temperatura media permite analizar el comportamiento térmico promedio de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, ya que integra lo que ocurre tanto durante el día (temperatura máxima) como en la noche (temperatura mínima). A partir de esta variable es posible observar cómo han cambiado los valores centrales de la temperatura a lo largo del tiempo, así como identificar variaciones en su dispersión y en la presencia de valores extremos.

En la Figura 37 se muestra la distribución de la temperatura media en la estación Carrillo Puerto (16016) para el periodo 1971–2020, organizada por décadas. De manera general, se observa un ligero incremento en algunos componentes de la distribución, mientras que otros permanecen relativamente estables, lo que en conjunto refleja una variabilidad interdecadal de la temperatura media a lo largo del tiempo.

En el límite inferior, los valores más bajos presentan cierta variabilidad entre décadas, registrando alrededor de 9 °C en el periodo más reciente. El primer cuartil (Q1) muestra un incremento aproximado de 0.5 °C, pasando de 14.5 °C a 15 °C. Por su parte, la mediana se mantiene relativamente estable en torno a los 17 °C, con ligeras variaciones entre décadas, pero sin cambios significativos en el periodo reciente.

El tercer cuartil (Q3) también presenta un incremento cercano a 0.5 °C, alcanzando valores de hasta 19 °C, mientras que los valores máximos se mantienen prácticamente constantes alrededor de 24.5 °C. Esto sugiere que los cambios observados se concentran principalmente en los valores intermedios de la distribución. En cuanto a los valores atípicos, estos se presentan en todas las

décadas y se ubican por debajo de la mediana; destaca un valor cercano a 5.5 °C en la década de 1991–2000. Finalmente, en el periodo más reciente se identifica un valor extremo de aproximadamente 1.5 °C, lo que evidencia la ocurrencia de eventos poco frecuentes hacia valores muy bajos.

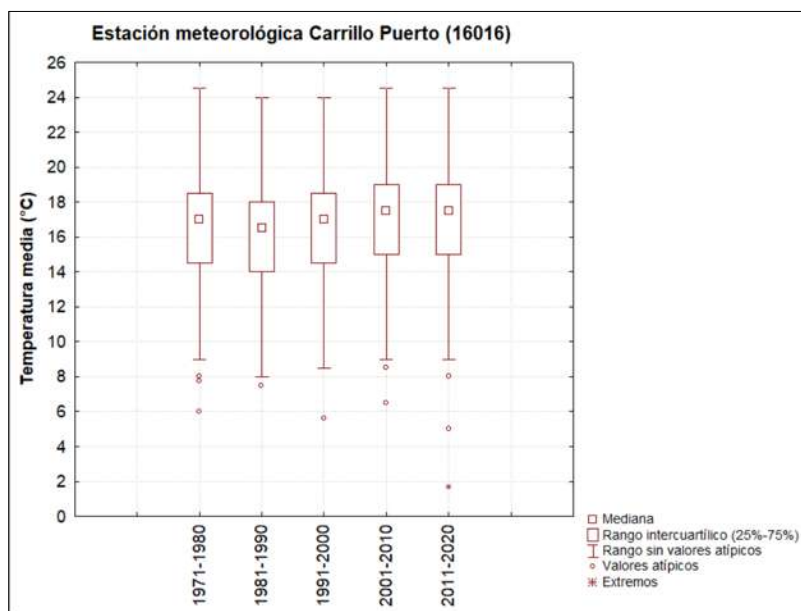


Figura 37. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 38 se presenta el comportamiento de la temperatura media en la estación meteorológica Huingo (16052). En términos generales, se observa una tendencia al incremento a lo largo del periodo analizado, con excepción de los valores mínimos, que disminuyen ligeramente de 9 °C a 8.5 °C en la última década.

El primer cuartil (Q1) muestra un incremento de 15 °C a 15.5 °C, mientras que la mediana también aumenta en aproximadamente 0.5 °C, alcanzando un valor de 18.5 °C en el periodo más reciente. De manera similar, el tercer cuartil (Q3) presenta un incremento, llegando a 20 °C.

El límite superior es donde se observa el mayor cambio, pasando de 23.5 °C a 25 °C, lo que representa un incremento de 1.5 °C. En cuanto a los valores atípicos, estos se presentan a lo largo de todo el periodo; sin embargo, en la última década se registra el valor más bajo, cercano a los 6 °C.

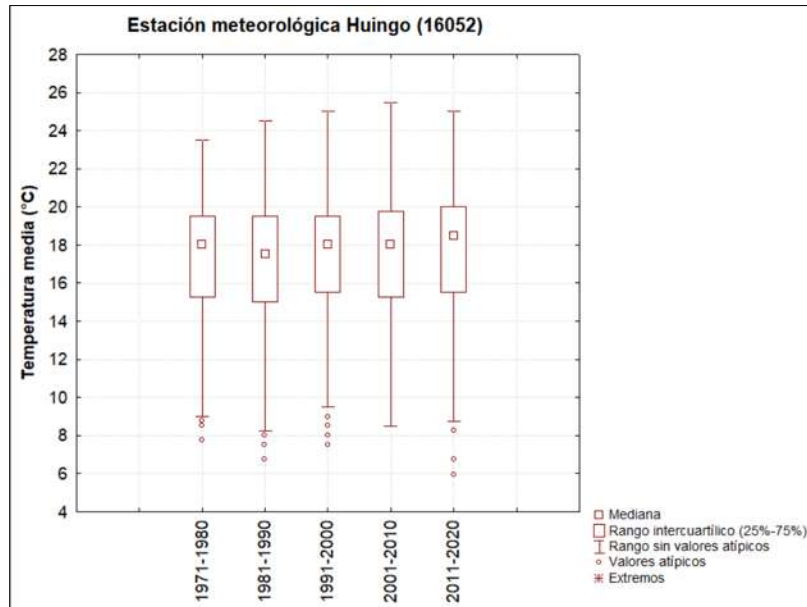


Figura 38. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 39 se presenta el comportamiento de la temperatura media en la estación meteorológica Morelia (16081). En esta estación se observa un comportamiento contrastante, con incrementos en los valores inferiores y una ligera disminución en los valores superiores de la distribución.

En los valores más bajos, se identifica un incremento de 10 °C a 13 °C. De igual forma, el primer cuartil (Q1) aumenta de 16 °C a 17.5 °C, mientras que la mediana presenta un incremento de aproximadamente 0.5 °C, alcanzando un valor de 19.5 °C en la última década.

En contraste, los valores por encima de la mediana muestran una tendencia a la disminución. El tercer cuartil (Q3) pasa de 21 °C a 20 °C, y los valores máximos descienden de 26.5 °C a 25 °C, lo que representa una reducción de 1.5 °C en los valores más altos.

En cuanto a los valores atípicos, aquellos ubicados por debajo de la mediana tienden a incrementarse, pasando de 7 °C a 8.5 °C, mientras que los que se encuentran por encima disminuyen, alcanzando cerca de 26 °C en la última década. Finalmente, los valores extremos se presentan en los mínimos, particularmente en las tres últimas décadas, destacando un valor cercano a 6.5 °C en el periodo 2011-2020.

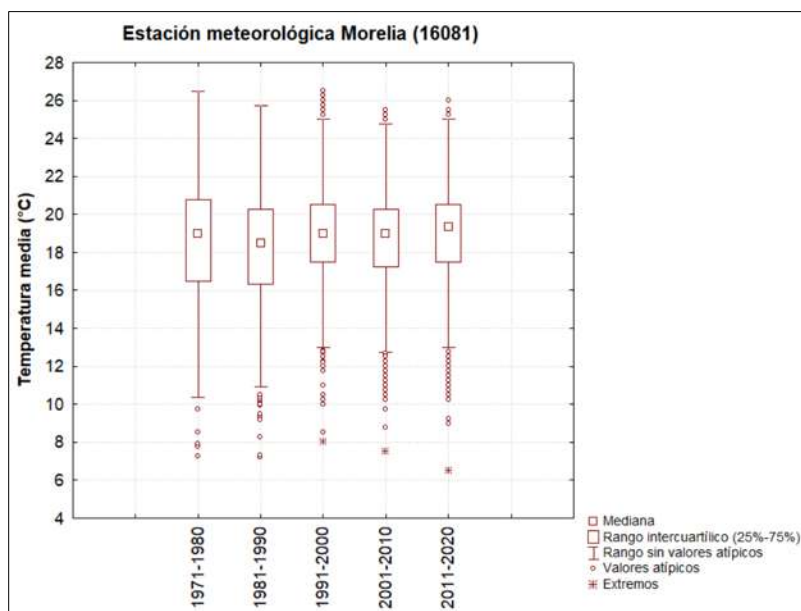


Figura 39. Distribución decadal de la temperatura mínima diaria de la estación Morelia (1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 y 2011-2020).

Fuente. Elaboración propia

Al comparar las tres estaciones se puede determinar que muestran comportamientos diferentes en la temperatura media. En particular, se observa un incremento en los valores centrales (mediana) de la distribución, lo que sugiere un aumento gradual en las condiciones térmicas promedio a lo largo de las décadas.

En la estación Carrillo Puerto, los cambios son más sutiles y se concentran principalmente en los valores intermedios, mientras que la mediana y los valores máximos se mantienen relativamente estables. Esto indica una variabilidad moderada sin modificaciones importantes en los extremos.

Por otro lado, la estación Huingo presenta un incremento más claro en la mayor parte de la distribución, especialmente en los valores superiores, lo que refleja un aumento en las temperaturas más altas. En contraste, los valores mínimos muestran una ligera disminución.

En la estación Morelia se observa un comportamiento diferente, ya que los valores más bajos tienden a incrementarse, mientras que los valores más altos presentan una ligera disminución. Este patrón sugiere una reducción en la amplitud térmica, con noches menos frías y una moderación en las temperaturas más elevadas.

En términos generales, Morelia registra las temperaturas medias más altas, seguida de Huingo y, finalmente, Carrillo Puerto, lo cual es consistente con lo observado en las variables de temperatura máxima y mínima. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las condiciones locales de cada

estación, como la altitud, el grado de urbanización y la influencia del Lago de Cuitzeo como en el caso de la estación meteorológica Huingo.

5.2. Indicadores de cambio climático a escala regional

Con el objetivo de identificar posibles señales de cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se analizaron indicadores tanto de precipitación como de temperatura. Estos indicadores resultan fundamentales, ya que permiten evaluar cambios en la frecuencia e intensidad de eventos de lluvia y calor, no solo en términos de valores promedio, sino también en sus extremos.

El análisis se centra en el periodo futuro (proyección) 2031–2050, bajo dos escenarios de emisiones, RCP 4.5 y RCP 8.5. Se indica que los resultados corresponden a una escala regional, por lo que reflejan tendencias generales del clima y no permiten identificar variaciones locales o microclimáticas, como las registradas por estaciones meteorológicas descritas en el apartado anterior.

a. Indicadores de precipitación

Dentro de los indicadores de precipitación se analizaron la precipitación total en días húmedos (PRCPTOT), el número de días con lluvia igual o mayor a 1 mm (R1mm), así como los días con precipitaciones superiores a 10 mm (R10mm) y 20 mm (R20mm). Además, se consideró la precipitación asociada a eventos muy húmedos o extremos (P95pTOT). En conjunto, estos indicadores permiten determinar cómo ha cambiado no solo la cantidad de lluvia, sino también la frecuencia y la intensidad de los eventos, lo cual es fundamental para entender el comportamiento de la precipitación en la cuenca.

-Precipitación total diaria (PRCPTOT)

El indicador PRCPTOT representa el total anual de precipitación acumulada en días con lluvia igual o superior a 1 mm. En la Figura 40 se observa que, bajo ambos escenarios de emisiones (RCP 4.5 y RCP 8.5), la precipitación total anual se mantiene sin cambios marcados hacia 2050. Sin embargo, destaca una variabilidad interanual considerable, lo que indica que la precipitación no sigue un patrón uniforme a lo largo del periodo proyectado.

En el escenario RCP 8.5 se aprecia un ligero incremento en comparación con RCP 4.5, aunque este comportamiento no es sostenido en el tiempo. El diagrama de caja para el periodo 2031–2050 muestra medianas muy similares entre ambos escenarios, pero con una dispersión amplia, lo que

sugiere diferencias importantes entre los modelos y, por tanto, cierta incertidumbre en la proyección de la precipitación.

En conjunto, estos resultados indican que no se espera un cambio claro en la cantidad total de lluvia, sino más bien en su distribución a lo largo del tiempo. Esto es consistente con lo observado en las estaciones meteorológicas y puede influir en la dinámica hídrica de la cuenca, particularmente en procesos como la recarga de acuíferos o la ocurrencia de eventos extremos.

