

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-03

Artículos

Tendencias espacio-temporales de precipitación y temperatura, así como cambios en clases climáticas de Köppen-Geiger en la subcuenca del río Sila, México (1956-2015)

Spatio-temporal trends in precipitation and temperature, as well as changes in Köppen-Geiger climate classes in the Sila river sub-basin, Mexico (1956-2015)

Raquel Segundo-Sandoval¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9318-1355>

Luis Ricardo Manzano-Solís², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6634-2930>

Roberto Franco-Plata³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3031-6562>

Víctor Hugo Guerra-Cobián⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6193-100X>

¹Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México, rsegundos160@alumno.uaemex.mx

²Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México, lmanzanos@uaemex.mx



³Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México, México, rfp@uaemex.mx

⁴Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México, victor.guerracb@uanl.edu.mx

Autor para correspondencia: Luis Ricardo Manzano-Solís, lrmanzanos@uaemex.mx

Resumen

De acuerdo con diversas instituciones nacionales e internacionales, México es uno de los países más vulnerables a los efectos de la variabilidad climática, como eventos hidrometeorológicos extremos y de cambio climático. La presente investigación se desarrolló con el propósito de conocer cómo se han comportado la temperatura y precipitación en un periodo de 60 años (1956-2015), a partir del análisis de los datos mensuales de las estaciones meteorológicas, mediante la automatización de procesos (para estructurar datos geoespaciales, hacer interpolaciones y clasificar el clima según Köppen-Geiger), y el uso de herramientas geoespaciales, en una de las subcuencas más importantes como fuente de abastecimiento de agua potable tanto para la región como para la Ciudad de México, y una de las principales zonas agrícolas del Estado de México. Los resultados de los tres análisis realizados en este estudio demuestran que aunque se han presentado algunos cambios en los valores de precipitación y temperatura, dichas variaciones no han implicado un cambio en el tipo de clima presente. Sin embargo, no se

descarta que esta situación pueda verse modificada por cambios a nivel cuenca, como aseguran otros autores, quienes mencionan que la precipitación está disminuyendo mientras que la temperatura está aumentando para todo el centro del país. Por lo tanto, se hacen necesarias acciones integradas de conservación ambiental dentro de la subcuenca del río Sila, que permitan mantener las condiciones climáticas actuales, salvaguardando así el bienestar de las futuras generaciones.

Palabras clave: análisis espaciotemporal del cambio, Köppen-Geiger, Mann-Kendall, Subcuenca del río Sila, TerrSet.

Abstract

According to various national and international institutions, which position Mexico as one of the most vulnerable countries to the effects of climate variability, such as extreme hydrometeorological events and climate change, with intensify some of these events. The research was conducted with the purpose of understanding how temperature and precipitation have behaved over a 60-year period (1956-2015), based on the analysis of monthly data from meteorological stations, using process automation (to structure geospatial data, perform interpolations, and classify climate according to Köppen-Geiger), and the use of geospatial tools, in one of the most important sub-basins as a source of drinking water supply, both for the region and for Mexico City, and one of the main agricultural areas in the State of Mexico. The results of the three analyses conducted in this study demonstrate that, although there have been some changes in precipitation and temperature values, these variations have not implied a change in the current climate type. However, it is not ruled out that this

situation may be altered at the watershed level, as other authors assert, mentioning that precipitation is decreasing while temperatures are rising throughout the central region of the country. Therefore, integrated environmental conservation actions within the Sila river sub-basin are necessary to maintain current climatic conditions, thus safeguarding the well-being of future generations.

Keywords: Köppen-Geiger, Mann-Kendall, Sila river Sub-basin, Spatio-temporal analysis of change, TerrSet.

Recibido: 18/01/2023

Aceptado: 08/09/2023

Publicado Online: 25/09/2023

Introducción

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su primer artículo define el cambio climático como "el cambio en el clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempo comparables" (UN, 1992). A diferencia del cambio climático, la variabilidad climática se define como las variaciones en el estado promedio del clima. El término se utiliza para indicar las desviaciones de las estadísticas climáticas durante un cierto periodo de tiempo (p. ej., un mes, una estación o un año), en comparación con las estadísticas a largo

plazo para el mismo periodo calendario de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (OMM, 2022).

Según el Sexto Informe de Evaluación (2023) proporcionado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2023), se proyecta un aumento de 3.2 °C en las temperaturas medias globales para el año 2100 si las políticas consideradas hasta el año 2020 continúan. Debido al aumento de la temperatura en la Tierra, el ciclo hidrológico se vería modificado, ya que su movimiento se debe principalmente a la energía proporcionada por el Sol para elevar el agua (evaporación) y a la gravedad terrestre que hace que el agua evaporada descienda en forma de precipitación (lluvia o nevada). Estas modificaciones podrían: 1) producir lluvias más intensas y frecuentes (con riesgo de inundaciones); o 2) reducir la lluvia, generando veranos más secos (con riesgo de sequías).

Debido a lo anterior, autores como Nigusie y Wondimagegn (2020); Fekadu, Biru y Mamo (2019); Nandi y Manne (2020); Nonki, Lenouo, Lennard y Tchawoua (2019); Pandey, Khare, Kawasaki y Mishra (2019), así como Bedewi y Kumar (2018), consideran que debido al cambio climático los recursos hídricos en regiones áridas o semiáridas como África e India disminuirán, lo que significaría que en los próximos 30 años la población que vive con escasez de agua podría duplicarse. En cambio, González-Celda, Ríos, Benegas-Negri y Argotty-Benavides (2021); Minga (2018); Pilares *et al.* (2018), además de Bedewi y Kumar (2018) predicen un aumento en la cantidad de lluvia, especialmente en países como Ecuador, Perú, Guatemala y México, lo que podría llevar a escorrentías extraordinarias, por lo que Deng, Pisani, Hernández y Li (2020); Minga

(2018); Pílares *et al.* (2018), y Vázquez-Ochoa, Correa-Sandoval, Vargas-Castilleja, Vázquez-Sauceda y Rodríguez-Castro (2021) las interpretan como posibles riesgos futuros que deben considerarse.

Según el Gobierno de México (Gobierno de la República, 2014), el país tiene características geográficas que lo sitúan como uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático. Su ubicación entre dos océanos, su latitud y relieve lo hacen particularmente expuesto a diferentes fenómenos hidrometeorológicos (p. ej., sequías y huracanes). Debido a la alta exposición del territorio mexicano, la adaptación y mitigación al cambio climático es una prioridad. Una forma de iniciar este proceso es preparar un diagnóstico de la vulnerabilidad actual y futura que sirva de base para el diseño y la implementación de acciones para reducirla. Un aspecto fundamental para la evaluación de la vulnerabilidad actual y futura dentro del proceso de adaptación al cambio climático corresponde a la evaluación de la variabilidad climática (Conde & López, 2016).

Este tipo de evaluación debe considerar que ni la variabilidad climática ni el cambio climático tienen un comportamiento uniforme en el territorio (como podría malinterpretarse al consultar mapas a pequeña escala o de baja resolución sobre estos temas), por lo que presentan diferencias según las condiciones locales, siendo necesario trabajar con resoluciones más altas que las manejadas por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (INECC, 2022), que presenta escenarios de cambio climático para todo el país con una resolución de 30 km; sin embargo, tal resolución no es suficiente para realizar un análisis local ni para la identificación de estrategias de conservación, adaptación

y/o mitigación específicas. La baja resolución de estos modelos está directamente relacionada con el grado de incertidumbre en las proyecciones climáticas, pues no capturan completamente las variaciones locales. Por ejemplo, con una resolución de 30 km, la subcuenca estaría contenida en una sola celda de la cuadrícula. Esto puede llevar a la interpretación de que es un territorio homogéneo, y que la variabilidad y/o cambio climático se comportarán de manera uniforme en toda la subcuenca. Por lo tanto, existe incertidumbre espacial al respecto.

Específicamente, la zona de estudio, que es la subcuenca del río Sila, se encuentra en el norte del estado de México. Su importancia radica en que sirve como fuente de abastecimiento de agua potable no solo para la región sino principalmente para la Ciudad de México (63 pozos para uso público urbano y 91 pozos para usos diversos) (Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna) (Cepanaf, 2019); Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2023); Rodríguez (2022), combinado con el crecimiento de la población y la demanda de agua, los cambios no planificados en el uso de la tierra, la falta de servicios de agua potable y las altas tasas de marginación en las partes altas de la subcuenca. Además, los habitantes de la subcuenca tienen la percepción de que la lluvia ha disminuido en los últimos años, causando daños a los cultivos de maíz (Colaborador, 2020; Rodríguez, 2022), que son fundamentales para la población de habla indígena concentrada en el valle.

Teniendo en cuenta estos aspectos, y considerando que hasta ahora no se han realizado estudios sobre la variabilidad climática en la subcuenca del río Sila, con sus posibles consecuencias debido al cambio de categorías climáticas, es esencial generar información que sirva de

base para el análisis e interpretación de escenarios de cambio climático y para las decisiones que se puedan tomar a partir de ellos. Por lo tanto, el desarrollo de este estudio responde a las siguientes preguntas: 1) ¿cómo han evolucionado las precipitaciones y las temperaturas en el análisis a lo largo de 60 años?; 2) ¿ha implicado este comportamiento cambios en las condiciones climáticas promedio?; 3) ¿reflejan los escenarios de cambio climático en la zona la tendencia actual?, y 4) ¿se acentúa o se suaviza esta tendencia actual en el futuro?

Con este propósito, se revisó la literatura relacionada con el análisis de tendencias espacio-temporales, destacando el método no paramétrico de Mann-Kendall (Aawar, Khare, & Singh, 2019; Baig *et al.*, 2022; Basarir *et al.*, 2018; Krishnan, Prasanna, & Vijith, 2019; Marques *et al.*, 2015; Nourani, Mehr, & Azad, 2018; Yanming, Jun, & Xinhua, 2011). En cuanto al análisis estacional y de transición/persistencia, Jiang, Xie, Zhao, He y He (2017); Ngoma, Wen, Ojara y Ayugi (2021), y Wang, Wang, Li, Wu y Yang (2015) señalan que llevar a cabo una clasificación climática para dos periodos de tiempo es la forma más concisa de observar los cambios que han ocurrido entre una etapa y otra. La clasificación climática Köppen modificada por Geiger (en adelante Köppen-Geiger) es una de las clasificaciones climáticas más conocidas en todo el mundo, porque categoriza los climas en función de factores como la temperatura y la precipitación, generando categorías que van desde climas tropicales hasta polares. Esto proporciona un marco integral para comprender los patrones climáticos de diversas regiones (De Oliveira *et al.*, 2020; Engelbrecht & Engelbrecht, 2016; Naranjo, Glantz, Temirbekov, & Ramírez, 2018;

Rahimi, Laux y Khalili, 2020; Ruman, 2020; Zeroual, Assani, Meddi y Alkama, 2019).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue analizar las tendencias espacio-temporales y estacionales de las variables climáticas mensuales de precipitación y temperatura entre 1956 y 2015 en la subcuenca del río Sila, en México, y su asociación con los cambios en la clasificación climática Köppen-Geiger dentro del mismo periodo. Teniendo en cuenta que las variables de temperatura y precipitación afectan directamente al ciclo hidrológico (Aparicio, 1992; Brassington, 1988; Brooks, Ffolliott y Magner, 2013; Campos, 1998; Campos, 2010; Chow, Maidment y Mays, 1988; Davie, 2008; Heano, 2006; Linsley, Kohler y Paulhus, 1958; McCuen, 1998; Shaw, Beven, Chappell y Lamb, 2011; Viessman y Lewis, 1995), se decidió evaluarlas para cumplir así con el objetivo.