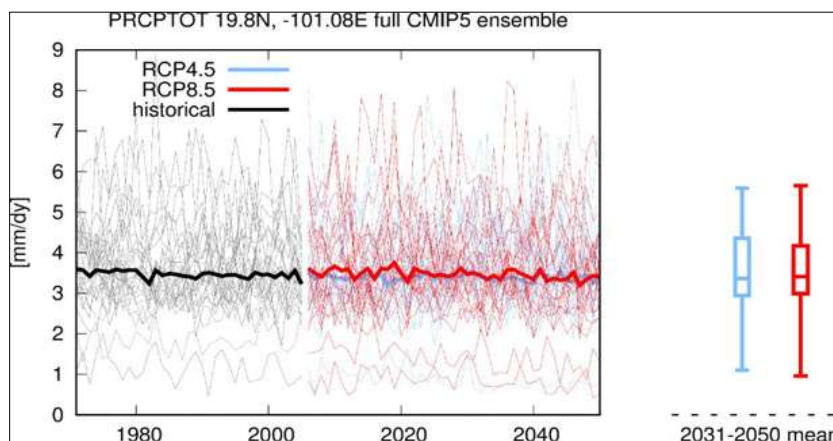


Figura 40. Evolución de la precipitación total diaria (PRCPTOT) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

-Precipitación diaria ≥ 1 mm

El indicador R1mm (Figura 41) permite analizar la frecuencia anual de días con precipitación igual o mayor a 1 mm. En comparación con el periodo histórico, se observa una ligera disminución en el número de días lluviosos hacia mediados de siglo, tanto en el escenario RCP 4.5 como en el RCP 8.5.

Este comportamiento no es uniforme entre años, ya que se presenta una variabilidad marcada en la frecuencia de días con lluvia. Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja muestra una ligera asimetría negativa en ambos escenarios, lo que indica la presencia de algunos años con menor número de días lluviosos. En el escenario RCP 4.5, la mediana se sitúa alrededor de 155 días, mientras que en RCP 8.5 desciende ligeramente a aproximadamente 150 días.

La distribución muestra que la mayor parte de los valores se concentra en rangos cercanos a la mediana o ligeramente superiores, mientras que los valores bajos son menos frecuentes, aunque influyen en la dispersión. En relación con el periodo histórico, esto sugiere una reducción en la frecuencia de días con precipitación, más evidente bajo el escenario de mayores emisiones. En este sentido, la lluvia podría concentrarse en menos días a lo largo del año, lo que tendría implicaciones en la dinámica hidrológica de la cuenca.

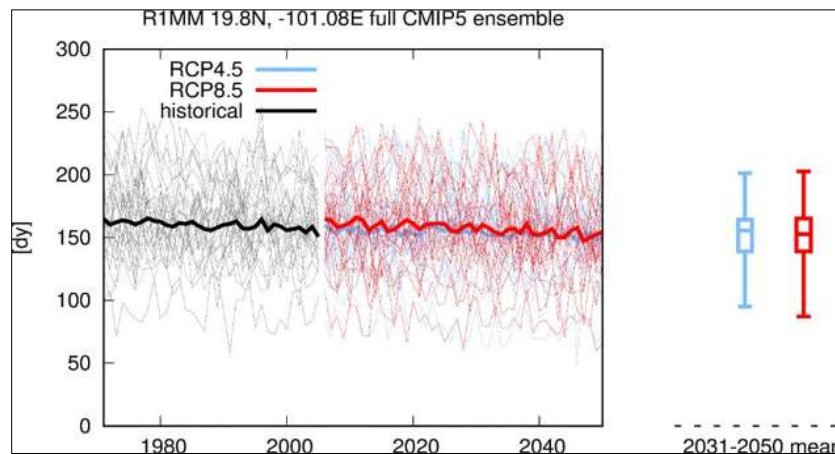


Figura 41. Evolución de la intensidad máxima diaria de precipitación (R1MM) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

- Precipitación diaria ≥ 10 mm

El indicador R10mm (Figura 42) muestra el número de días al año con precipitaciones iguales o mayores a 10 mm, es decir, eventos de lluvia de intensidad moderada. No se observa una señal clara de cambio hacia mediados de siglo, ya que los valores proyectados se mantienen cercanos a los del periodo histórico en ambos escenarios.

Lo que más resalta es la dispersión de los datos a lo largo del tiempo, con años en los que el número de días con este tipo de lluvia aumenta y otros en los que disminuye, sin un patrón definido. Esta variabilidad se mantiene tanto en RCP 4.5 como en RCP 8.5, donde además las diferencias entre escenarios son poco evidentes.

En el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría negativa en ambos escenarios. En el escenario RCP 4.5, la mediana se ubica alrededor de 43 días, mientras que en RCP 8.5 se aproxima a 40 días, lo que indica una ligera reducción en la frecuencia de estos eventos bajo un escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, los resultados apuntan a que la frecuencia de lluvias moderadas se mantiene relativamente constante, pero con una variabilidad importante entre años, lo que sugiere que este tipo de eventos seguirá respondiendo principalmente a la dinámica climática natural de la región.

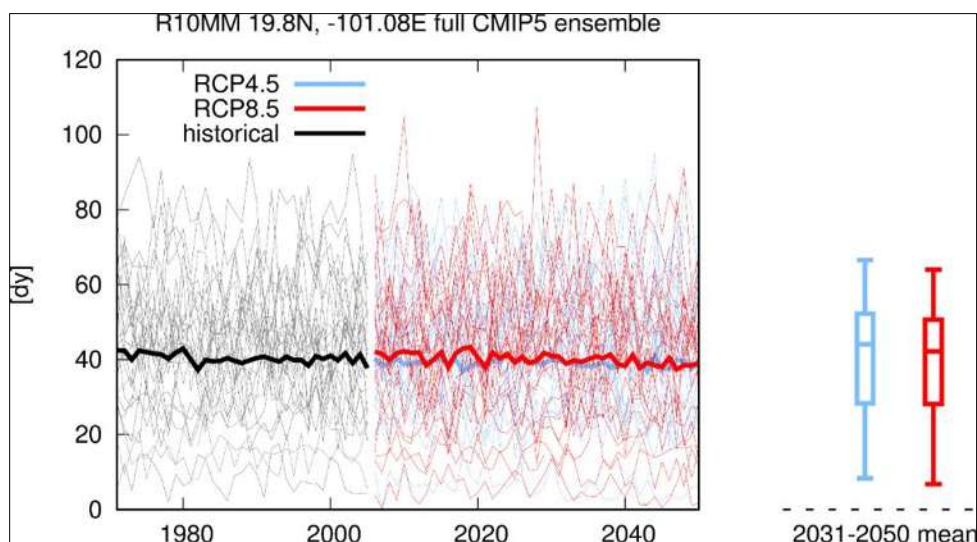


Figura 42. Evolución del número de días con precipitación intensa (≥ 10 mm) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

- Precipitación diaria ≥ 20 mm

El indicador R20mm (Figura 43) permite identificar la frecuencia anual de días con precipitaciones iguales o superiores a 20 mm, asociados a eventos de lluvia intensa. A lo largo del periodo proyectado, no se observa una señal clara de cambio en la ocurrencia de estos eventos, ya que los valores se mantienen en rangos similares a los del periodo histórico en ambos escenarios.

Las trayectorias de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 muestran un comportamiento muy parecido, incluso con años en los que los valores prácticamente coinciden, lo que refuerza la idea de que no hay diferencias marcadas en la frecuencia de lluvias intensas a escala de la cuenca. Este comportamiento sugiere que este tipo de eventos continúa estando fuertemente influenciado por la variabilidad natural del sistema climático.

En el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una ligera asimetría positiva en ambos escenarios. En el escenario RCP 4.5, la mediana se sitúa alrededor de 11 días, mientras que en RCP 8.5 es cercana a 10 días. Esta asimetría indica la presencia de algunos años con mayor número de eventos intensos, aunque la mayoría de los valores se concentra en rangos bajos o cercanos a la mediana.

En este contexto, los resultados muestran que, aunque no hay un incremento sostenido en la frecuencia de lluvias intensas, sí pueden presentarse años con eventos más frecuentes, lo que mantiene un comportamiento irregular en este tipo de precipitación.

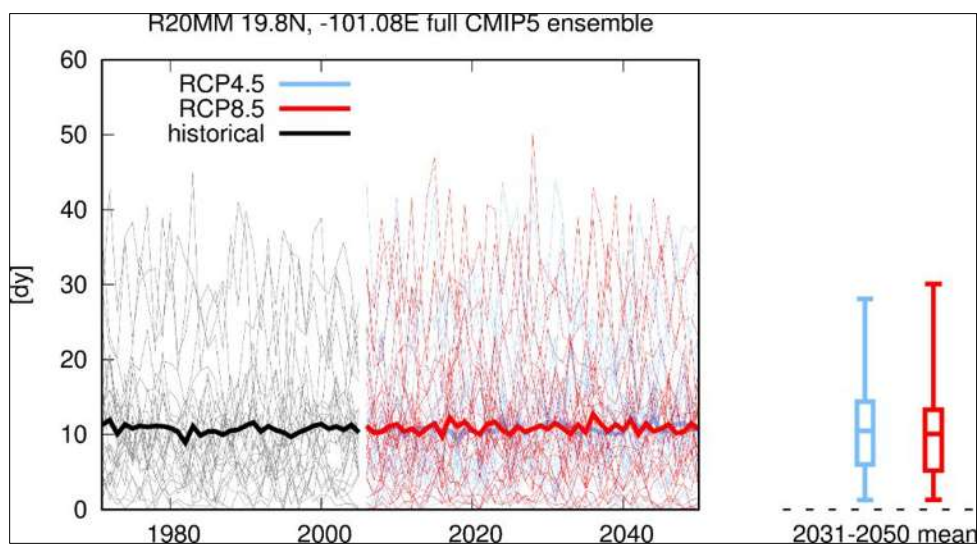


Figura 43. Evolución del número de días con precipitación muy intensa (≥ 20 mm) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensemble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

- Precipitación asociada a eventos muy húmedos (P95pTOT)

El indicador P95pTOT (Figura 44) permite evaluar la proporción de la precipitación anual asociada a eventos de lluvia intensa, es decir, aquellos que superan el percentil 95. A lo largo del periodo proyectado, este indicador presenta una alta variabilidad, sin mostrar una tendencia clara de incremento o disminución en su contribución al total anual bajo ninguno de los escenarios analizados.

Las proyecciones de ambos escenarios mantienen un comportamiento similar, con valores que en muchos casos se traslapan, lo que indica que no se observan diferencias relevantes en la aportación de la precipitación extrema entre RCP 4.5 y RCP 8.5 a escala de la cuenca.

Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría positiva en ambos escenarios. En RCP 4.5, la mediana se ubica alrededor de 300 mm/año, mientras que en RCP 8.5 es cercana a 280 mm/año. Esta asimetría refleja la presencia de algunos años con aportes elevados de precipitación extrema, aunque la mayor parte de los valores se concentra en rangos más bajos.

En este sentido, aunque no se identifica un aumento sostenido en la contribución de los eventos más intensos, sí se mantienen episodios puntuales con aportaciones elevadas, lo que sugiere que este tipo de precipitación seguirá teniendo un papel relevante en la dinámica hidrológica de la cuenca.

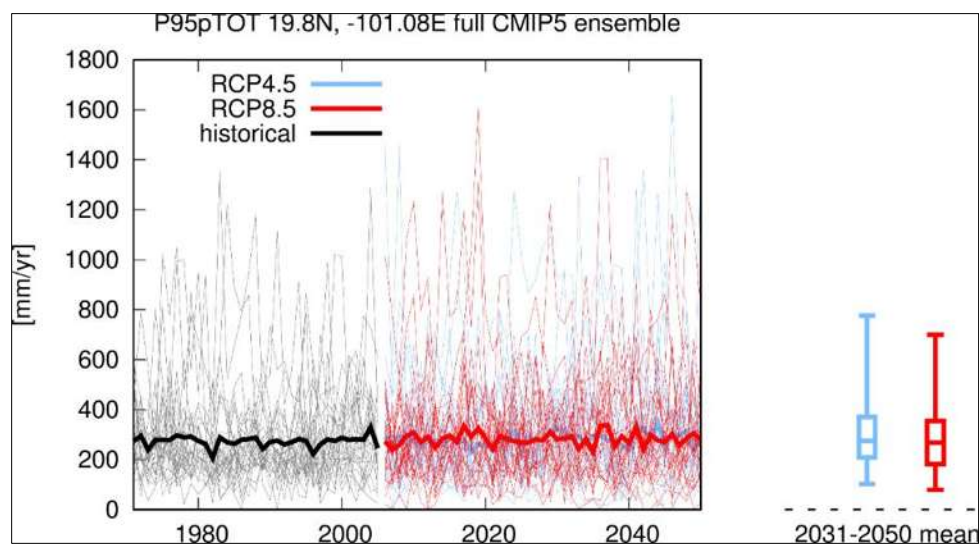


Figura 44. Evolución de la precipitación asociada a eventos muy húmedos (P95pTOT) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensemble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

Los indicadores de precipitación analizados no muestran una tendencia clara de incremento o disminución hacia el periodo 2031–2050 bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. En general, el comportamiento está dominado por una marcada variabilidad interanual, reflejada en la dispersión de los valores y en la alternancia de años más secos y más húmedos.

Este comportamiento sugiere que, más que cambios en la cantidad total de precipitación, persiste un patrón de variabilidad climática característico de la región, consistente con lo observado en los registros de las estaciones meteorológicas. Además, los resultados apuntan a posibles modificaciones en la distribución temporal de la lluvia, con una tendencia a concentrarse en menos días a lo largo del año.

Este tipo de comportamiento puede influir en procesos como la escorrentía, la infiltración y la disponibilidad de agua en la cuenca. Así mismo, la dispersión entre los modelos del ensemble sugiere la presencia de incertidumbre en las proyecciones a escala regional. En este contexto, no se identifican señales claras de intensificación o reducción sostenida de la precipitación hacia mediados del siglo, sino más bien la persistencia de un régimen climático variable.

b. Indicadores de temperatura

En lo que respecta a los indicadores de temperatura, se analizaron los siguientes: frecuencia de noches frías (TN10p), frecuencia de noches cálidas (TN90p), temperatura mínima extrema (TNn), temperatura mínima máxima (TNx), frecuencia de días fríos (TX10p) y frecuencia de días cálidos (TX90p). A continuación, se presenta el comportamiento de cada uno de estos indicadores.

-TN10p – Frecuencia de noches frías

El indicador TN10p (Figura 45) refleja el porcentaje de noches con temperaturas mínimas por debajo del percentil 10, el cual muestra una disminución clara en el porcentaje de noches frías a lo largo del periodo proyectado. Esta reducción es progresiva en ambos escenarios de emisiones, aunque se vuelve más evidente bajo el escenario RCP 8.5 hacia mediados de siglo.

En comparación con el periodo histórico, donde la frecuencia de noches frías era mayor, los valores proyectados tienden a concentrarse en rangos más bajos, lo que indica un cambio en las condiciones térmicas nocturnas de la región. Esta disminución en el índice TN10p refleja un incremento en las temperaturas mínimas, es decir, que las noches tienden a ser más cálidas.

A pesar de esta tendencia, se mantiene cierta variabilidad entre años, con episodios en los que aún se presentan noches frías, aunque con menor frecuencia. Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja muestra una asimetría positiva en ambos escenarios. En RCP 4.5, la mediana se sitúa alrededor de 2.5%, mientras que en RCP 8.5 desciende a aproximadamente 2%, lo que confirma la reducción de este tipo de eventos bajo escenarios de mayores emisiones.

La forma de la distribución indica que la mayor parte de los valores se concentra en porcentajes bajos, mientras que los valores más altos son menos frecuentes y corresponden a años aislados con mayor presencia de noches frías. Este comportamiento sugiere un desplazamiento hacia condiciones térmicas menos frías durante la noche, lo que constituye una señal clara de calentamiento en la cuenca.

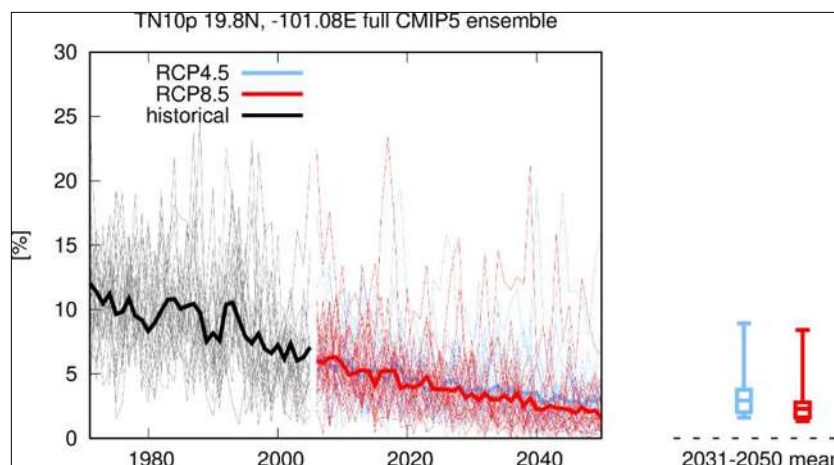


Figura 45. Evolución de la frecuencia de noches frías (TN10p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

- TN90p – Frecuencia de noches cálidas

El incremento en el indicador TN90p (Figura 46) muestra que las noches con temperaturas mínimas elevadas son cada vez más frecuentes a escala regional. Este indicador, que corresponde al porcentaje de noches por encima del percentil 90, presenta un aumento progresivo en ambos escenarios de emisiones, con valores más altos a medida que se acerca hacia mediados de siglo, especialmente en bajo el escenario RCP 8.5.

A diferencia de lo observado en el periodo histórico, donde este tipo de noches era menos común, las proyecciones reflejan un cambio claro hacia condiciones nocturnas más cálidas. Este aumento no se da de manera uniforme entre años, ya que se mantienen fluctuaciones importantes; sin embargo, estas variaciones ocurren sobre una tendencia ascendente bien definida.

Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja muestra un desplazamiento evidente hacia valores más altos. Las medianas alcanzan aproximadamente el 40% en el escenario RCP 4.5 y cerca del 48% en RCP 8.5, lo que indica que una proporción considerable de las noches del año se sitúa dentro de la categoría de noches cálidas, particularmente bajo el escenario de mayores emisiones.

Más allá de la variabilidad interanual, el comportamiento general del indicador apunta a un aumento sostenido de las temperaturas mínimas, lo que se traduce en una mayor presencia de noches cálidas y una reducción en la ocurrencia de condiciones térmicas frías durante la noche.

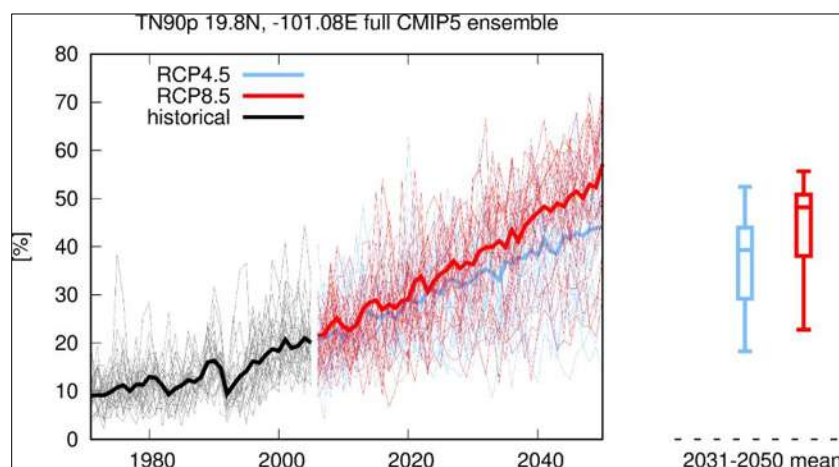


Figura 46. Evolución de la frecuencia de noches cálidas (TN90p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

-TNn – Temperatura mínima extrema

El indicador TNn (Figura 47) corresponde a la temperatura mínima extrema anual, es decir, al valor más bajo de temperatura mínima registrado en el año, asociado a las noches más frías. A diferencia

de otros indicadores de temperatura, en este caso no se observa un cambio marcado, aunque sí se distingue un incremento en los valores hacia el final del periodo proyectado.

Este aumento sugiere que los extremos fríos tienden a ser menos intensos con el tiempo; sin embargo, este comportamiento no es uniforme. Se mantiene una variabilidad importante entre años, en la que aún se registran valores cercanos a los del periodo histórico, lo que indica que los eventos de frío extremo no desaparecen, sino que continúan presentándose de manera ocasional siendo más intensos a partir del 2031.

La comparación entre escenarios muestra un comportamiento muy similar, sin una separación clara entre el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría positiva en ambos casos, con medianas cercanas a 2.5 °C. Esta distribución indica que la mayoría de los valores se concentra en rangos relativamente más altos, mientras que los valores más bajos correspondientes a eventos más fríos son menos frecuentes, aunque siguen presentes.

Mencionado lo anterior, el indicador refleja una moderación en la intensidad de los extremos fríos, más que un cambio abrupto en su ocurrencia, lo que sugiere una transición gradual hacia condiciones térmicas menos frías en la región.

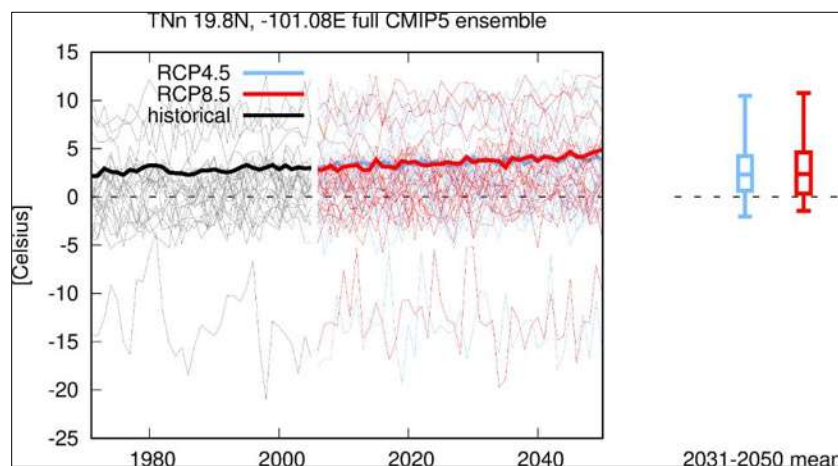


Figura 47. Evolución de la temperatura mínima extrema (TNn) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensemble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

-TNx – Temperatura mínima máxima

El valor máximo de la temperatura mínima anual, representado por el indicador TNx (Figura 48), muestra una tendencia al alza en las noches más cálidas a lo largo del periodo proyectado. Este incremento se aprecia de forma gradual en ambos escenarios, lo que indica que las temperaturas mínimas más elevadas tienden a intensificarse conforme avanza el siglo.

Aunque el escenario RCP 8.5 alcanza valores ligeramente superiores, las diferencias entre escenarios son poco marcadas frente a la variabilidad observada entre años. Esta variabilidad se manifiesta en fluctuaciones importantes en la intensidad de las noches más cálidas, lo que indica que no todos los años responden de la misma manera al incremento térmico.

En el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría positiva en ambos escenarios, con medianas cercanas a los 20 °C. Esta configuración muestra que la mayoría de los valores se agrupa en rangos relativamente altos, mientras que los valores más bajos asociados a noches menos cálidas son menos frecuentes.

En conjunto, el comportamiento del indicador sugiere un aumento en la intensidad de las noches cálidas, más que un cambio en su frecuencia, lo que refuerza la evidencia de un calentamiento nocturno progresivo a nivel regional.

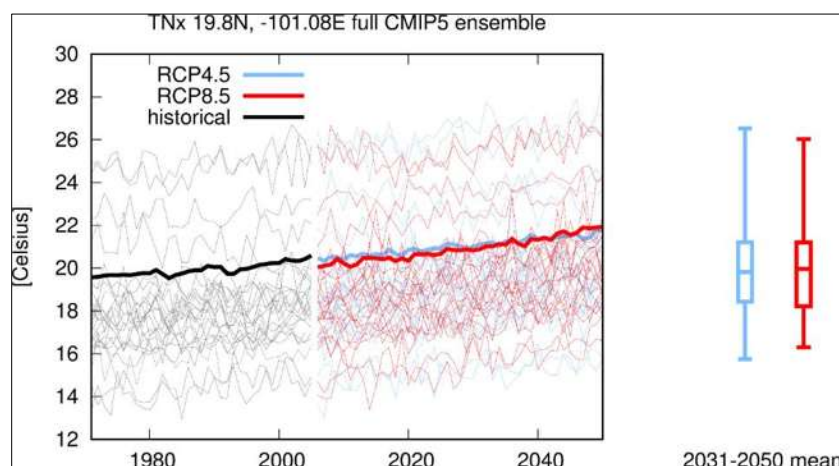


Figura 48. Evolución de la temperatura mínima máxima (TNx) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

-TX10p – Frecuencia de días fríos

El indicador TX10p (Figura 49), que corresponde al porcentaje de días con temperatura máxima por debajo del percentil 10, muestra una reducción gradual en la presencia de días fríos a lo largo del periodo proyectado. Esta disminución se observa en ambos escenarios de emisiones y se vuelve más evidente a medida que se acerca a mediados de siglo, particularmente bajo el escenario de emisiones RCP 8.5.