La investigación actual consideró analizar los datos como series espacio-temporales de temperatura y precipitación, aplicándolos a un análisis de tendencias que se complementará con las clasificaciones climáticas. Estos aspectos se detallan en la siguiente sección.

Materiales y métodos

La subcuenca del río Sila se encuentra en el norte del Estado de México y al noroeste de la Ciudad de México. Tiene una superficie aproximada de 638.22 kilómetros cuadrados (km²) y está ubicada entre los municipios de Ixtlahuaca, Jocotitlán, Atlacomulco, Morelos y Jiquipilco (Figura 1), considerados como pueblos indígenas del Estado de México, según el

Consejo Estatal para el Desarrollo Integral de los Pueblos Indígenas (CEDIPIEM, 2022). Las principales vías de acceso a estos municipios son la Autopista Federal 55D Atlacomulco-Toluca y la carretera Jilotepec-Ixtlahuaca.

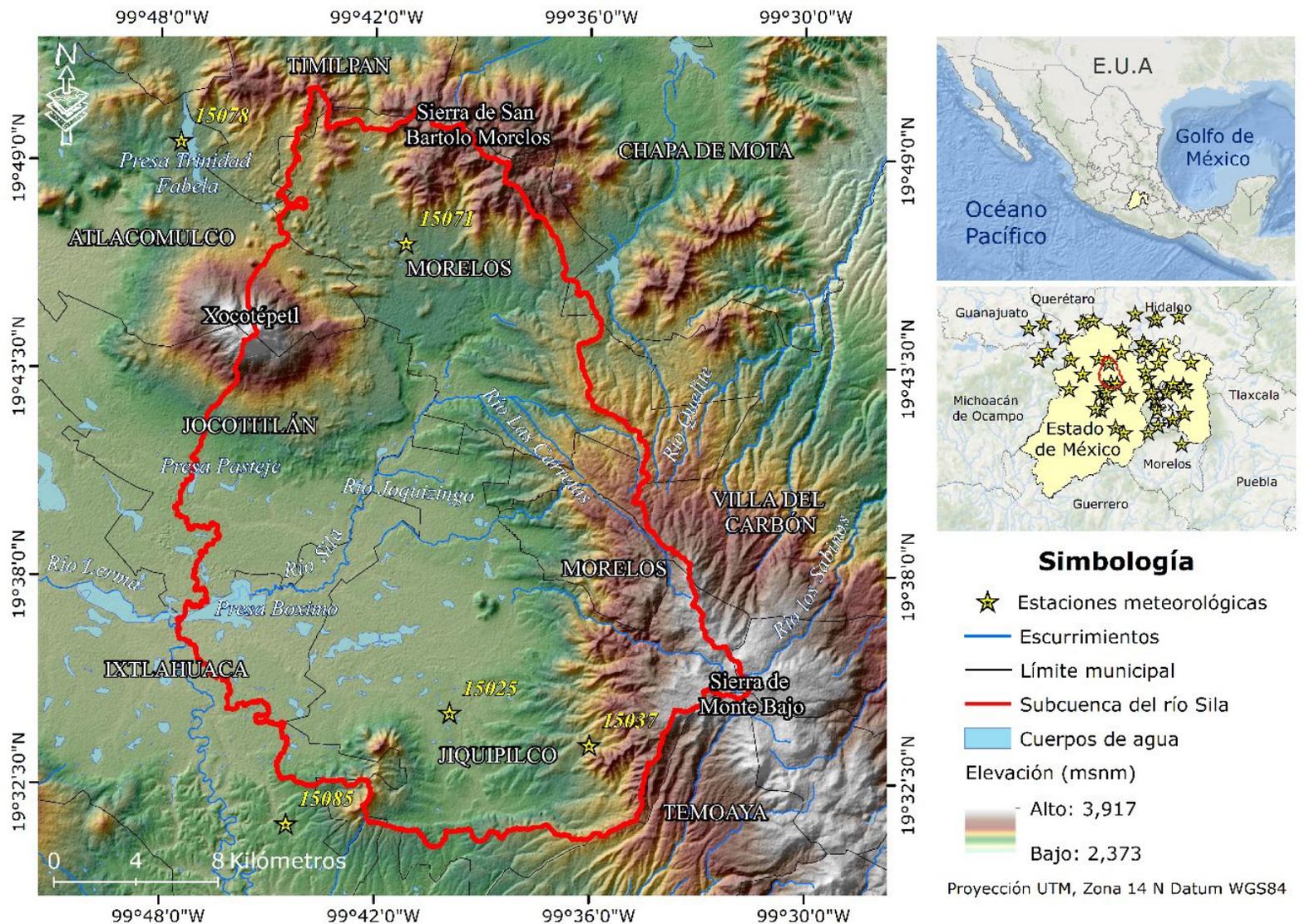


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: diseño propio basado en datos del marco geostadístico nacional del INEGI (2020).

En términos generales, el clima en la subcuenca del río Sila, según la clasificación Köppen-Geiger, es templado, con veranos cálidos, precipitaciones en verano e inviernos secos. En cuanto al uso predominante del suelo en esta área, destaca la agricultura de secano (INEGI, 2022), seguida de la agricultura de riego; en consecuencia, el uso principal del agua superficial se dirige hacia actividades agrícolas. La población en la subcuenca ha experimentado un aumento, pasando de 88 720 habitantes en 1990 a 158 708 habitantes en 2020 (INEGI, 2020). La población indígena se concentra en la parte centro-sur de la subcuenca, mientras que las viviendas sin acceso a agua potable se encuentran en las laderas de la subcuenca, cerca de la línea divisoria.

Los principales datos de entrada para esta investigación fueron los datos diarios de precipitación y temperatura (en milímetros y grados Celsius, respectivamente), que se obtuvieron del proyecto de Cómputo Climático (CLICOM, por sus siglas en inglés) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se consideraron las estaciones dentro y fuera de la subcuenca del río Sila, con datos para el periodo 1956-2015 (Tabla 1). La temperatura media se obtuvo promediando la temperatura mínima y la temperatura máxima, siguiendo la recomendación de la OMM (2018).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para datos de precipitación y temperatura.

| ID | Latitud | Longitud | Años |
|-------|---------|----------|-----------|
| 9020* | 19.297 | -99.182 | 1956-2015 |
| 9022* | 19.134 | -99.173 | 1961-2015 |

| ID | Latitud | Longitud | Años |
|--------|---------|----------|-----------|
| 9029 | 19.477 | -99.091 | 1956-2015 |
| 9032* | 19.191 | -99.022 | 1956-2015 |
| 9043 | 19.465 | -99.079 | 1956-2015 |
| 9048 | 19.404 | -99.196 | 1956-2015 |
| 11012 | 20.198 | -100.363 | 1962-2015 |
| 11031 | 20.143 | -100.519 | 1957-2015 |
| 13018 | 20.229 | -99.215 | 1956-2015 |
| 13025 | 20.239 | -99.184 | 1961-2012 |
| 13060 | 20.265 | -98.958 | 1956-2015 |
| 13064 | 20.289 | -99.411 | 1963-2015 |
| 13068 | 19.936 | -99.284 | 1956-2015 |
| 13075 | 19.99 | -99.332 | 1956-2015 |
| 13084 | 19.964 | -99.312 | 1956-2015 |
| 13089 | 19.898 | -99.337 | 1956-2013 |
| 15008 | 19.544 | -98.913 | 1961-2014 |
| 15010 | 19.462 | -99.776 | 1961-2015 |
| 15020* | 19.258 | -98.896 | 1961-2015 |
| 15024 | 19.886 | -99.555 | 1956-2015 |
| 15025 | 19.573 | -99.665 | 1963-2015 |
| 15028* | 19.909 | -99.126 | 1961-2015 |
| 15037 | 19.559 | -99.6 | 1962-2015 |
| 15038 | 19.051 | -99.532 | 1956-2015 |
| 15041 | 19.562 | -99.019 | 1961-2015 |

| ID | Latitud | Longitud | Años |
|--------|---------|----------|-----------|
| 15055* | 19.784 | -98.832 | 1964-2015 |
| 15057 | 19.443 | -99.464 | 1961-2015 |
| 15059 | 19.478 | -99.221 | 1961-2015 |
| 15063 | 19.411 | -99.699 | 1961-2015 |
| 15064 | 20.12 | -99.544 | 1961-2015 |
| 15066 | 19.508 | -100.098 | 1958-2015 |
| 15069* | 20.219 | -99.846 | 1961-2015 |
| 15071 | 19.78 | -99.686 | 1961-2015 |
| 15073 | 19.623 | -99.282 | 1961-2015 |
| 15074 | 19.695 | -99.302 | 1961-2015 |
| 15076 | 19.663 | -99.958 | 1961-2015 |
| 15078 | 19.825 | -99.791 | 1961-2015 |
| 15083 | 19.532 | -98.911 | 1961-2015 |
| 15085 | 19.524 | -99.741 | 1964-2015 |
| 15086 | 19.476 | -99.714 | 1961-2015 |
| 15089 | 19.292 | -99.768 | 1956-2015 |
| 15108 | 19.306 | -99.825 | 1962-2015 |
| 15115 | 19.775 | -99.167 | 1961-2015 |
| 15122 | 19.107 | -99.617 | 1959-2015 |
| 15127* | 19.466 | -99.246 | 1961-2015 |
| 15128 | 19.812 | -100.081 | 1961-2015 |
| 15170 | 19.485 | -98.886 | 1956-2015 |
| 15190 | 20.198 | -99.956 | 1956-2015 |

| ID | Latitud | Longitud | Años |
|-------|---------|----------|-----------|
| 16061 | 19.816 | -100.416 | 1956-2015 |
| 16111 | 19.908 | -100.319 | 1956-2015 |
| 16124 | 20.051 | -100.149 | 1956-2015 |
| 17001 | 18.937 | -98.928 | 1956-2014 |
| 17047 | 19.058 | -99.274 | 1961-2015 |

*La estación solo disponía de datos de precipitación.