En comparación con el periodo histórico, donde este tipo de días eran más frecuentes, las proyecciones reflejan una menor ocurrencia de temperaturas máximas bajas. Aunque se mantienen

fluctuaciones entre años, estas se desarrollan sobre una tendencia descendente que indica una reducción progresiva de los días relativamente fríos.

Para el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría negativa en ambos escenarios, con medianas cercanas al 4% en el escenario RCP 4.5 y aproximadamente 3.6% en RCP 8.5. Esta forma de la distribución indica que la mayor parte de los valores se concentra en rangos bajos, mientras que los valores más altos asociados a una mayor presencia de días fríos son menos frecuentes. Con base en este comportamiento, se observa una disminución en la frecuencia de días fríos durante el día, lo que se suma a la evidencia de un aumento general de las temperaturas a escala regional.

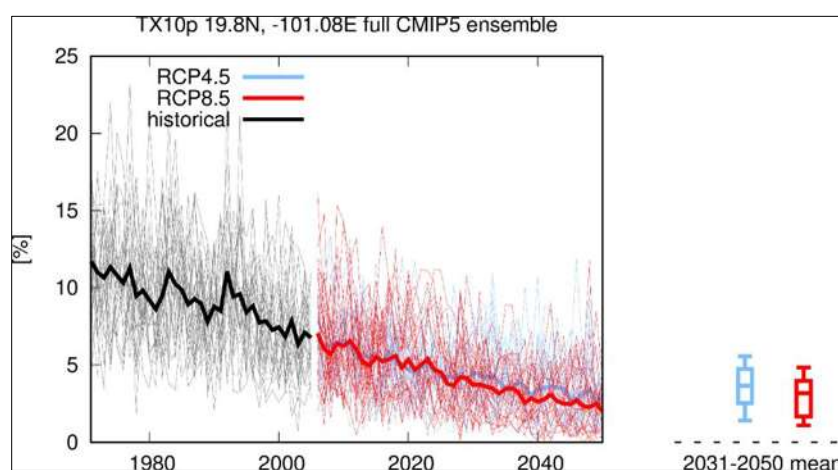


Figura 49. Evolución de la frecuencia de días fríos (TX10p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Cuenca del Lao de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

-TX90p – Frecuencia de días cálidos

A medida que avanza el periodo proyectado, el indicador TX90p (Figura 50) muestra un incremento sostenido en la proporción de días con temperaturas máximas elevadas. Este índice, que identifica los días que superan el percentil 90, alcanza valores progresivamente mayores en ambos escenarios de emisiones, con un aumento más marcado hacia mediados de siglo bajo el escenario RCP 8.5.

El contraste con el periodo histórico es evidente, ya que los días cálidos, que anteriormente se presentaban con menor frecuencia, pasan a representar una fracción cada vez más importante del total anual. Este cambio refleja un desplazamiento hacia condiciones térmicas más cálidas durante el día, asociado al aumento de las temperaturas máximas en una escala regional.

Si bien se observan fluctuaciones entre años, estas se desarrollan sobre una tendencia claramente ascendente, lo que indica que la ocurrencia de días cálidos se vuelve más frecuente conforme se

acerca al 2050. En el periodo 2031–2050, el diagrama de caja presenta una asimetría negativa en ambos escenarios, con medianas cercanas al 40% en RCP 4.5 y alrededor del 48% en RCP 8.5. Esta distribución muestra que la mayor parte de los valores se concentra en rangos altos, mientras que los valores más bajos asociados a una menor frecuencia de días cálidos son menos comunes.

Más allá de la variabilidad interanual, el comportamiento del indicador indica un aumento sostenido en la presencia de temperaturas máximas elevadas, lo que pone en evidencia un fortalecimiento del calentamiento diurno en la cuenca.

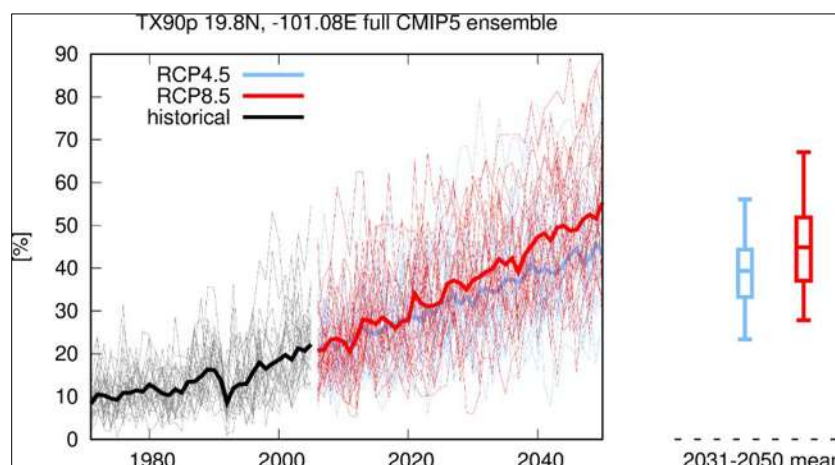


Figura 50. Evolución de la frecuencia de días cálidos (TX90p) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Fuente. Elaboración propia con base en el ensamble de modelos CMIP5 procesados en KNMI Climate Explorer.

El análisis de los indicadores de temperatura muestra una señal clara de calentamiento a nivel regional en la Cuenca del Lago de Cuitzeo a medida que se acerca al año 2050. Este comportamiento se manifiesta en la disminución de eventos fríos y el incremento de eventos cálidos, tanto en temperaturas mínimas como máximas. Aunque se mantiene cierta variabilidad interanual, la tendencia general indica un aumento progresivo de la temperatura bajo ambos escenarios de emisiones, con mayor intensidad en RCP 8.5.

Este patrón refleja un cambio en las condiciones térmicas de la región, donde las noches y los días tienden a ser más cálidos conforme avanza el tiempo. La reducción de extremos fríos, junto con el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos cálidos, sugiere un desplazamiento hacia un régimen térmico dominado por temperaturas más elevadas, tanto durante el día como en la noche.

En síntesis, los resultados indican que el cambio climático en la cuenca bajo una escala regional se expresa principalmente a través del aumento de la temperatura, más que por cambios aislados en eventos específicos. Este comportamiento es consistente con las proyecciones de cambio climático

a escala global y resalta la importancia de considerar el incremento térmico como un factor clave en la dinámica ambiental y planificación del territorio en la región (Tabla 12).

Indicador	Tendencia observada	Interpretación general
Precipitación		
PRCPTOT	Alta variabilidad	Sin tendencia clara
R1mm	Ligera disminución	Menor número de días con lluvia
R10mm	Variabilidad interanual	Eventos intensos irregulares
R20mm	Variabilidad interanual	Eventos intensos irregulares
P95pTOT	Variabilidad	Concentración de lluvia extrema
Temperatura		
TN10p	Disminución	Menor frecuencia de noches frías
TN90p	Incremento	Mayor frecuencia de noches cálidas
TNn	Incremento	Aumento en las temperaturas mínimas extremas
TNx	Incremento	Incremento de las temperaturas mínimas máximas
TX10p	Disminución	Reducción de días fríos
TX90p	Incremento	Aumento de días cálidos

Tabla 1216. Resumen de tendencias observadas en los indicadores de cambio climático.

Fuente. Elaboración propia.

5.3. Análisis de la variabilidad climática y la respuesta hidrológica del Lago de Cuitzeo mediante SPI y NDWI

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Estos resultados permiten identificar la ocurrencia de años con condiciones secas y húmedas, así como los cambios en la superficie del lago asociados a dichas condiciones. Para su análisis, se examinan en primer lugar los valores del SPI-6, con el fin de identificar los periodos de déficit y exceso de precipitación; posteriormente, se analizan las variaciones en la superficie de agua del lago mediante el NDWI, considerando los años más representativos tanto de condiciones húmedas (valores positivos) como secas (valores negativos), con el objetivo de describir su comportamiento ante estas condiciones.

a. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El SPI-6 correspondiente al mes de octubre muestra una marcada variabilidad a lo largo del periodo analizado (1948–2024), como se observa en la Figura 51. Los valores oscilan entre años secos (valores negativos) y años húmedos (valores positivos). En este caso, los valores comprendidos entre -0.5 y 0.5, representados por las líneas amarillas, corresponden a condiciones normales.

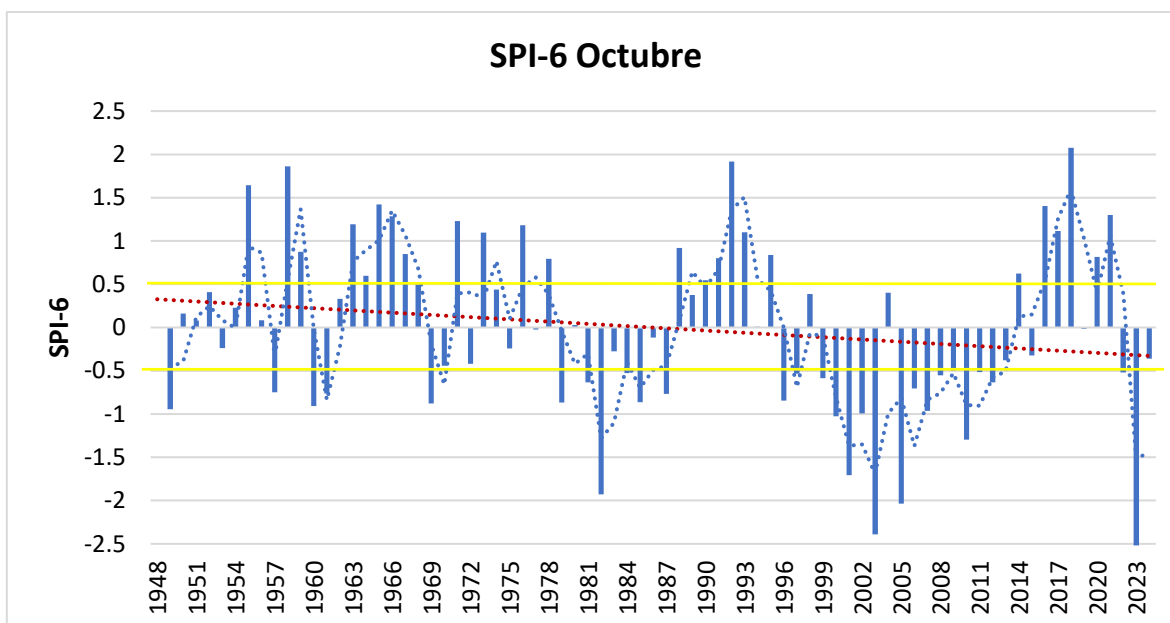


Figura 51. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI-6) para el mes de octubre en el Lago de Cuitzeo (1948–2024).

Fuente: Elaboración propia con base en datos de International Research Institute for Climate and Society.

Los valores más extremos y negativos del SPI-6 se registraron en los años 1982 y 2001, con valores de -1.92 y -1.70, respectivamente, los cuales se clasifican como condiciones de sequía extrema según la categorización utilizada en este estudio. Por otro lado, los años 2003, 2005 y 2023 se destacaron por presentar valores de -2.38, -2.03 y -2.51, respectivamente, lo que corresponde a eventos de sequía excepcional. Estas condiciones reflejan déficits significativos en las precipitaciones, lo que podría tener un impacto directo en la disponibilidad hídrica, afectando tanto la recarga de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, como las actividades que dependen de este recurso, especialmente la agricultura. Además, estos eventos podrían estar asociados a fenómenos de variabilidad climática de gran escala, como El Niño, los cuales influyen en la distribución de la precipitación a nivel regional.

En contraste, los valores positivos del SPI-6 superiores a 1.5 se registraron en los años 1955, 1958, 1992 y 2018, con valores de 1.64, 1.86, 1.91 y 2.07, respectivamente, lo que indica condiciones húmedas con precipitaciones por encima de lo normal durante la temporada de lluvias en la Cuenca del Lago de Cuitzeo (mayo–octubre). Estos valores positivos podrían estar asociados a la influencia de fenómenos como La Niña, los cuales suelen incrementar las precipitaciones en diversas regiones.

La media móvil muestra un comportamiento cíclico, con alternancia entre periodos húmedos y secos. No obstante, en las últimas décadas se observa una mayor frecuencia de años con déficit de precipitación, lo que sugiere una posible transición hacia condiciones más secas en la región. Esta

situación resulta relevante para la gestión de los recursos hídricos, particularmente en zonas agrícolas.

Entre 1962 y 1968, la región vivió un periodo de lluvias por encima de lo habitual, lo que permitió la recarga de los cuerpos de agua en la cuenca. Sin embargo, entre 1979 y 1987, la situación cambió, dando paso a un periodo seco, caracterizado por una disminución considerable de las precipitaciones. Después, entre 1988 y 1995, se registró otro periodo húmedo, en el que las lluvias volvieron a superar la media, favoreciendo la recuperación hídrica. Este ciclo de humedad fue seguido por un nuevo periodo seco entre 1996 y 2015, con sequías recurrentes que afectaron la disponibilidad de agua, especialmente para la agricultura y otros usos. Finalmente, entre 2016 y 2021, se volvió a observar un periodo húmedo, con precipitaciones superiores a lo normal, lo que ayudó a recuperar parcialmente los niveles de agua en el lago de Cuitzeo.

Es importante resaltar el periodo comprendido entre 1996 y 2015, caracterizado por la prevalencia de condiciones secas, con valores del SPI que alcanzan mínimos de hasta -2.38. Este intervalo de aproximadamente 19 años muestra una persistencia de eventos de sequía, aunque ocasionalmente se observan años con condiciones cercanas a lo normal o ligeramente húmedas, como en 1998, 2004 y 2014, cuyos valores no superan el 1 en la escala de SPI. Sin embargo, estos eventos no constituyen periodos húmedos significativos, por lo que no logran compensar el predominio de condiciones secas en este periodo.

La línea de tendencia (color rojo) muestra una ligera inclinación negativa, lo que sugiere una posible disminución en las condiciones de humedad a lo largo del periodo analizado. Este comportamiento podría indicar una tendencia hacia condiciones más secas en la región, con implicaciones directas en la disponibilidad de agua en el Lago de Cuitzeo.

b. Respuesta espacio-temporal del Lago de Cuitzeo a partir del Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI).

En este apartado se analizó el año más húmedo (2018) y el año más seco (2023) del periodo estudiado, identificados previamente mediante el SPI. El objetivo es comparar cómo estas condiciones extremas influyen en la recarga o la falta de agua en el Lago de Cuitzeo, observando los cambios en su superficie durante los años mencionados.

El mapa asociado con el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI) para el año 2018 (Figura 52) permite observar la distribución espacial del agua en el Lago de Cuitzeo. Las zonas con valores

más altos de NDWI indican áreas inundadas o con alta reflectancia de agua, mientras que las zonas de menor valor corresponden a terrenos más secos o de vegetación densa que no refleja adecuadamente el agua en la medición satelital.

Se observa que, en los vasos oeste y este del lago, la presencia de agua es evidente en varias áreas de los municipios circundantes, lo que indica una cobertura hídrica significativa en estas zonas. En contraste, el vaso central del lago muestra valores de 0 en el NDWI, lo que señala la ausencia total de agua en esa área.

En conjunto, el análisis del SPI-6 y el mapa NDWI proporcionan una visión integral de la dinámica del Lago de Cuitzeo a lo largo del tiempo, permitiendo identificar tanto los eventos extremos como las variaciones espaciales del agua en la región. Este tipo de información es de gran relevancia para la planificación y gestión ambiental, especialmente en contextos de cambio climático y presión sobre los recursos hídricos.

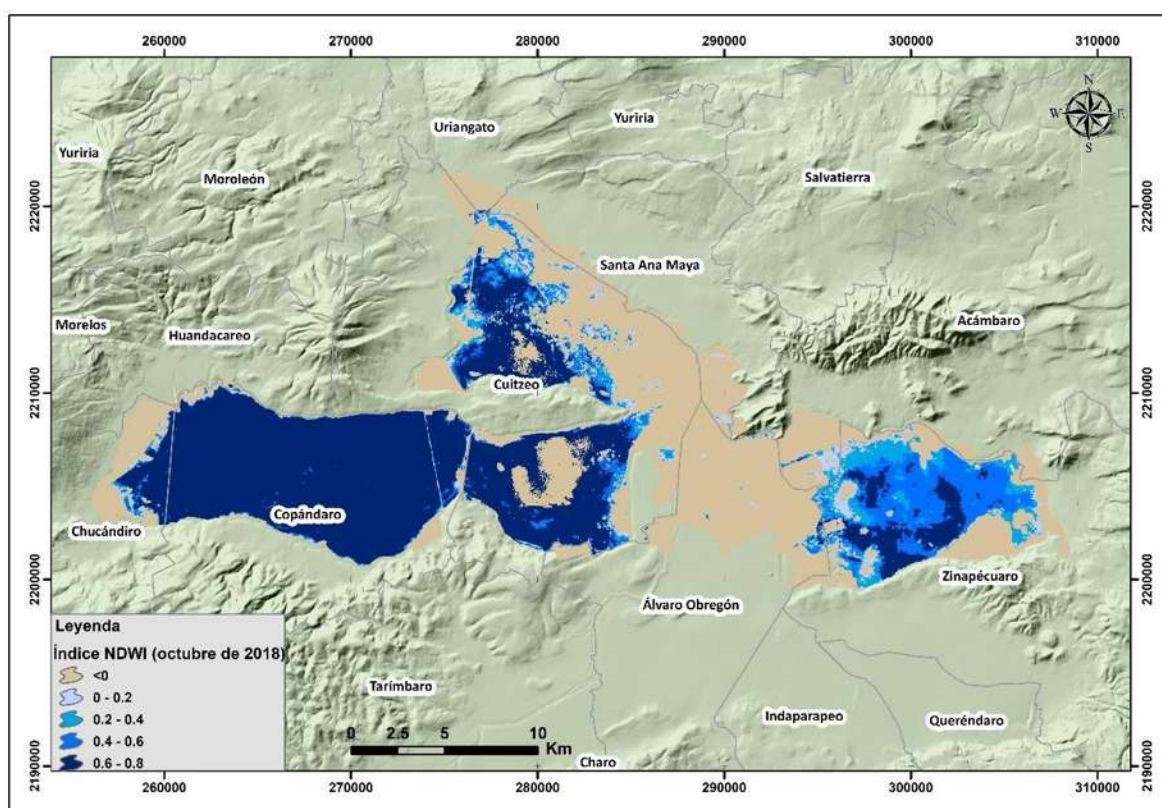


Figura 52. Respuesta espacial del Lago de Cuitzeo año 2018 a partir del Índice NDWI.

Fuente. Elaboración propia.

Continuando con el análisis en la Figura 53 se muestra el mapa de respuesta espacial del Lago de Cuitzeo para el año 2023, basado en el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI), muestra

una distribución espacial que indica una notable reducción de agua en ciertas áreas del lago, lo que refleja un cambio significativo en comparación con el año 2018.

En el mapa se observa que, en 2023, gran parte del Lago de Cuitzeo presenta zonas sin agua o baja presencia de la misma, lo cual se representa con tonalidades café. Esto sugiere que áreas que en años anteriores pudieron haber estado cubiertas por agua ahora se encuentran secas o con presencia mínima de agua. Este fenómeno puede ser el resultado de variaciones estacionales, como sequías, o de un descenso en el nivel del agua debido a condiciones climáticas adversas, cambios en el uso del suelo o la sobreexplotación de los recursos hídricos. En contraste, las zonas con tonalidades más azules, como las de Zinapécuaro, aún muestran agua superficial, correspondiente al vaso este del lago, particularmente en la zona de los manantiales.

Comparado con el mapa de 2018, que mostraba una mayor extensión de agua, el mapa de 2023 muestra un descenso en la cobertura de agua, especialmente en el vaso oeste del lago. Las zonas como Copándaro y Álvaro Obregón, que antes estaban más inundadas, muestran ahora grandes superficies secas, lo que sugiere una posible desecación parcial o un descenso en los niveles del agua.

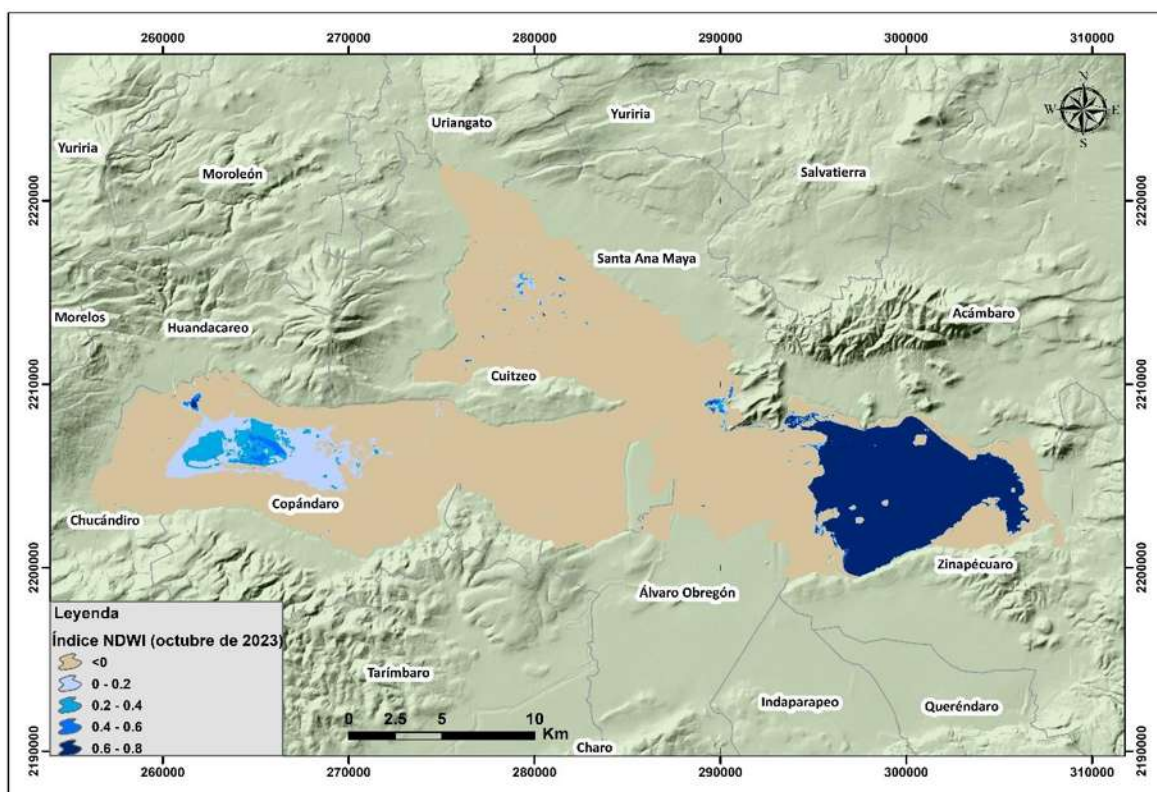


Figura 53. Respuesta espacial del Lago de Cuitzeo año 2023 a partir del Índice NDWI.

Fuente. Elaboración propia.

El análisis de los mapas de NDWI para 2018 y 2023 nos permite comparar cómo la variabilidad climática y otros factores han afectado la dinámica del agua en el Lago de Cuitzeo. Se observa una reducción notable en la cobertura de agua, especialmente en el vaso oeste del lago, en 2023 en comparación con 2018. Estos resultados destacan la necesidad de monitorear continuamente los recursos hídricos del lago, ya que nos ayudan a entender mejor sus fluctuaciones y a tomar decisiones más informadas sobre la gestión y el uso sostenible del agua en la región.

Capítulo 6

Discusión de Resultados

El comportamiento de la precipitación en la cuenca presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, sin evidenciar una tendencia uniforme entre las estaciones. Esto sugiere que los cambios observados están dominados por procesos de variabilidad climática, más que por una señal de cambio sostenido, lo cual es característico de esta variable.

En este sentido, el incremento en la frecuencia de eventos extremos puede interpretarse como una intensificación de la precipitación, más que como un aumento en los volúmenes acumulados. Esto indica una mayor concentración de la lluvia en periodos cortos, lo que puede favorecer procesos como el incremento del escurrimiento superficial, la erosión del suelo y una menor infiltración, afectando la recarga hídrica y generando implicaciones directas en la disponibilidad de agua en el lago.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Tapia et al. (2011) en su investigación sobre el cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán, en la que analizaron la precipitación en dos periodos: 1963-1972 y 2001-2010. Aunque en su estudio se utilizó un análisis estadístico comparativo, los resultados obtenidos son muy similares a los de esta investigación. En ambos periodos no se detectó un cambio significativo en el volumen total de precipitación anual, pero sí se observó una intensificación de los eventos de lluvia.

En un estudio de Granados et al. (2006) sobre la variación de la precipitación y su impacto en la agricultura en Michoacán, se concluyó que los cultivos de temporal son muy vulnerables a la variabilidad climática específicamente en la lluvia. Durante el periodo analizado (1997-2006), las superficies sembradas y cosechadas presentaron variaciones significativas, debido a las lluvias tempranas, tardías y las sequías, lo que afectó directamente la producción agrícola.