Es importante mencionar que algunas de las estaciones tenían datos de años anteriores o posteriores, pero se hizo un esfuerzo para lograr una distribución homogénea en el territorio y en cuanto al periodo de tiempo. Esto redujo el número de estaciones a aquellas que mejor coincidieron con un periodo de tiempo específico, resultando en el periodo de 1956-2015. También vale la pena señalar que al momento de redactar el presente documento la base de datos nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) estaba actualizada hasta el año 2020 (<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>), pero en la práctica solo algunas estaciones en el área de estudio tenían datos completos hasta 2017.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, estas estaciones fueron excluidas. Para garantizar la representatividad de los datos de precipitación y temperatura, se tomaron los siguientes pasos en cada estación meteorológica. Primero, se eliminaron valores atípicos y datos faltantes. Después, se aplicó el criterio de suficiencia de datos de la OMM (2018) de la siguiente manera: para considerar un mes, debe tener al

menos el 80 % de los días con datos disponibles; para considerar un año, debe tener al menos el 80 % de los meses con datos para ese año, y para considerar los datos de la estación, debe tener al menos el 80 % de los años dentro del periodo de 1956-2015. Este criterio redujo aún más el número de estaciones disponibles, porque algunas tenían datos dentro del periodo seleccionado, pero los datos estaban incompletos, lo que llevó a su exclusión.

Posteriormente, los datos puntuales de las estaciones se interpolaron para generar imágenes mensuales de superficie continua, utilizando el *software* ANUSplin (Hutchinson & Xu, 2013), que interpola utilizando el método de interpolación de lámina delgada que ajusta los parámetros de suavizado a las coordenadas de longitud, latitud y elevación del espacio geográfico. La interpolación utiliza la Ecuación (1):

$$z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

Donde:

x_i = vector d -dimensional de *spline* de variables independientes

f = función suave desconocida de x_i

y_i = vector p -dimensional de covariables independientes

b^T = vector desconocido p -dimensional de coeficientes de y_i

e_i = término independiente de error medio cero

Para realizar la interpolación, dicho programa requiere datos de latitud, longitud y elevación para cada estación que se procesará. La

latitud y la longitud se obtuvieron de la base de datos de CLICOM, mientras que la elevación se obtuvo del Modelo Digital de Elevación (DEM), como lo recomiendan Hutchinson y Xu (2013). Se tomó como resolución base ~ 30 m, que corresponde al modelo numérico de altitud obtenido del Servicio Geológico de los Estado Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

El proceso de obtener las elevaciones se automatizó con el lenguaje de programación Object Pascal en Lazarus y procesos de análisis espacial en TerrSet. Adicionalmente, se automatizó la generación de los archivos anuales de entrada que requiere ANUSplin para procesar cada elemento climático (precipitación y temperatura). Cada archivo contiene, por cada estación y año, un identificador, longitud, latitud, elevación y datos de los 12 meses del año para la interpolación.

Los resultados consistieron en 720 capas ráster, una para cada elemento climático para el periodo de 1956-2015 (Figura 2), con la resolución de ~ 30 metros. Como resultado de la interpolación, también se obtuvieron métricas ponderadas anuales de error medio (ME), error absoluto medio (MAE) y error cuadrático medio (RMS). Estos valores promediados para el periodo de estudio se presentan en la Tabla 2. Las 2 880 capas ráster obtenidas conformaron la serie espacio-temporal utilizada en etapas posteriores, haciendo referencia a un conjunto de observaciones registradas en diferentes momentos y lugares, lo que proporciona un conjunto de datos que expresa la evolución espacial y temporal.

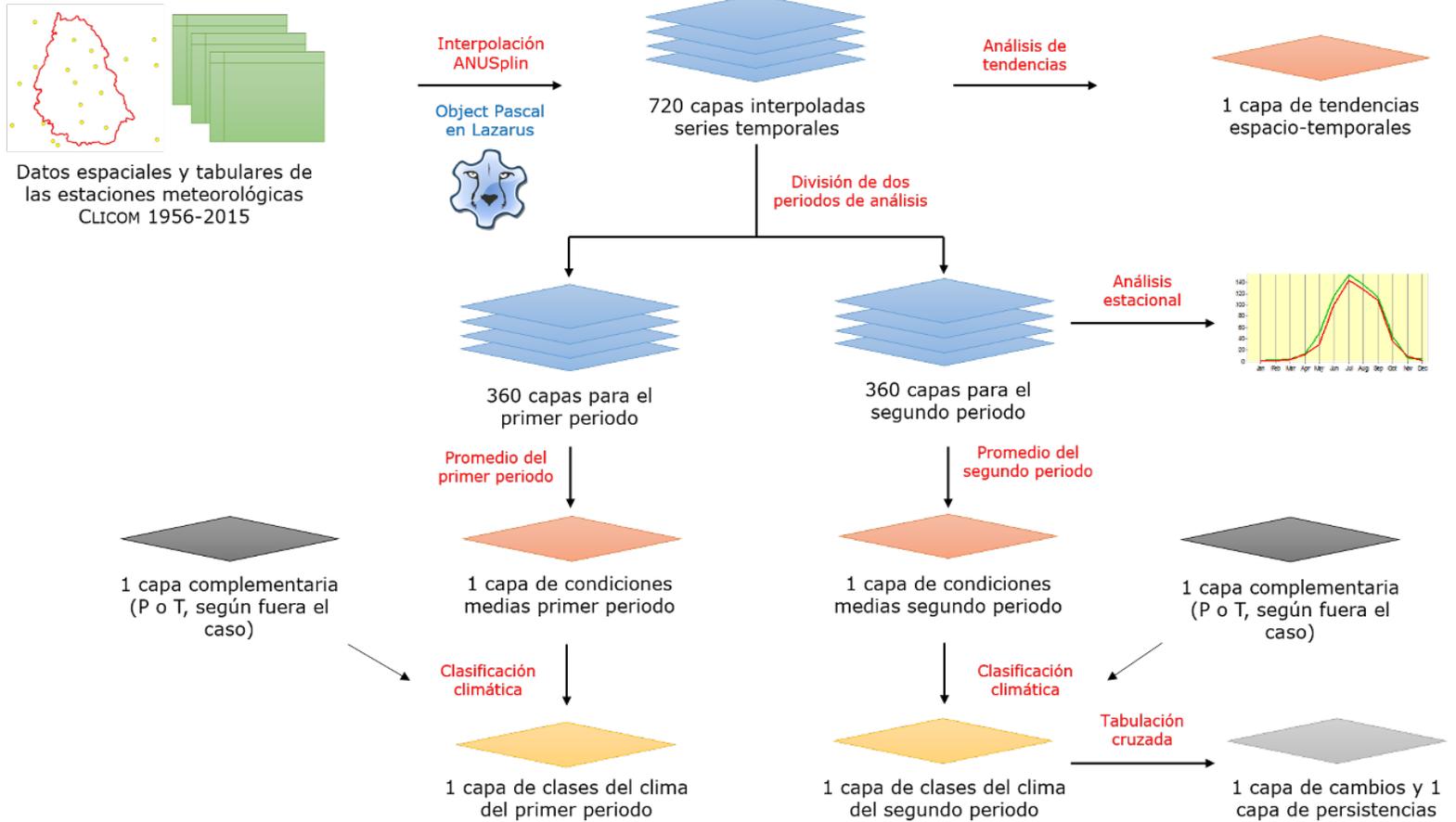


Figura 2. Procesamiento de datos de precipitación (P) y temperatura (T).

Tabla 2. Promedio de las métricas anuales durante el periodo de estudio para evaluar el error en las interpolaciones.

| Elemento | Criterio | ME | MAE | RMS |
|-------------------------|----------|--------|--------|--------|
| Precipitación (mm) | Máximo | -0.422 | 33.300 | 94.900 |
| | Mínimo | -4.970 | 13.800 | 24.400 |
| | Promedio | -2.157 | 21.048 | 40.570 |
| Temperatura máxima (°C) | Máximo | 0.372 | 2.240 | 3.440 |
| | Mínimo | -0.525 | 1.030 | 1.310 |
| | Promedio | 0.013 | 1.548 | 2.209 |
| Temperatura media (°C) | Máximo | 0.117 | 1.540 | 2.320 |
| | Mínimo | -0.309 | 0.831 | 1.120 |
| | Promedio | 0.005 | 1.149 | 1.571 |
| Temperatura mínima (°C) | Máximo | 0.121 | 2.170 | 3.420 |
| | Mínimo | -0.112 | 1.120 | 1.570 |
| | Promedio | 0.009 | 1.448 | 1.995 |

Primero se realizó el análisis de la tendencia espacio-temporal aplicando el método de Mann-Kendall (Ronald, 2016) a las series ajustadas estacionalmente en el *software* TerrSet. Mann-Kendall permite identificar la presencia de tendencias de cambio y el grado en que ocurren, lo que se utilizó para mostrar las tendencias espacio-temporales de aumentos o disminuciones en la precipitación y la temperatura: máxima, media y mínima (Ecuación (2)):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (2)$$

Donde:

x_j = valores de datos ordenados

n = longitud de las observaciones

S = estadística de Mann-Kendall

El *sign* o señal de cambio de la prueba estadística es (Ecuación (3)):

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Para $n \Rightarrow 10$, entonces la estadística S tiene una distribución aproximadamente normal, con media cero $E(S) = 0$ y varianza como en la Ecuación (4):

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^{nk} t_k(k)(k-1)(2k+5)}{18} \quad (4)$$

t_k = número de vínculos o duplicados en la medida k

La Ecuación (3) se utiliza en caso de valores empatados en la serie temporal

nk = número total de vínculos en el conjunto de datos

En caso de tener $n \Rightarrow 10$, la estadística de prueba estandarizada para Mann-Kendall se puede calcular utilizando la Ecuación (5):

$$Z_s \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{v(s)}} & (if S > 0) \\ 0 & (if S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{v(s)}} & (if S < 0) \end{cases} \quad (5)$$

La función de densidad de probabilidad para una distribución normal con una media de 0 y una desviación estándar de 1 se expresa mediante la Ecuación (6) (U.S. Army Corps of Engineers, 2005):

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad (6)$$

Para esta investigación se utilizó un nivel de significancia del 95 %. Para la categorización final se adoptó el criterio del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, 2005), que indica que una tendencia es decreciente si Z es negativo y la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significancia; mientras que la tendencia es creciente cuando Z es positivo y la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significancia; finalmente, se considera que no hay tendencia cuando la probabilidad calculada es menor que el nivel de significancia.

Posteriormente, se utilizó Earth Trend Modeler (ETM) de TerrSet (Ronald, 2016) para realizar el análisis estacional, y exponer posibles retrasos y variaciones estacionales en las cantidades mensuales de los elementos climáticos. En este caso, cada serie mensual de 60 años se

dividió en dos series de 30 años cada una para comparar el comportamiento mensual interanual de ambas series, con el propósito de identificar el inicio y el final temprano de las temporadas de lluvias y calurosas, así como su inicio y/o finalización tardía. Asimismo, se identificaron y cuantificaron aumentos o disminuciones en los valores mensuales de un periodo en comparación con el otro utilizando el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Diaz, Bâ, Quentin, Ortiz, & Gama, 2015), como se muestra en la Ecuación (7). El valor de este coeficiente es 1 cuando los valores de las dos series son idénticos, y a medida que aumenta la diferencia entre estas series, dicho coeficiente disminuye e incluso puede volverse negativo:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P1_i - P2_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P2_i - \overline{P2})^2} \quad (7)$$

Donde:

$P1_i$ = valor del mes i en el primer periodo

$P2_i$ = valor del mes i en el segundo periodo

$\overline{P2}$ = promedio de los valores mensuales en el segundo periodo

Para el análisis de Köppen-Geiger, se promediaron los valores mensuales de precipitación y temperatura de las capas ráster para cada mes, considerando dos periodos, uno de 1956 a 1985 y otro de 1986 a 2015, para representar la condición promedio de 30 años en cada uno. Para cada uno de estos periodos se realizó la clasificación climática de Köppen-Geiger. Esta clasificación se llevó a cabo en TerrSet, utilizando el

módulo desarrollado por Colín (2021). Posteriormente, se utilizó el módulo de TerrSet (LCM) para modelar los cambios en categorías climáticas, específicamente a través de la herramienta de tabulación cruzada, para identificar áreas de la subcuenca con transiciones y persistencia en las categorías climáticas entre los periodos analizados. Con estos resultados fue posible caracterizar las transiciones más significativas.

Resultados

Análisis de tendencias espacio-temporales

Para interpretar los resultados del análisis de Mann-Kendall para la precipitación y la temperatura de la serie ajustada estacionalmente, es importante tener en cuenta los umbrales e implicaciones que se muestran en la Tabla 3 y en la Tabla 4.

Tabla 3. Valores e implicaciones del análisis de tendencia de Mann-Kendall (S).

| Valores | Implicaciones |
|-----------------|---|
| $-1 \leq S < 0$ | Tendencia hacia la disminución de valores |
| $S = 0$ | Ausencia de tendencia |
| $0 < S \leq 1$ | Tendencia hacia el aumento de valores |

Tabla 4. Criterio utilizado en TerrSet para categorizar las tendencias de Mann-Kendall.

| Estadístico de prueba normalizado Z | Operador lógico para superponer en TerrSet | Probabilidad (p) versus nivel de significancia (0.95) | Tendencia |
|---------------------------------------|--|---|---------------|
| $Z < 0$ | AND | $p \geq 0.95$ | Decreciente |
| $Z > 0$ | AND | $p \geq 0.95$ | Creciente |
| $Z = 0$ | OR | $p < 0.95$ | Sin tendencia |

Fuente: elaboración propia con base en HydroGeoLogic-U.S. Army Corps of Engineers (2005).

Vale la pena mencionar que el análisis de tendencias espacio-temporales se llevó a cabo tanto para el área de estudio como para la periferia, pero la interpretación de los valores de todos los resultados se refiere únicamente al área dentro de la subcuenca.

En el caso específico de la precipitación, los valores de tendencia oscilan entre -0.014 y -0.089 (Figura 3). Aunque estos números son negativos, permanecen cercanos a cero, lo que no implica una tendencia significativa a la baja, indicando que los valores de precipitación han permanecido estables durante los últimos 60 años de registros mensuales. Respecto a la temperatura máxima, los valores de tendencia oscilan entre 0.060 y -0.480 (Figura 4). El primero es un valor muy cercano a 0, indicando que no existe una tendencia al aumento o disminución de la temperatura máxima, mientras que el segundo valor

muestra una disminución moderadamente significativa desde el centro hacia el noreste de la subcuenca.

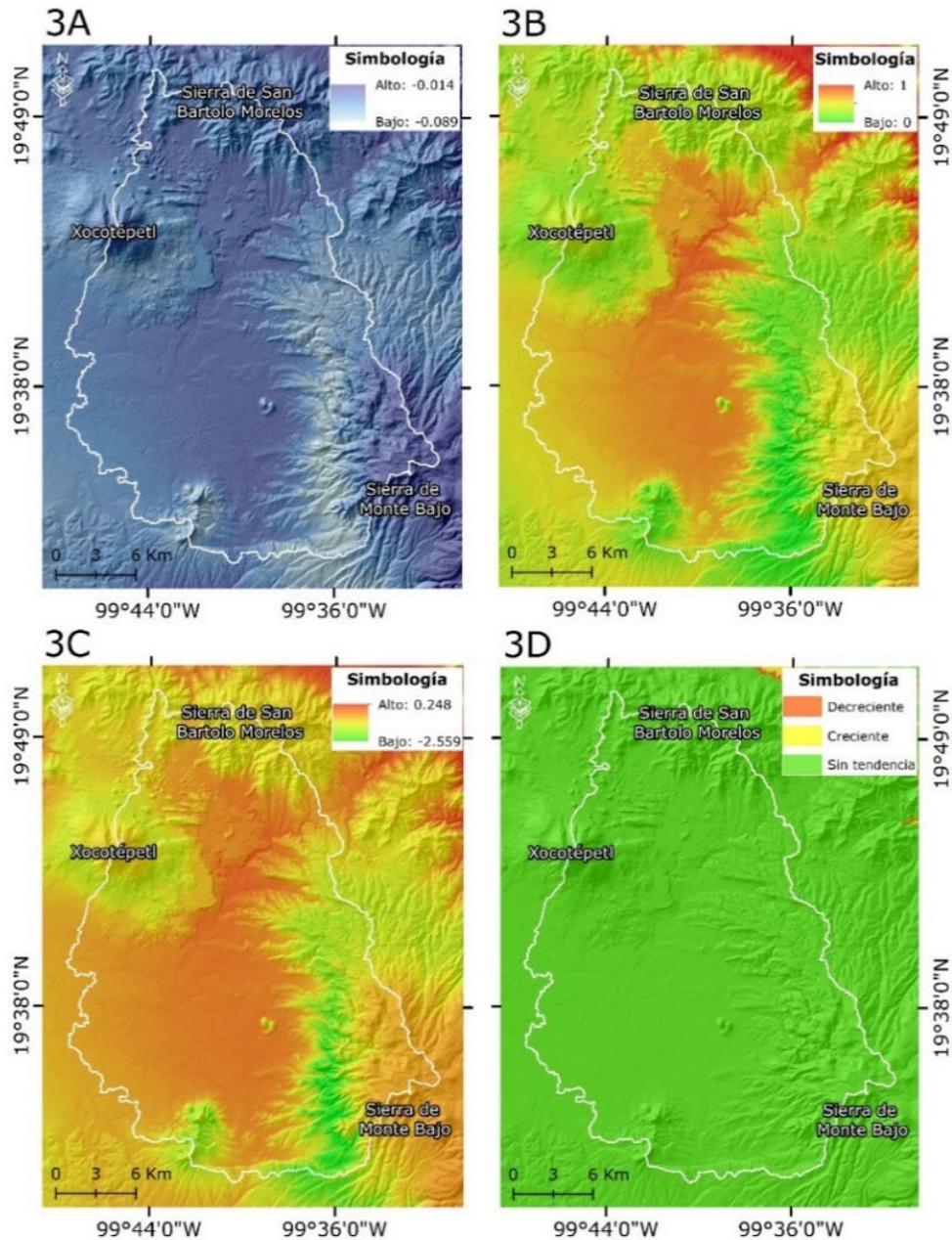


Figura 3. Análisis de tendencias espacio-temporales para la precipitación mensual (1956-2015): 3a, Mann-Kendall (S); 3b, probabilidad; 3c, estadística de prueba normalizada (Z); 3d, tendencia (al 95 % de nivel de significancia).