Por otra parte, en una investigación realizada por Manzanilla-Quñones et al. (2021), sobre escenarios climáticos (CMIP-5) para la Reserva de la Biósfera Pantanos de Centla, Tabasco, se utilizaron datos de seis estaciones meteorológicas para analizar el comportamiento de la precipitación y la temperatura. En el caso de la precipitación, los resultados mostraron una estacionalidad bien definida, con un periodo de lluvias de mayo a noviembre y un periodo seco de febrero a abril. Así mismo, no se identificaron cambios significativos en la precipitación durante el

periodo 1960–2015, lo que confirma que la precipitación no presenta una tendencia definida, sino un comportamiento dominado por la variabilidad. En contraste, la temperatura muestra incrementos estadísticamente significativos, lo que evidencia una señal más clara de cambio climático en esta variable. Este comportamiento coincide con lo observado en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Esta dinámica de las variables de precipitación y temperatura tiene un impacto directo en la calidad de vida de la población, ya que la disminución de la producción afecta a las comunidades rurales. En la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde la agricultura es una de las principales actividades económicas, esta variabilidad en la precipitación puede afectar tanto la seguridad alimentaria como el bienestar de los habitantes. La vulnerabilidad de los cultivos a estos cambios destaca la necesidad urgente de implementar estrategias adaptativas para enfrentar los efectos de la variabilidad climática en la región.

No ha detectado una tendencia clara en la precipitación regional y es consistente con lo observado en los indicadores de cambio climático para la Cuenca del Lago de Cuitzeo analizados en el segundo objetivo, donde variables como PRCPTOT, R1mm, R10mm, R20mm y P95pTOT no muestran una tendencia clara, sino una marcada variabilidad interanual. Esto refuerza la idea de que los cambios en la precipitación se expresan principalmente a través de la variabilidad y la intensificación de eventos.

En este contexto, para comprender de manera integral la dinámica climática de la cuenca a partir de los datos observados, es necesario considerar el comportamiento de la temperatura, debido a su influencia directa en procesos como la evapotranspiración y el balance energético. A partir del análisis de las normales climatológicas y los diagramas de caja (boxplots), se observan diferencias en el comportamiento térmico entre las estaciones dentro de la cuenca. Estas diferencias parecen estar relacionadas no solo con la dinámica climática regional, sino también con condiciones propias de cada sitio, como el grado de urbanización, la cercanía a cuerpos de agua y las características del entorno donde se ubican las estaciones.

En este sentido, la ubicación geográfica de cada estación permite entender mejor los procesos que influyen en la dinámica térmica. En el caso de Carrillo Puerto, la estación se encuentra en un entorno con presencia de áreas agrícolas y un nivel de urbanización bajo a moderado, donde predominan superficies abiertas. Esto favorece un mayor calentamiento durante el día y una pérdida de calor más eficiente durante la noche, lo que se traduce en una mayor variabilidad térmica diaria.

La estación de Huingo se localiza en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo, en un entorno donde la presencia del cuerpo de agua y la humedad asociada influyen directamente en la regulación térmica. El lago funciona como un regulador natural del clima, ya que almacena calor durante el día y lo libera de forma gradual durante la noche, reduciendo así las variaciones de temperatura y generando condiciones más estables en comparación con otras zonas de la cuenca.

En contraste, la estación de Morelia se ubica dentro de una zona altamente urbanizada, caracterizada por una alta densidad de edificaciones, infraestructura y superficies impermeables. Estas condiciones modifican el balance energético, favoreciendo la acumulación de calor durante el día y su liberación durante la noche. Este comportamiento es característico del fenómeno conocido como isla de calor urbana, en el cual las zonas urbanas presentan temperaturas más elevadas, particularmente durante la noche y durante el invierno (Jáuregui, 1993). Además, la presencia de contaminantes atmosféricos y los cambios en el uso del suelo pueden influir en la radiación solar incidente, lo que contribuye a que las diferencias entre las temperaturas diurnas y nocturnas sean menores.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Price et al. (1999), donde se indica que el incremento de la temperatura mínima puede atribuirse al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, así como a cambios en el uso del suelo y al incremento de la urbanización. Por esta razón, las estaciones meteorológicas en el mundo reportan esta tendencia, debido a que la mayoría se encuentran en zonas urbanas. Ello lleva a cuestionar si se trata de un efecto del calentamiento global, de una detección local asociada a las islas de calor urbano alrededor del planeta, o de una combinación de ambos procesos.

Estos diferentes comportamientos entre estaciones pueden interpretarse a partir de los escenarios propuestos por Santillán-Espinoza et al. (2011), los cuales permiten clasificar las distintas combinaciones de cambio entre la temperatura máxima y mínima. Bajo este enfoque, se observa que las estaciones de la cuenca responden a distintos escenarios térmicos, lo que evidencia la influencia de factores locales en la forma en que se manifiestan las variaciones de temperatura.

En la Figura 54 se resaltan en color rojo los escenarios que corresponden a las estaciones analizadas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. En particular, el escenario 3 se asocia con la estación Huingo (16052), el escenario 8 con la estación Morelia (16082) y el escenario 9 con la estación Carrillo Puerto (16016).

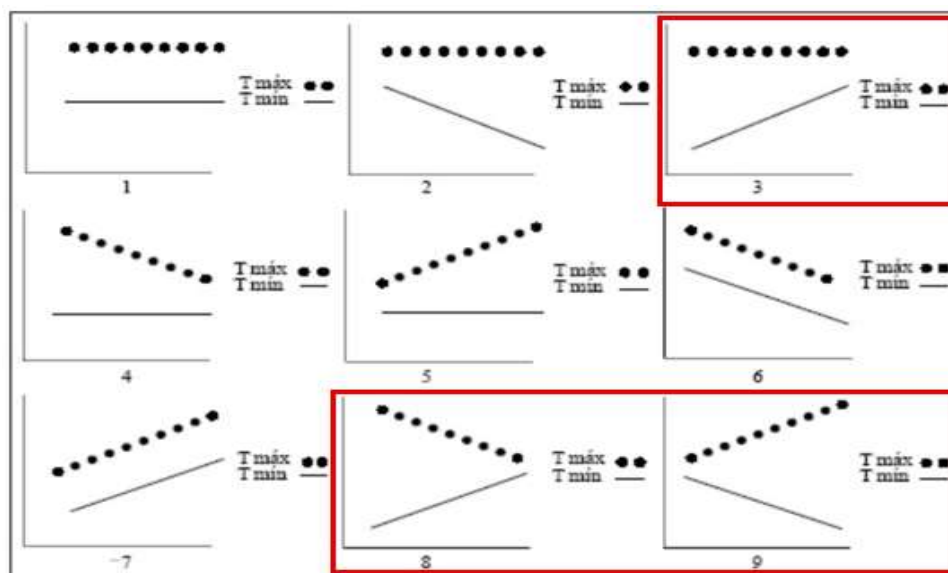


Figura 54. Escenarios posibles al considerar tendencias de temperatura máxima y mínima,
Fuente: Santillán-Espinoza et al. (2011).

Las diferencias en el comportamiento conjunto de la temperatura máxima y mínima se reflejan en cambios en el rango térmico diario. En el caso de Carrillo Puerto, el aumento en este rango implica una mayor diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas, lo que puede favorecer a una mayor capacidad evaporativa de la atmósfera. Como consecuencia, se incrementa la pérdida de agua por evaporación y transpiración, lo que se traduce en una mayor demanda de agua por parte de los cultivos.

En las estaciones de Morelia y Huingo, de acuerdo con la clasificación de Santillán et al. (2011), el rango térmico diario tiende a disminuir. Esta reducción implica una menor diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas, lo que puede asociarse con una menor capacidad evaporativa de la atmósfera y, en consecuencia, con una reducción en la evapotranspiración del cultivo. Bajo estas condiciones, los requerimientos de agua para riego podrían ser menores en comparación con zonas donde el rango térmico es más amplio, como en Carrillo Puerto.

Los resultados obtenidos son consistentes con las tendencias reportadas en el contexto del cambio climático global, particularmente en el incremento de las temperaturas mínimas, como se señalan los informes del IPCC. Sin embargo, el comportamiento observado en la Cuenca del Lago de Cuitzeo también está fuertemente influenciado por factores locales, como el grado de urbanización, la cercanía a cuerpos de agua y el uso del suelo, lo que modula la forma en que estas tendencias se manifiestan a escala local.

El comportamiento de los resultados a escala regional en la Cuenca del Lago de Cuitzeo no difiere de manera significativa de lo observado a nivel local en las estaciones meteorológicas. En ambos casos, la precipitación se caracteriza por una alta variabilidad, sin una tendencia clara de incremento o disminución en su volumen.

Según el IPCC (2014), bajo todos los escenarios de emisiones evaluados, la temperatura en superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Así mismo, es muy probable que las olas de calor sean más frecuentes y prolongadas y se potencien con el efecto urbano a escala local, y que los eventos de precipitación extrema se intensifiquen en diversas regiones.

Si bien el análisis de la precipitación y la temperatura permiten identificar patrones generales de variabilidad y cambio en la cuenca, tanto a nivel local, a través del análisis de estaciones meteorológicas, como a nivel regional, mediante indicadores de cambio climático del conjunto CMIP5, estas variables por sí solas no reflejan de manera directa la ocurrencia de sequías o periodos húmedos, ni cómo estos eventos han impactado en el cuerpo de agua, en este caso el lago de Cuitzeo.

Bajo esta perspectiva el SPI-6 sugiere que la precipitación está influenciada principalmente por la variabilidad climática, lo que se refleja en la presencia recurrente de periodos secos y húmedos a lo largo del tiempo, sin que se identifique una tendencia clara de cambio.

Los años que destacan por condiciones húmedas o secas pueden estar influenciados por fenómenos de variabilidad climática como El Niño. Un ejemplo de ello es el año 1982, identificado en este estudio como un periodo de sequía extrema. Diversos trabajos han señalado que algunas de las variaciones interanuales más importantes de la precipitación en México están relacionadas con eventos de El Niño, como el ocurrido en 1982–1983 (Galván, 2011), considerado uno de los más intensos del siglo XX y asociado con condiciones de déficit de precipitación en distintas regiones del país. De acuerdo con el mismo autor, la sequía de 1982 presentó una extensión espacial de escala casi nacional, lo que evidencia que este tipo de eventos no responde únicamente a condiciones locales, sino a forzamientos climáticos de mayor escala. De manera complementaria, Díaz-Padilla et al. (2011) reportan que este evento fue registrado por el SPI como una sequía severa, con impactos importantes, particularmente en el sector agrícola.

A partir de ello, el análisis del SPI, que evidencia la presencia de periodos prolongados de sequía en diversas regiones de México, puede contrastarse con lo señalado por la SEMARNAT (2008), donde

se indica que, a nivel estatal, entidades como Michoacán presentan más del 68% de su superficie con un alto grado de vulnerabilidad a la desertificación. Los periodos de sequía identificados no solo reflejan variabilidad climática, sino que, cuando se presentan de forma recurrente, pueden contribuir a procesos de degradación del suelo, especialmente en regiones con condiciones de vulnerabilidad, afectando principalmente a las actividades agrícolas. Este comportamiento resulta particularmente relevante en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, donde la dependencia de la agricultura de temporal incrementa la sensibilidad del sistema ante la recurrencia de periodos secos.

Resulta pertinente analizar cómo esta variabilidad climática se refleja en la dinámica del cuerpo de agua, lo cual se aborda en el siguiente apartado mediante el análisis del NDWI.

El comportamiento del NDWI muestra cómo el lago responde a las condiciones de variabilidad climática, reflejándose en cambios en la extensión del espejo de agua entre años con distinta disponibilidad hídrica. A partir de este índice es posible identificar de forma clara la reducción o expansión del cuerpo de agua bajo condiciones de sequía y periodos húmedos, lo cual permite interpretar la dinámica hidrológica del lago. Este comportamiento coincide con lo planteado por McFeeters (1996), quien desarrolló el NDWI como una herramienta para resaltar la presencia de agua en imágenes de teledetección.

El análisis comparativo de los mapas de NDWI para 2018 y 2023 permite interpretar cómo responde el Lago de Cuitzeo ante condiciones climáticas contrastantes previamente identificadas mediante el SPI. En 2018, la mayor extensión de agua refleja un escenario con mayor disponibilidad hídrica; sin embargo, la persistencia de zonas sin agua en el vaso central, incluso en un año húmedo, sugiere la presencia de condiciones locales que limitan su recuperación. Este comportamiento coincide con lo

reportado por el Monitor de Sequía de México (Figura 55), donde para finales de 2018 predominaban condiciones cercanas a lo normal en gran parte del territorio nacional (SMN, 2019).