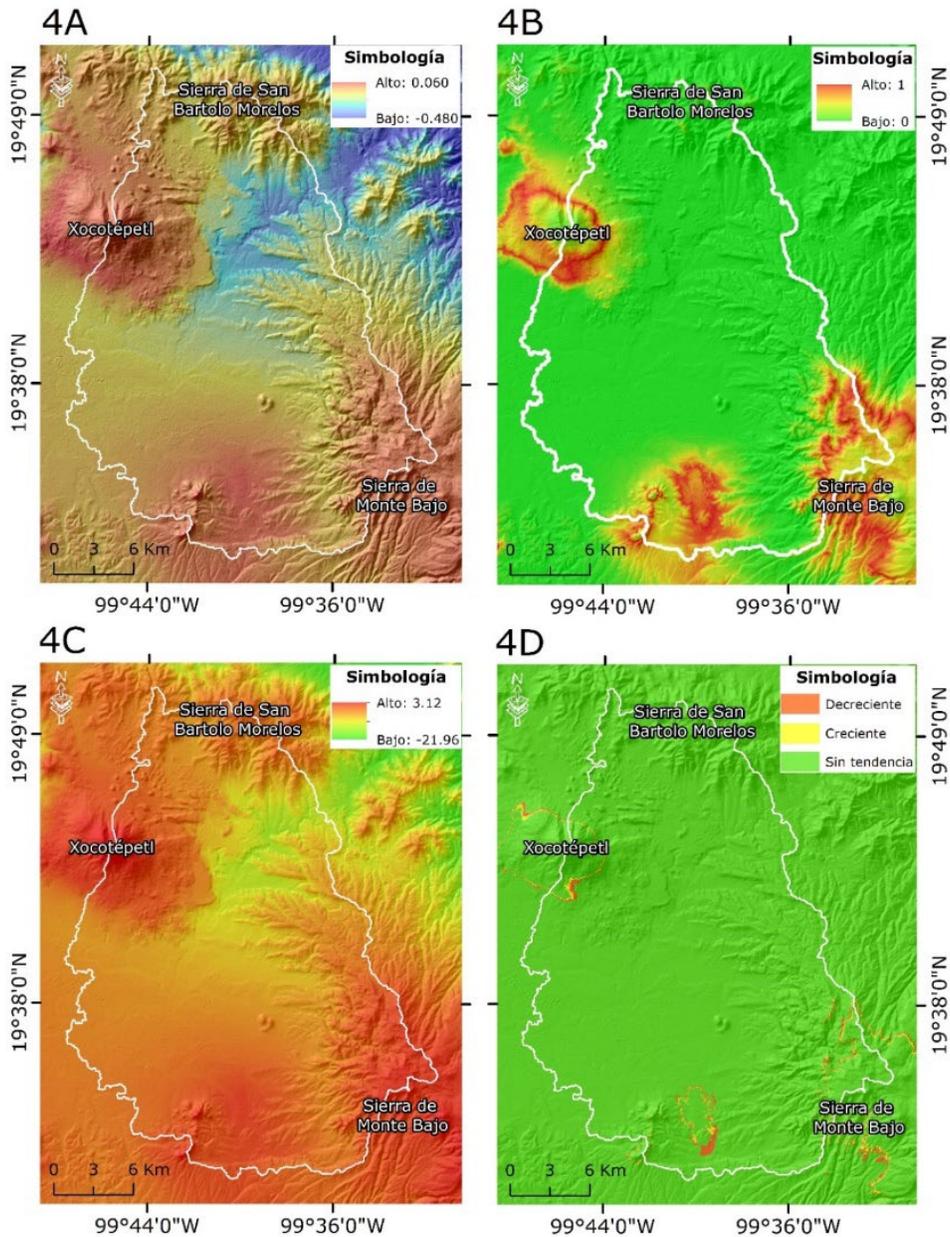


Figura 4. Análisis de tendencias espacio-temporales para la temperatura máxima mensual (1956-2015): 4a, Mann-Kendall (S); 4b, probabilidad; 4c, estadística de prueba normalizada (Z); 4d, tendencia (al 95 % de nivel de significancia).

En cuanto a la temperatura media, los valores de tendencia oscilan entre -0.033 y -0.436 (Figura 5). Aunque el primero es un valor negativo que se mantiene cercano de cero, el segundo valor muestra una tendencia descendente moderadamente significativa desde el centro hacia el noreste de la subcuenca (como ocurre con los valores de tendencia de la temperatura máxima). Finalmente, en el caso de la temperatura mínima, los valores de tendencia oscilan entre 0.019 y -0.092 (Figura 6). Aunque uno es positivo y el otro negativo, ambos valores están muy cerca de cero, lo que indica que no hay una tendencia significativa al aumento o disminución de la temperatura mínima en la subcuenca.

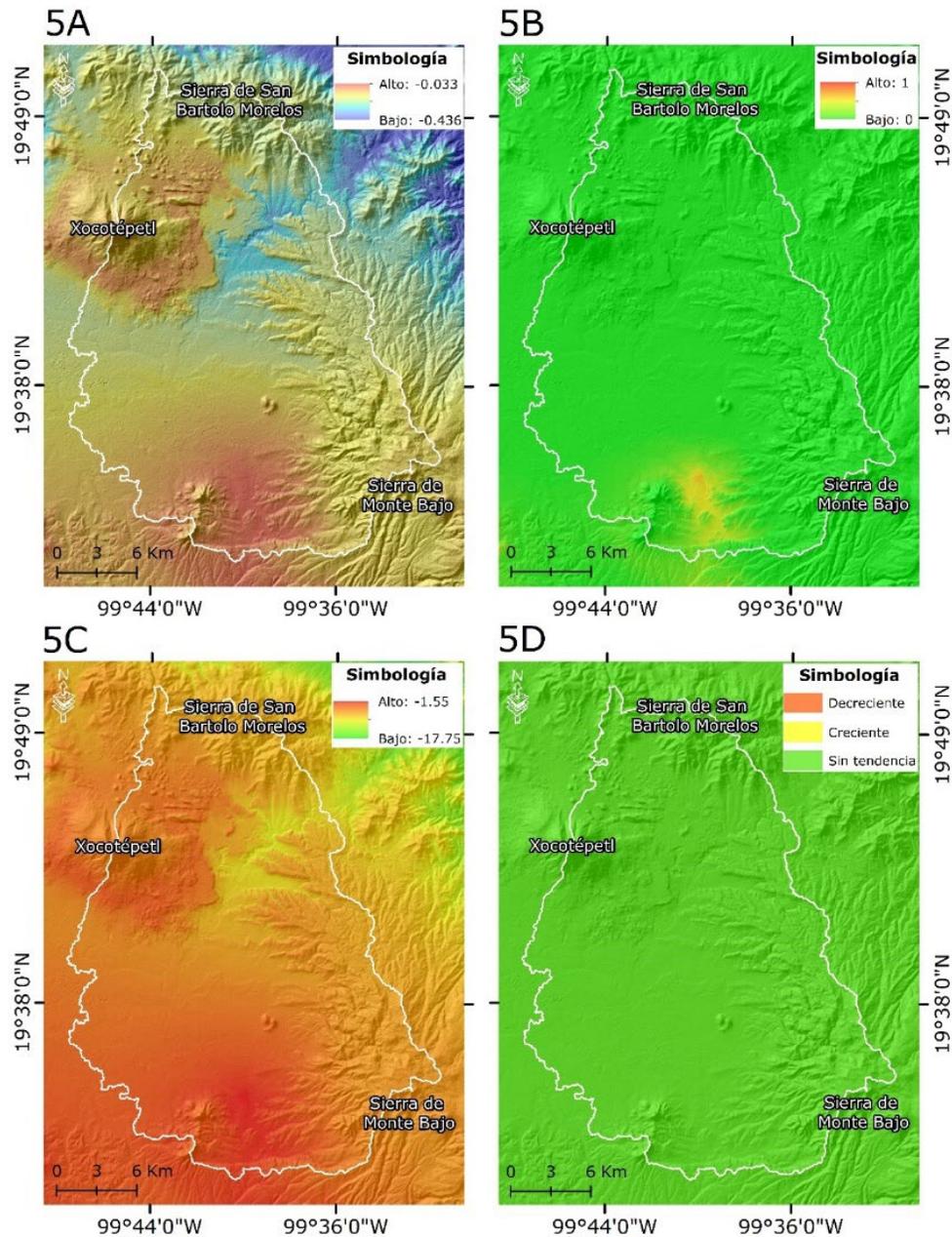


Figura 5. Análisis de tendencias espacio-temporales para la temperatura media mensual (1956-2015): 5a, Mann-Kendall (S); 5b, probabilidad; 5c, estadística de prueba normalizada (Z); 5d, tendencia (al 95 % de nivel de significancia).

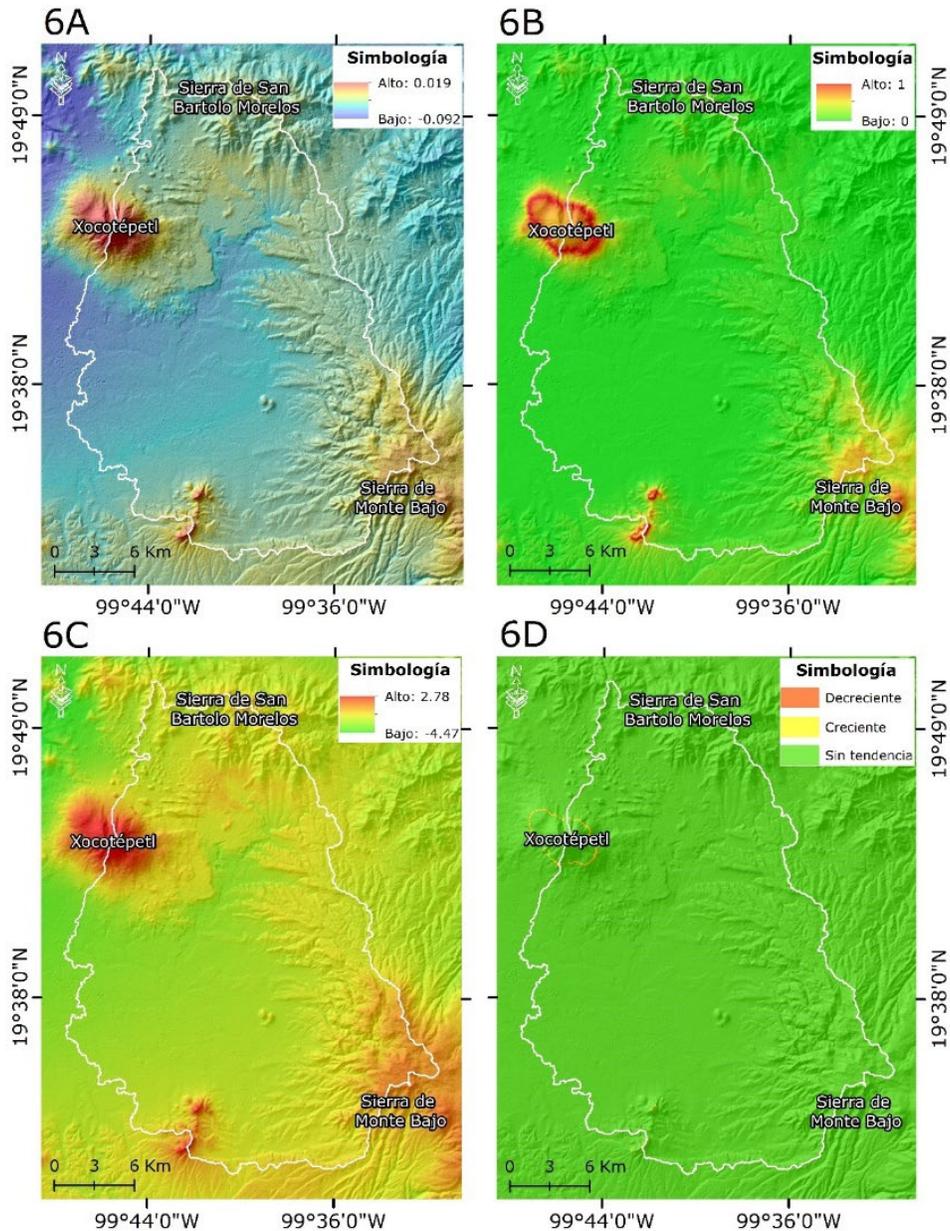


Figura 6. Análisis de tendencia espacio-temporal para la temperatura mínima mensual (1956-2015): 6a, Mann-Kendall (S); 6b, probabilidad; 6c, estadística de prueba normalizada (Z); 6d, tendencia (al 95 % de nivel de significancia).

Por lo tanto, aunque se presentaron valores de S por debajo y por encima de cero en las temperaturas máxima, media y mínima, estos valores no representan una tendencia de aumento o disminución en la temperatura en la subcuenca del río Sila, ya que permanecen más cerca de 0 que de -1 o 1, lo que indica que no son muy significativos o moderadamente significativos en algunas áreas.

Categorizando estos valores según la Tabla 4, resulta que la precipitación, temperatura mínima y temperatura media no presentan tendencia alguna dentro de la subcuenca (Figura 3d, Figura 5d y Figura 6d), y sólo la temperatura máxima presenta pequeñas porciones con tendencias crecientes o decrecientes, pero predomina la ausencia de tendencia al cambio (Figura 4d).

Considerando los elementos climáticos analizados (precipitación y temperaturas máxima, media y mínima) a nivel mensual, dentro del periodo de 1956 a 2015, se puede establecer que la subcuenca muestra una condición de estabilidad climática. Esta afirmación se fortalece con el análisis de la estacionalidad, y con el análisis de transición y persistencias entre las categorías climáticas.

Análisis estacional de amplitud y frecuencia

El propósito principal de este estudio fue conocer el comportamiento estacional de los elementos climáticos analizados (precipitación, temperatura máxima, media y mínima) y su diferenciación en términos del inicio y final tanto de la temporada de lluvias como de la temporada

cálida, así como la diferencia en los valores mensuales de precipitación y temperatura que existen dentro del primer periodo (1956-1985) y el segundo periodo (1986-2015) de análisis. Los resultados se muestran en la Figura 7. El primer periodo está representado por una línea verde y el segundo periodo por una línea roja. Para evaluar el comportamiento general entre un periodo y otro, la Figura 7 muestra el coeficiente de Nash. En todos los casos, este coeficiente indica que las dos series son muy similares según los criterios de Da Silva, Araujo y Fábio (2022), ya que los coeficientes estuvieron por encima de 0.9.

— 1956-1985
— 1986-2015

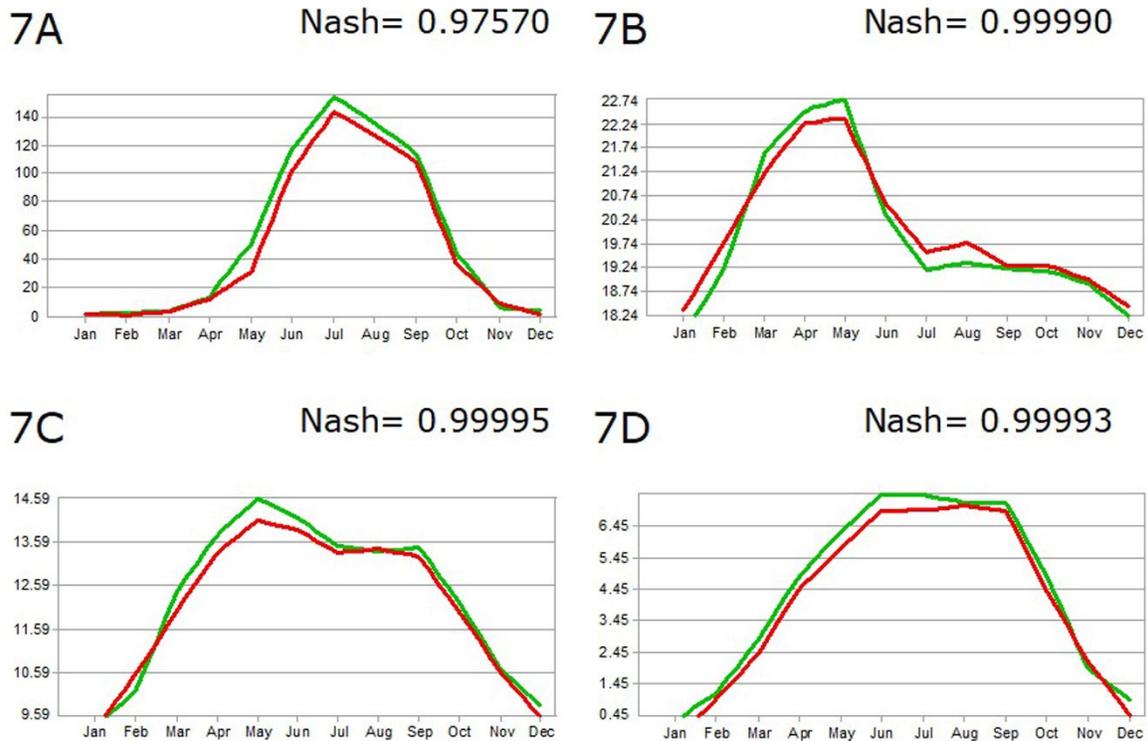


Figura 7. Análisis estacional de amplitud y frecuencia (1956-2015): 7a, precipitación total mensual; 7b, promedio de la temperatura máxima mensual; 7c, promedio de la temperatura media mensual; 7d, promedio de la temperatura mínima mensual.

En cuanto al comportamiento de la precipitación total mensual, la Figura 7a muestra que la temporada de lluvias se mantiene entre los meses de mayo a octubre, es decir, en ambos casos se trata de un régimen de lluvias de verano. En lo que respecta a la cantidad de

precipitación total en cada mes, el gráfico muestra valores más altos en el primer periodo 1956-1985 en comparación con el segundo periodo 1986-2015. La diferencia principal se observa en el mes de mayo, pues para el primer periodo, la precipitación total mensual fue de 55 mm y para el segundo, 35 mm, mostrando una reducción de 20 mm entre un periodo y otro. Julio fue el mes más lluvioso en ambos casos, con valores de 153 y 144 mm para el primer y segundo periodo, respectivamente. A pesar de estas diferencias, el análisis de la categorización climática presentada en la siguiente sección indica que estos cambios en los valores mensuales de precipitación no han modificado el tipo de clima presente en la subcuenca.

En cuanto al promedio de la temperatura máxima para cada mes (Figura 7b), destacan dos aspectos: el primero es que existe una temporada más cálida (marzo a junio) y una menos cálida (julio a febrero). El segundo aspecto es que, en la temporada más cálida, el primer periodo de análisis (1956-1985) fue más alto que el segundo (1986-2015), mientras que en la temporada menos cálida ocurre lo contrario. En la temporada más cálida, el valor más alto se presenta en el mes de mayo en ambos periodos, siendo de 22.7 °C en el primer periodo y 22.3 °C en el segundo periodo. En cuanto a la temporada menos cálida, el valor más alto se encuentra en el mes de agosto, siendo de 19.4 °C en el primer periodo y 19.8 °C en el segundo periodo, mostrando una diferencia de 0.4 °C en ambos casos.

En cuanto al promedio de la temperatura media para cada mes (Figura 7c), en la mayoría de los meses, los valores del primer periodo (1956-1985) se mantuvieron por encima de los valores del segundo

periodo (1985-2015), siendo mayo el mes con las temperaturas más altas, 14.6 °C para el primer periodo y 14.1 °C para el segundo periodo. También fue el mes en el que se produjo la mayor diferenciación (0.5 °C) entre un periodo y otro.

El último resultado de esta sección es el promedio de la temperatura mínima en cada mes. Desde el punto de vista temporal, la temporada cálida comienza más tarde y termina antes en el segundo periodo (Figura 7d), pero en ambos casos existe una diferencia máxima de seis días. Comparando un periodo con otro, la mayoría de los valores fueron más altos en el primer periodo. Específicamente, las diferencias más significativas se muestran desde marzo hasta julio. La mayor diferenciación de valores se muestra en junio y julio, siendo en ambos casos de 7.4 °C y disminuyendo 0.5 °C en el segundo periodo.

Considerando los periodos 1956-1985 y 1986-2015, se puede observar que para los promedios mensuales de temperatura máxima, se nota una diferencia de 0.4 °C entre las estaciones más cálidas y menos cálidas. Mientras tanto, para los promedios mensuales de temperatura media y mínima, la diferencia fue de 0.5 °C. A pesar de estas diferencias expresadas en temperatura entre un periodo y otro, el tipo de clima no ha cambiado en la subcuenca, según el análisis de categorización climática presentado en la siguiente sección. Para el segundo periodo de análisis (1986-2015), los valores de precipitación mensual total se redujeron en la mayoría del periodo anual. Lo mismo sucede con el promedio de las temperaturas medias y mínimas mensuales. En cuanto al promedio de la temperatura máxima, el segundo periodo de análisis mostró un aumento desde julio hasta febrero (temporada menos cálida)

y una reducción de los valores desde marzo hasta junio (temporada más cálida). Sin embargo, tales indicaciones de reducción e incremento de valores en los elementos climáticos analizados no son evidentes, porque no implican cambios en cuanto al tipo de clima presente en la subcuenca, como se explica en la siguiente sección.

Análisis de transición de categorías climáticas

La clasificación climática de Köppen-Geiger se hizo para representar las condiciones promedio de periodos de 30 años, el primero abarcando desde 1956 hasta 1985, y el segundo desde 1986 hasta 2015 (Figura 8 y Tabla 5). Los resultados de la clasificación climática para el primer periodo (1956 a 1985) muestran que, en términos generales, existen dos tipos de climas: clima templado (C) y clima de tundra (E). El primero varía desde un clima templado cálido, con inviernos secos y veranos calurosos (*Cwb*), que es el predominante, seguido del clima templado cálido con inviernos secos, veranos frescos e inviernos fríos (*Cwc*), que se manifiesta en las laderas de Xocotépetl y en la sierra de monte bajo. Para el primer periodo, el clima de tundra de alta montaña (ET) solo está presente en la cima de Xocotépetl.