Figura 55. Monitor de sequía de México año 2018.

Fuente: SMN (2019).

En contraste, el año 2023 evidencia una reducción significativa de la cobertura de agua, lo que refleja la sensibilidad del lago ante condiciones de sequía. No obstante, esta disminución no responde únicamente al déficit de precipitación, sino que también puede estar influenciada por factores antrópicos. Entre ellos destacan la sobreexplotación del recurso hídrico, los cambios en el uso del suelo y las modificaciones en la dinámica hidrológica de la cuenca, los cuales han contribuido al deterioro progresivo del sistema lacustre. Adicionalmente, la exposición de sedimentos en zonas secas, particularmente en el vaso oeste, favorece la generación de tolvánegas, lo que puede incidir en la calidad del aire y generar posibles implicaciones en la salud de la población. A esto se suman procesos como la eutrofización y la acumulación de contaminantes, que también afectan la calidad y disponibilidad del agua.

Para finales de 2023, gran parte del territorio nacional presentó condiciones de sequía (Figura 56), incluyendo la región centro-occidente donde se ubica la Cuenca del Lago de Cuitzeo (SMN, 2024). Esto indica que la disminución de la cobertura de agua en el lago no corresponde a un evento

aislado, sino a un escenario de déficit hídrico a mayor escala. En este sentido, la reducción del espejo de agua identificada mediante el NDWI es consistente con las condiciones reportadas a nivel nacional, lo que permite establecer una relación clara entre la variabilidad climática y la respuesta hidrológica del sistema lacustre.

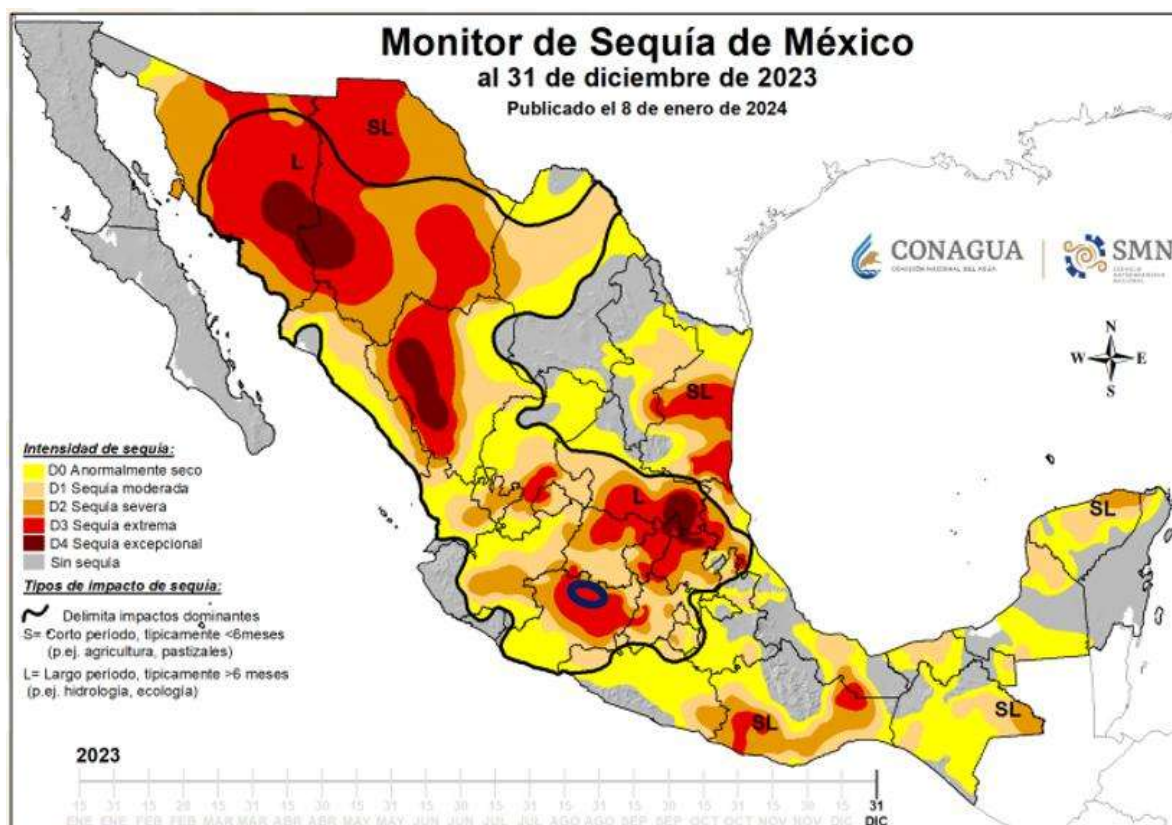


Figura 56. Monitor de sequía de México año 2023.
Fuente: SMN (2024).

El comportamiento del Lago de Cuitzeo muestra que su dinámica no depende únicamente de la variabilidad climática, sino también de condiciones locales que influyen en su respuesta. La reducción del espejo de agua en años secos y la presencia de zonas sin agua incluso en periodos más húmedos reflejan que el sistema no responde de manera uniforme en el espacio. La variabilidad del Lago de Cuitzeo en su extensión y profundidad no depende exclusivamente de las condiciones climáticas, es un proceso multifactorial que involucra procesos naturales y antrópicos, cualquier análisis que no considere ambos factores queda incompleto.

Conclusiones

El análisis de las estaciones meteorológicas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo reveló que, de las 32 estaciones evaluadas, solo 3 cumplieron con los parámetros establecidos por la OMM, es decir, que cuentan con datos completos y consistentes, con una disponibilidad superior al 80%. Aunque algunas estaciones ofrecieron una cobertura adecuada de datos, otras presentaron vacíos prolongados y saltos injustificados en las variables de precipitación y temperatura, lo que afectó la calidad de los registros. En particular, las estaciones de Carrillo Puerto, Huingo y Morelia se destacaron por tener series de datos continuas y confiables, lo que las hizo aptas para el análisis climático.

La dinámica climática en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, a escala local y para el periodo 1970–2020, muestra que las variables de precipitación y temperatura están influenciadas por la variabilidad climática, así como por factores locales como la ubicación de la estación, su entorno y la cercanía a cuerpos de agua. En el caso de la precipitación, se observa un comportamiento marcadamente variable, con lluvias concentradas en verano y parte de otoño (mayo–octubre). A escala decadal, destaca la presencia de eventos extremos en las últimas décadas, lo que se traduce en lluvias más intensas en periodos relativamente cortos.

En cuanto a la temperatura, la señal de cambio climático es más evidente que en la precipitación; sin embargo, no se manifiesta de manera uniforme en toda la cuenca. Esta variabilidad puede estar influenciada por factores locales como la altitud, el relieve, la cobertura vegetal y la presencia de zonas urbanas, particularmente en la ciudad de Morelia, donde el efecto de isla de calor puede modificar el comportamiento térmico.

Si bien se identifican incrementos en la temperatura, particularmente en las mínimas, que pueden favorecer procesos como la evaporación y contribuir a la desecación del Lago de Cuitzeo, estos no constituyen el factor determinante. La dinámica del lago responde a la interacción de múltiples procesos, donde las actividades antrópicas como la sobreexplotación del recurso hídrico, el desvío para riego, la contaminación y la falta de un manejo integral de la cuenca tienen un peso predominante.

A escala regional, los indicadores climáticos con proyección al año 2050 muestran que la precipitación no presenta una tendencia clara, manteniendo un comportamiento variable entre años. En general, esta variable continúa dominada por la variabilidad climática. En contraste, la

temperatura presenta una señal clara de cambio, la cual se intensifica bajo el escenario de emisiones RCP 8.5. Se observa una disminución en la frecuencia de días y noches frías, así como un aumento en los días y noches cálidas, junto con un incremento en los extremos de la temperatura mínima. Esto indica que, a escala regional, el cambio climático se manifiesta principalmente en la temperatura, más que en la precipitación.

El SPI-6 muestra que en la Cuenca del Lago de Cuitzeo se presentan periodos secos y húmedos a lo largo del tiempo (1948 - 2024), con etapas de recuperación y de disminución en la disponibilidad de agua. Sin embargo, en las últimas décadas se observan periodos secos más prolongados, lo que afecta la recuperación del sistema y se refleja en el análisis del NDWI, donde los años secos presentan menor presencia de agua superficial, mientras que en los años húmedos el lago muestra recuperación, aunque no de forma uniforme en toda la cuenca.

En síntesis, la presente investigación muestra que la dinámica climática en la Cuenca del Lago de Cuitzeo no depende únicamente del clima, sino también de factores locales y, en especial, de las actividades humanas que se desarrollan en la cuenca. Aunque se identifican señales de cambio climático, principalmente en la temperatura, su efecto se combina con problemáticas como la sobreexplotación del agua, el uso para riego, los cambios en el uso del suelo y el manejo inadecuado de la cuenca. Por ello, la situación actual del lago responde a la interacción de factores naturales y antropogénicos, lo que hace necesario abordarlo de manera integral. En este contexto, la desecación del Lago de Cuitzeo no puede atribuirse a una sola causa, sino a la combinación de procesos climáticos y antrópicos, donde la presión humana intensifica los efectos de la variabilidad y cambio climático.

El desarrollo de esta investigación permitió cumplir con los objetivos establecidos. Se identificaron patrones de variabilidad climática en las variables de precipitación y temperatura, así como señales de cambio climático a nivel local. Además, el análisis de las proyecciones climáticas a escala regional evidenció una señal más clara de cambio climático en la temperatura, reflejada en la disminución de días y noches frías, así como en el incremento de días y noches cálidas. Por otro lado, el análisis del SPI durante la temporada de lluvias (mayo a octubre) y el estudio del NDWI proporcionaron información relevante sobre la variabilidad de las precipitaciones y la respuesta hídrica del Lago de Cuitzeo.

Recomendaciones

Se recomienda mejorar la red de estaciones meteorológicas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, ya que los datos disponibles son limitados y en muchos casos presentan inconsistencias. Contar con información más completa y continua permitiría analizar con mayor precisión el comportamiento climático en la región.

También es necesario impulsar estrategias de manejo integral de la cuenca que consideren no solo las condiciones climáticas, sino también las actividades humanas, particularmente la regulación en la extracción de agua y su uso para riego, con el fin de reducir la presión sobre el recurso hídrico.

Se sugiere promover campañas de concientización dirigidas a la población local sobre la importancia del Lago de Cuitzeo como regulador ambiental y hábitat de diversas especies, con el fin de fomentar su conservación y uso responsable.

Se recomienda implementar medidas para el uso eficiente del agua en la cuenca, particularmente en el sector agrícola, mediante la tecnificación del riego y la reducción de pérdidas, con el objetivo de disminuir la presión sobre el lago.

Así mismo, es importante que la información generada en esta investigación se incorpore en la toma de decisiones, de modo que contribuya al diseño de políticas públicas orientadas a la gestión sostenible del agua y la conservación del Lago de Cuitzeo.

Bibliografía

- Aguilar-Arriaga, G., Cano-Paredes, J., Sánchez-Cohen, I., Velázquez-Valle, M. A., & López-López, F. (2019). Análisis temporal de sequías (1922–2016) en la cuenca alta del río Nazas usando el SPI y su relación con ENSO. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 126–153.
- Allende, T. C., & Mendoza, M. E. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas*, (63), 56–76.
- Allende, T. C., Mendoza, M. E., & López, E. (2010). *Hidrología y regionalización hidrogeográfica*. En *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y su entorno socioambiental* (pp. 70–73). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Armenta, G. (2020). *Escenarios de variabilidad climática y cambio climático para la cuenca del lago de Tota*. CONDESAN–Proyecto AICCA/Minambiente/IDEAM. <https://repositorioaicca.condesan.org/producto/escenarios-de-variabilidad-climatica-y-cambio-climatico-para-la-cuenca-del-lago-de-tota/>
- Bocco, G., López Granados, E., & Mendoza, M. E. (2012). La investigación ambiental en la cuenca del lago de Cuitzeo: Una revisión de la bibliografía publicada. *Investigaciones Geográficas*, (77), 7–20.
- Bocco, G., Mendoza, M., Barba, A., Serrato-Barajas, B., & Sáñez-Reyes, T. (2008). *La cuenca del Lago de Cuitzeo: Problemática, perspectivas y retos hacia su desarrollo sostenible*. Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán.
- Brendel, A. S. (2021). Impactos de la variabilidad climática en la vegetación de la cuenca del río Sauce Grande (Argentina). *Boletín Geográfico*, 43(2). <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/344/3442719002/index.html>
- Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., & Vázquez-Peña, M. A. (2017). Análisis de sequías meteorológicas en la cuenca del río Fuerte, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-03>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. (s. f.). *CUCAPÁ-CLICOM: Climatología y cambio climático en México*. <https://cucapa-clicom.cicese.mx/>

CEPAL. (2019). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>

Cerano Paredes, J., Esquivel Arriaga, G., Sánchez Cohen, I., & Estrada Arrellano, J. R. (2020). Analysis of meteorological droughts in the Yaqui River Basin, Mexico and its relationship with ENSO. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (86), e2937. <https://doi.org/10.21138/bage.2937>

Contreras, A. T. R. (2001). *Espacio geográfico*. UAEM.