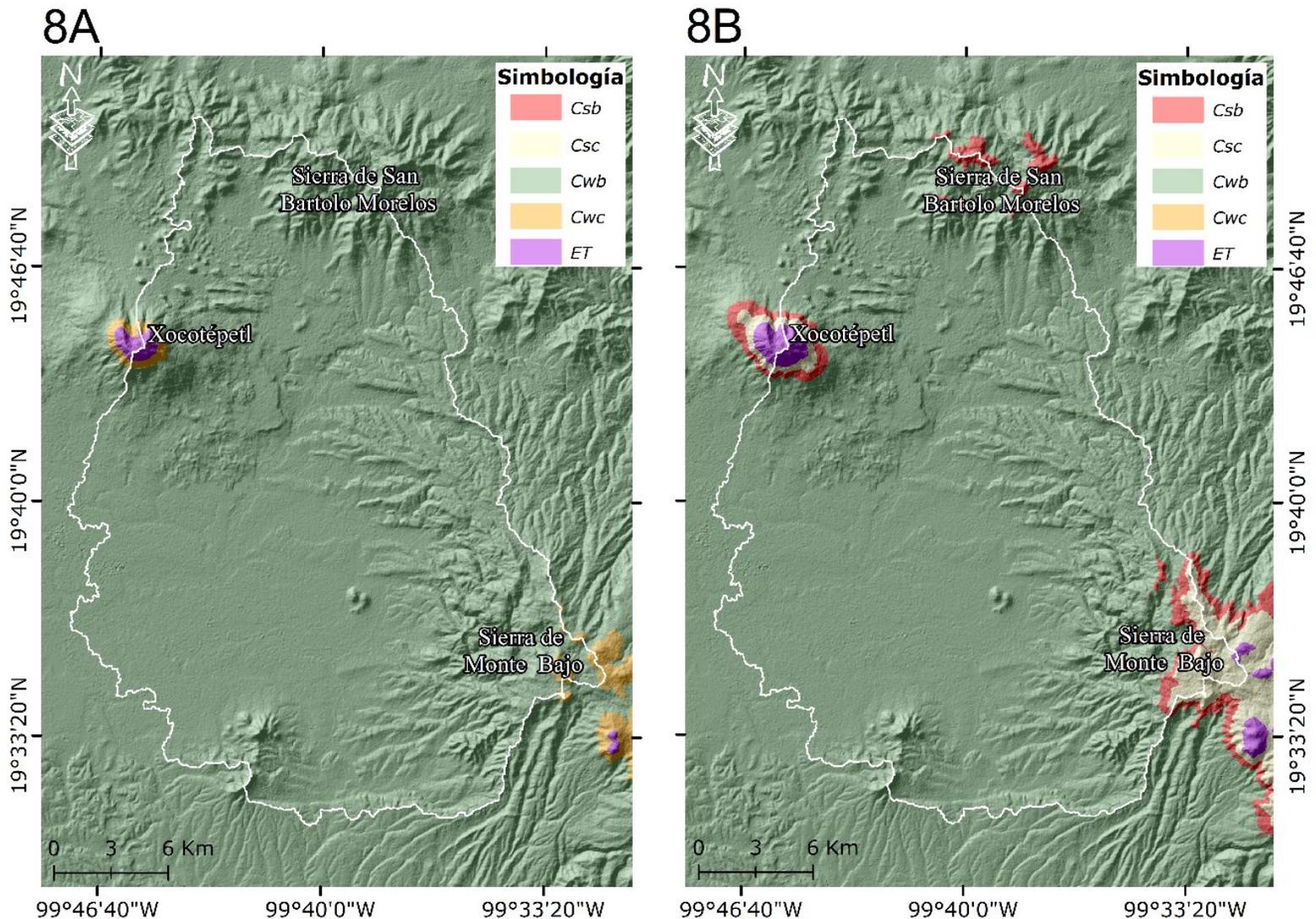


Figura 8. Clasificación climática de Köppen-Geiger: 8a, primer periodo de análisis de 1956 a 1985; 8b, segundo periodo de análisis de 1986 a 2015.

Tabla 5. Climas presentes en la subcuenca del río Sila en los últimos 60 años (1956 a 2015), según la clasificación de Köppen-Geiger.

| Símbolo climático | Descripción del clima |
|-------------------|--|
| <i>Csb</i> | Clima templado cálido con verano seco, verano cálido |
| <i>Csc</i> | Clima templado cálido con verano seco, verano fresco e invierno frío |
| <i>Cwb</i> | Clima templado cálido con invierno seco, verano cálido |
| <i>Cwc</i> | Clima templado cálido con invierno seco, verano fresco e invierno frío |
| <i>E</i> | Clima de tundra |
| <i>ET</i> | Clima de tundra de alta montaña |

La clasificación climática del segundo periodo (1986-2015) muestra resultados similares a la primera. Los dos climas presentes son C y E. El clima predominante en el área de estudio siguió siendo *Cwb*; pero de acuerdo con la altitud de la zona, se presentaron otras variedades del clima C, específicamente climas templados cálidos con veranos secos y veranos calurosos (*Csb*) en el pie de monte inferior de la sierra de San Bartolo Morelos, sierra de monte bajo y Xocotépetl, y el clima templado cálido con veranos secos, veranos frescos e inviernos fríos (*Csc*) en el pie de monte superior de las mismas montañas. Sin embargo, el clima *Cwc* desapareció en el segundo periodo, mientras que el clima *ET* persistió y se expandió un poco más en las tierras altas.

Desde el punto de vista cuantitativo, y según la clasificación climática de Köppen-Geiger, el 96.5 % del área total de la subcuenca no experimentó ningún tipo de cambio climático entre el primer periodo (1956-1985) y el segundo periodo (1986-2015), como se ilustra en la

Figura 9a, por lo que la mayor parte de la subcuenca permanece en un clima templado cálido, con inviernos secos y veranos calurosos (*Cwb*). En las áreas donde hubo un cambio, es decir, el restante 3.5 %, se refiere principalmente a una transición entre variedades del clima C (Figura 9b). Lo que en el primer periodo era *Cwb* cambió a *Csb* en un 1.5 % y también cambió a *Csc* en un 1.5 %, lo que representa un cambio total del 3 %. El otro 0.5 % se divide entre un cambio del 0.3 % de *Cwc* a *Csc* en la sierra de monte bajo y un aumento del 0.2 % en ET en Xocotépetl.

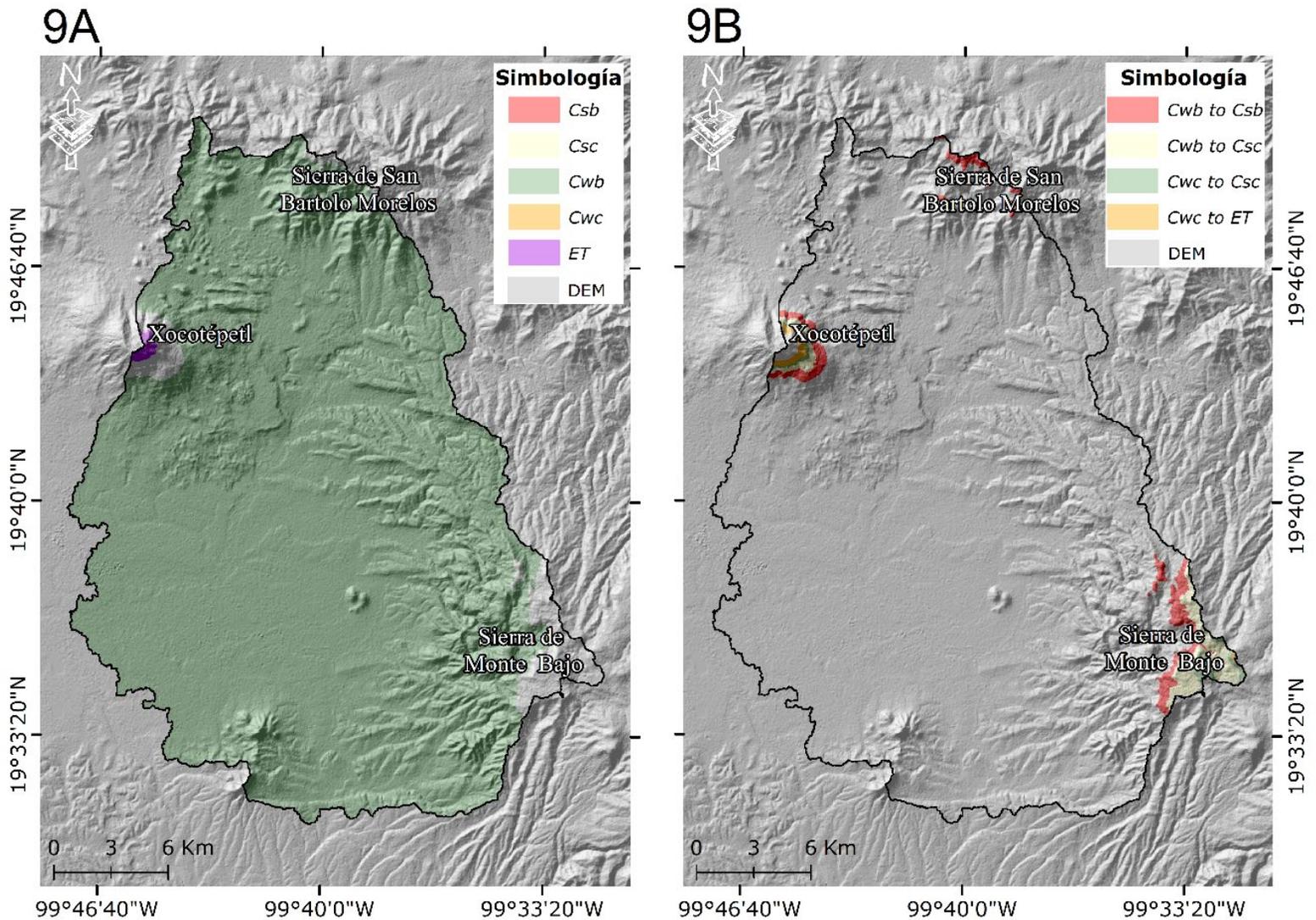


Figura 9. Persistencias y transiciones en la clasificación climática de Köppen-Geiger entre los periodos 1956-1985 y 1986-2015: 9a, persistencias y 9b, transiciones.

Estos cambios en las variedades del clima C se refieren principalmente al régimen de lluvias (segunda letra), que cambió de un

régimen de lluvias con invierno seco (w) a uno con verano seco (s), del primer al segundo periodo, respectivamente. En cuanto al comportamiento de las temperaturas en verano (tercera letra), solo se observan cambios en las laderas de la sierra de monte bajo y en Xocotépetl, pasando de un verano fresco (c) a uno caluroso (b). Sin embargo, dado que estos cambios permanecen dentro del clima C y solo ocurren en un 3.5 % de la subcuenca, ya que el resto del área (96.5 %) permanece dentro de la misma clasificación (Cwc), no se refieren a un cambio significativo en el clima.

Por lo tanto, considerando los resultados de la clasificación climática de Köppen-Geiger, los climas templados cálidos predominan en la zona tanto en el primer como en el segundo periodo. En ambos casos, existe la presencia de un clima de tundra, sin mostrar un cambio significativo en los últimos 60 años.

El comportamiento de los valores absolutos se puede observar en la Figura 10, entre el primer periodo (1956-1985) y el segundo periodo (1986-2015), el clima de tundra aumentó en 1.3 km², el Csb aumentó en 9.5 km² y el Csc aumentó en 11.7 km²; por otro lado, para el segundo periodo, el Cwc disminuyó en 3.6 km² y el Cwb disminuyó en 18.9 km².