Dávila-Ortiz, R., Velázquez-Zapata, J. A., & Algara-Siller, M. (2020). Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(3), 1–12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.021>

Desert Research Institute, University of Idaho, & University of California, Merced. (s. f.). *Climate Engine*. <https://app.climateengine.org/climateEngine>

Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227–240.

Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Quiroz, R., Garatuza-Payán, J., Watts-Thorp, C., Cruz-Medina, I. R., & Guajardo-Panes, R. A. (2011). *Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos*. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000400004

EOS Data Analytics. (2023). *NDWI: Normalized Difference Water Index*. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>

Expert Team on Climate Change Detection and Indices. (2020). *ETCCDI climate change indices*. Pacific Climate Impacts Consortium. <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>

Folke, C. (2016). *Resilience*. In Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.8>

Garduño-Monroy, V. H., & Israde-Alcántara, I. (2010). Geología. En S. Cram, L. Galicia, & I. Israde-Alcántara (Comps.), *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: análisis de su geografía y su entorno*

socioambiental (pp. 28–31). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México / Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

García-Rengifo, C., & Durán-Ballén, S. (2023). Variabilidad climática en la cuenca hidrográfica del río Chalpi Grande en Napo-Ecuador. *Enfoque UTE*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v14n1.872>

Gómez-Sandoval, L., Villanueva-Estrada, R. E., Israde-Alcántara, I., Hernández-Guzmán, R., Ávila-Olivera, J. A., Cenicerós Bombela, N. E., & Cano Correa, M. del C. (2025). *Analysis of flow patterns and hydrogeochemical characteristics of groundwater in a volcanic tectonic basin*. *Geofísica Internacional*, 64(4), 1781–1802.

Granados Ramírez, R., Reyna Trujillo, T., & Aguilar Sánchez, G. (2006). *Variación de la precipitación, efectos en la agricultura y algunos problemas sociales en el estado de Michoacán, México*. Instituto de Geografía, UNAM. <https://www.ige.unam.mx>

Hernández Santoyo, A., Alcaraz Vera, J. V., & Ortiz-Paniagua, C. F. (2024). Efectos del cambio climático en la agricultura regional: caso de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6), e3246. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3246>

Herrera Toledo, C., Landa Ordaz, R., Aguilar Amilpa, E., & Sandoval Minero, R. (2010). *Contribución para la formulación del plan de acción frente al cambio climático del estado de Michoacán*. Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/168371468299128378/pdf/588720WP05PAN10Box353815B01PUBLIC1.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Cuenca hidrológica Lago de Cuitzeo: Humedales. Informe técnico*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197094.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Cambio climático: bases físicas. Guía resumida del sexto informe de evaluación del IPCC, Grupo de Trabajo I*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/ipcc-guia-resumida-gt1-bases-fisicas-ar6_tcm30-533081.pdf

International Research Institute for Climate and Society. (2025). *IRI analyses SPI: SPI-PRECL0p5 6-month data*. Columbia University. https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IRI/.Analyses/.SPI/.SPI-PRECL0p5_6-Month/

IPCC. (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report.pdf

IPCC. (2013). *Glosario* (S. Planton, Ed.). En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del IPCC* (pp. 185–204). Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*. Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial / Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_es-1.pdf

IPCC. (2018). *Anexo I: Glosario*. En J. B. R. Matthews (Ed.), *Calentamiento global de 1,5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield, Eds.). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

Israde-Alcántara, I., & Garduño-Monroy, V. H. (1999). *Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacan)*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151(1–3), 209–227. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00024-3)

Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., & Ortega-Murillo, R. (2002). *Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo*. *Hidrobiológica*, 12(1), 61–78.

Jáuregui Ostos, E. (1993). *La isla de calor urbano de la Ciudad de México a finales del siglo XIX*. *Investigaciones Geográficas*, (26), 5–19. <https://doi.org/10.14350/rig.59016>

Jiménez Ángeles, A., Valdés Carrera, A. C., López Granados, E. M., & Mendoza, M. E. (2025). Respuesta de la superficie del lago de Cuitzeo a las variaciones climáticas, un enfoque basado en percepción remota y sistemas de información geográfica. En M. L. Hernández Aguilar, B. L. Campos Cámara, N. A. Oropeza García, & G. D. López Montejo (Coords.), *Sociedades resilientes y la reducción del riesgo de desastre* (pp. 67–86). Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.

Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Magaña Rueda, V. O. (Ed.). (1999). *Los impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2022/09/ElNino.pdf>

Magrin, G. O. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/618b144d-e069-4e38-8e12-1da1a0bdb817/content>

Manzanilla-Quiñones, U., Pozo-Montuy, G., Delgado-Valerio, P., Martínez-Sifuentes, A. R., & Aguirre-Calderón, O. A. (2021). Escenarios climáticos (CMIP-5) para la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, Número Especial*, e2588. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2588>

Martínez-Arredondo, J. C., Meléndez, R. J., Ortega Chávez, V. M., & Ramos Arroyo, Y. R. (2015). Descripción de la variabilidad climática normal (1951–2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México. *Acta Universitaria*, 25(5), 57–68. <https://doi.org/10.15174/au.2015.799>

McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Mejía, J. F., González, J. D., & Albarrán, A. (2022). Influencia de la variabilidad climática en los pantanos altoandinos de la microcuenca Miguaguó, Andes venezolanos. *Revista de Ciencias Ambientales (Tropical Journal of Environmental Sciences)*, 56(2), 38–62. <https://doi.org/10.15359/rca.56-2.3>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2014). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*. <https://research.csiro.au/gestionrapel/wp-content/uploads/sites/79/2016/11/Plan-Nacional-de-Adaptaci%C3%B3n-al-Cambio-Clim%C3%A1tico-2014.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030*. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pnacc-2021-2030_tcm30-512163.pdf

Montealegre Bocanegra, J. E., & Pabón Caicedo, J. D. (2000). *La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño–La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia*. *Meteorología Colombiana*, 2, 7–21.

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Naciones Unidas. (1997). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpsan.pdf>

Naciones Unidas. (2015). *Acuerdo de París*. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf

NASA. (2024). *Evidencia del cambio climático*. NASA Ciencia. <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/evidencia/>

National Drought Mitigation Center. (2018). *SPI Generator* [Software]. University of Nebraska–Lincoln. <https://drought.unl.edu/Monitoring/SPI/SPIProgram.aspx>

Ortiz Arenas, A. L., Ruiz Ochoa, M., & Rodríguez Miranda, J. P. (2017). Planificación y gestión de los recursos hídricos: una revisión de la importancia de la variabilidad climática. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), 100–105. <https://doi.org/10.22335/rlct.v9i1.401>

Pérez-Ortiz, M. A., Montenegro-Murillo, D. D., & Vargas-Franco, V. (2022). Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia. *DYNA*, 89(221), 168–176. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v89n221/2346-2183-dyna-89-221-168.pdf>

Price, C., Michaelides, S., Pashiardis, S., & Alpert, P. (1999). Long term changes in diurnal temperature range in Cyprus. *Atmospheric Research*, 51(2), 85–98. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(99)00022-8)

Puente, V. M. T. (2019). *Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático*. *Revista Digital Universitaria*, 20(1). <https://doi.org/10.22201/codetic.16076079e.2019.v20n1.a3>

Reyes Rivero, A. C., Montilla Pacheco, A. de J., Castillo García, P. G., & Zambrano Vera, M. N. (2017). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales: Factores socialmente contruidos*. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 2(6), 22–28. <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol2iss6.2017pp22-28>

Rodríguez Becerra, M., & Mance, H. (2009). *Cambio climático: lo que está en juego*. <https://doi.org/10.57784/1992/46592>

Rodríguez Becerra, M., & Mance, H. (2009). *Cambio climático: lo que está en juego*. Editorial Universidad del Rosario. <https://doi.org/10.57784/1992/46592>

Rodríguez-Gómez, C., Prol-Ledesma, R. M., Jácome Paz, M. P., et al. (2025). Multi-temporal study of climate change impacts on Cuitzeo Lake, México. *Discover Water*, 5, 90. <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00277-z>

Royal Netherlands Meteorological Institute. (2022). *KNMI Climate Explorer* [Software]. <https://climexp.knmi.nl/start.cgi>

Ruiz Rivera, N. (2012). *La definición y medición de la vulnerabilidad social: Un enfoque normativo*. *Investigaciones Geográficas*, (77), 63–74.

Sánchez Quispe, S. T., Domínguez Sánchez, C., Urbina, O. L., & Torres Martínez, J. A. (2014). Evaluación de sequías meteorológicas e hidrológicas generadas por el cambio climático en la cuenca del lago de Cuitzeo, en Michoacán, México. En *Memorias del Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental* (Vol. XXXIV, Monterrey, México).

Santiago-Vera, T. de J., García-Millán, M. A., & Michael-Rosset, P. (2018). *Enfoques de la resiliencia ante el cambio climático*. Agricultura, sociedad y desarrollo, 15(4), 531–539.

Santillán-Espinoza, L. E., Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., García-Hernández, J. L., Cerano-Paredes, J., Delgadillo-Ruiz, O., & Valdez-Cepeda, R. D. (2011). Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(Número especial 1), 207–219.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2019). *Monitor de sequía de México al 31 de diciembre de 2018*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://smn.conagua.gob.mx/>

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2024). *Monitor de sequía de México al 31 de diciembre de 2023*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://smn.conagua.gob.mx/>

Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). *Sistema Meteorológico Nacional*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx>

Staines Urias, F., (2007). Cambio climático: interpretando el pasado para entender el presente. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3), 345-351.

Tapia Vargas, L. M., Larios Guzmán, A., Vidales Fernández, I., Pedraza Santos, M. E., & Barradas, V. L. (2011). *Cambio climático en la zona aguacatera de Michoacán: Análisis de precipitación y temperatura a largo plazo. Climatic change in the avocado-producing area of Michoacán: Long-term precipitation and temperature analysis. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Pub. Esp. Núm. 2*, 325-335.

Torres Álvarez, J. A., Tejeda Martínez, A., Vázquez Aguirre, J. L., Brunet, M., Hernández Ávila, P., & Ruiz Barradas, A. (2010). Índices de cambio climático y análisis de variabilidad en el estado de Veracruz, México. En F. Fernández García, E. Galán Gallego, & R. Cañada Torrecilla (Eds.), *Actas del VII Congreso de la Asociación Española de Climatología* (pp. 295–304). Asociación Española de Climatología. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9429>

World Meteorological Organization. (2007). *The role of climatological normals in a changing climate* (WCDMP-No. 61; WMO-TD No. 1377). World Meteorological Organization.

World Meteorological Organization. (2017). *WMO guidelines on the calculation of climate normals* (2017 ed., WMO-No. 1203). World Meteorological Organization.
https://www.agroorbi.pt/livroagrometeorologia/DocsProg/Temas&Exerc%C3%ADciosExtraPorCap%C3%ADtulo/Cap1_Introdu%C3%A7%C3%A3o/Docs/WMO%20Guidelines%20on%20the%20Calculation%20of%20Climate%20Normals_en.pdf

Zamora Martínez, M. C. (2015). Cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31).

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 Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	Caracterización de la variabilidad y cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, periodo 1970-2050	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Ana Gabriela Quezada Ponce	2459407g@umich.mx
Director	Dr. Rafael Trueba Regalado	rafael.trueba@umich.mx
Codirector	Dra. María Lourdes Gozález Arqueros	lourdes.gonzalez@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Boris Chako Tchamabe	mae.geociencias.planificación.territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	si	Mejora en la redacción y ortografía

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	si	Búsqueda de bibliografía referente al tema de investigación.
Formateo de las referencias bibliográficas	no	
Generación de contenido multimedia	no	
Otro	no	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Ana Gabriela Quezada Ponce 
Lugar y fecha	20 de mayo de 2026, Morelia-Michoacán-México. 

Ana Gabriela Quezada Ponce

Caracterización de la variabilidad y cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México, periodo 1970...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:593503287

Fecha de entrega

21 may 2026, 8:03 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

21 may 2026, 8:16 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Caracterización de la variabilidad y cambio climático en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán....pdf

Tamaño del archivo

5.2 MB

129 páginas

38.869 palabras

217.557 caracteres

16% 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
- 10%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
49 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.