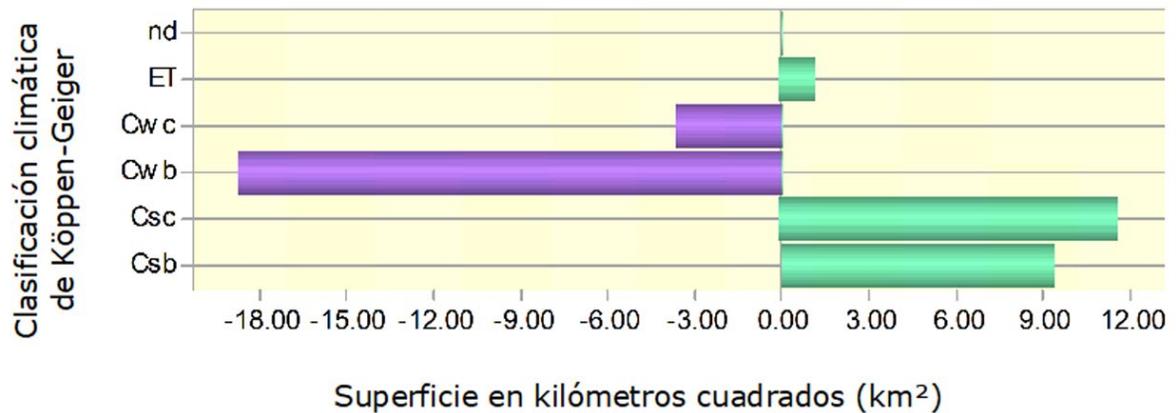


Figura 10. Pérdidas y ganancias en la subcuenca entre el primer (1956-1985) y el segundo (1956-1985) periodo de análisis de las categorías de Köppen-Geiger.

Discusión

Con base en los resultados del análisis de tendencias espaciotemporales de Mann-Kendall fue posible establecer que aunque existen variaciones en precipitación, así como en temperatura máxima, media y mínima, estas variaciones no indican una tendencia significativa (Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6). Los dos elementos climáticos (precipitación y temperatura) han permanecido constantes en la subcuenca del río Sila en los meses del periodo de 1956-2015 (60 años). Esta afirmación se fortalece con el análisis estacional de amplitud y frecuencia (Figura 7) y el análisis de transición/persistencias entre las categorías climáticas (Figura 8, Figura 9 y Figura 10).

El análisis estacional de amplitud y frecuencia de la precipitación y la temperatura (máxima, media y mínima) para los dos periodos de 30

años (1956-1985 y 1986-2015) muestra que tanto la temporada de lluvias (de mayo a octubre) como la temporada cálida (de marzo a junio) no han experimentado cambios y siguen siendo en los mismos meses en ambos periodos. En cuanto a los valores de precipitación y las temperaturas máximas, medias y mínimas, la mayoría de ellos fueron más altos en el primer periodo (1956-1985), en comparación con el segundo periodo (1986-2015); sin embargo, a pesar de estas diferencias, el tipo de clima actual en la subcuenca no ha sido modificado según el análisis de categorización climática.

Los resultados de la clasificación climática de Köppen-Geiger del primer periodo y del segundo periodo (1956-1985 y 1986-2015) muestran que, en términos generales, existen dos tipos de climas (directamente relacionados con el relieve de la subcuenca): el clima templado (C) y el clima de tundra (E), sin mostrar un cambio significativo en estos 60 años. El primero se distribuye en la mayor parte de la subcuenca tanto en los valles como en las laderas, mientras que el segundo solo ocurre en las cimas de las montañas de la zona. Específicamente, el clima actual en el 96.5 % del área total de la subcuenca es templado con invierno seco y verano cálido (*Cwb*); y en el área donde ocurren cambios en las variables climáticas, el cambio se refiere principalmente al patrón de lluvias (segunda letra), que varió de un régimen de lluvias con invierno seco a uno con verano seco, del primer al segundo periodo, respectivamente. Esto concuerda con lo obtenido por Colín (2021) y reportado por Karger *et al.* (2017), donde muestran (a una resolución de 1 km) que, en general, en toda el área de la subcuenca, en el periodo 1981-2010, el clima es *Cwb*.

Sin embargo, otros estudios realizados para el Estado de México y la zona central del país afirman que la precipitación ha disminuido y podría continuar bajando en los próximos años debido a los efectos del cambio climático. Tal es el caso de López *et al.* (2021), quienes mencionan que la precipitación anual promedio ha disminuido en todo el Estado de México, al igual que Núñez-González (2020), quien hizo un análisis de tendencias para toda la república mexicana, mostrando una reducción en las precipitaciones registradas de 1960 a 2010 en el noreste y centro de México. Sin embargo, estos resultados se han obtenido de manera general tanto a nivel estatal como nacional con datos anuales y no indican si esta tendencia ha tenido implicaciones en las categorías climáticas.

Por otro lado, Astudillo-Sánchez, Villanueva-Díaz, Endara-Agramont, Nava-Bernal y Gómez-Albores (2017) informan de una reducción en la precipitación de verano y un aumento en la precipitación y temperatura invernal en algunos años de 1985 a 2012, dominados por condiciones cálidas de El Niño. Estos resultados se obtuvieron mediante el análisis del ancho de los anillos de *Pinus hartwegii* que se encuentra en los bosques del eje volcánico transversal de México, que muestra un comportamiento similar al presentado en el análisis estacional de amplitud y frecuencia. Además, estos resultados podrían estar estrechamente relacionados con la percepción que tiene la población sobre la reducción de la precipitación, especialmente atribuida a la disminución de las precipitaciones en mayo, un mes que está relacionado con el inicio de la temporada de lluvias (Bee, 2014).

Finalmente, es importante señalar que los modelos de diferentes escenarios de cambio climático para México sugieren una disminución de

la precipitación y un aumento inminente de la temperatura en los próximos 80 años para el norte del Estado de México (INECC, 2022). Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas proyecciones se realizan a una resolución aproximada de 900 metros, lo que podría llevar a una generalización de patrones globales en un contexto local.

Conclusiones

Se realizó un análisis de tendencia espaciotemporal, un análisis estacional y un análisis de transición de categorías climáticas de Köppen-Geiger en la subcuenca del río Sila. El primero se llevó a cabo durante un periodo de 60 años (1956-2015), utilizando el método no paramétrico de Mann-Kendall para identificar tendencias espaciotemporales de aumentos o disminuciones en la precipitación y la temperatura (máxima, media y mínima). El análisis estacional de amplitud y frecuencia se efectuó durante los mismos 60 años, divididos en dos periodos de 30 años (1956-1985 y 1986-2015), y se utilizó para comprender el comportamiento y la distribución en términos del inicio y fin de las temporadas de lluvias, las estaciones más cálidas y menos cálidas, así como la diferencia en los valores de precipitación y temperatura dentro del primer periodo (1956-1985), en comparación con el segundo periodo (1986-2015) de análisis. Finalmente, para estos mismos periodos de 30 años (1956-1985 y 1986-2015), se realizó la clasificación climática de Köppen-Geiger para identificar los tipos de climas presentes en la subcuenca, y se llevó a cabo un análisis de transición/persistencia para identificar cómo se han modificado las categorías climáticas de los dos periodos analizados.

Los resultados sirvieron para abordar las preguntas de investigación presentadas en la introducción. Por lo tanto, según el análisis de tendencias espaciotemporales, los valores de precipitación y temperatura mínima se mantuvieron estables durante el periodo de 60 años de análisis. En cuanto a la temperatura media y máxima, se lograron valores moderadamente significativos de disminución, que van desde el centro hasta el noreste de la subcuenca. En cuanto al análisis de amplitud y frecuencia, se demostró que tanto en el primero como en el segundo periodo de análisis (cada uno con una duración de 30 años), la temporada de lluvias persiste de mayo a octubre. Sin embargo, hubo una reducción máxima de 20 mm en la precipitación en el mes de mayo, así como una disminución de 9 mm en el mes más lluvioso (julio), entre los dos periodos. Mayo emergió como el mes más cálido tanto en temperatura máxima como media, pero su valor disminuyó en 0.4 y 0.5 °C, respectivamente, en el segundo periodo. Junio y julio son los meses más cálidos para la temperatura mínima, y sus valores también mostraron una reducción de 0.5 °C del primero al segundo periodo. Cabe destacar que el segundo periodo de análisis (1986-2015) presenció un aumento en los valores de temperatura máxima durante la temporada más fresca del año (de julio a febrero).

A pesar de los resultados obtenidos en el análisis de tendencias espaciotemporales y en el análisis estacional de amplitud y frecuencia, los resultados del análisis de categorización climática de Köppen-Geiger indican que ni las condiciones de precipitación ni las condiciones de temperatura del segundo periodo han modificado el tipo de clima presente

en la subcuenca, concluyendo que el clima ha permanecido constante en la subcuenca del río Sila en los últimos 60 años.

Los resultados obtenidos se compararon con los escenarios de cambio climático, que indican que la subcuenca seguirá teniendo un clima templado, con inviernos secos y veranos cálidos (*Cwb*), bajo diferentes escenarios de cambio climático entre 2000 y 2100 (Rubel & Kottek, 2010). Con base en las ideas mencionadas y utilizando los datos disponibles entre 1956 y 2015, se consideró probable que el comportamiento de los elementos climáticos analizados (precipitación y temperatura) permanezca relativamente estable espacial y temporalmente en esta subcuenca. Siempre y cuando las condiciones actuales en la subcuenca no cambien drásticamente, es probable que su clima siga siendo influenciado por la variabilidad climática natural; sin embargo, siempre se deben tener en cuenta las condiciones del cambio climático global.

Los resultados obtenidos no garantizan la persistencia del clima actual, que podría ser modificado por los efectos de la actividad humana, como indica la definición de cambio climático. Por lo tanto, son necesarias acciones de conservación para preservar el estado actual y futuro de la subcuenca. Por último, los resultados de la clasificación climática de Köppen-Geiger podrían compararse con la clasificación climática de Köppen-García para ambos periodos, pues es un método específico para las características climáticas de la república mexicana. Los resultados de la clasificación climática de Köppen-García podrían reforzar los resultados obtenidos en esta investigación o generar nuevas líneas de investigación. También se recomienda ampliar la zona de estudio a nivel de cuenca o región hidrológica, para averiguar cómo ha comportado el clima dicho

nivel y/o si este comportamiento depende de las características locales del área analizada.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología de México por el apoyo financiero a través de una beca de investigación para llevar a cabo este trabajo, así como a la Universidad Autónoma del Estado de México por proporcionar acceso al *software* para el análisis geoespacial y el procesamiento de los datos utilizados en esta investigación.

Referencias

- Aawar, T., Khare, D., & Singh, L. (2019). Identification of the trend in precipitation and temperature over the Kabul River sub-basin: A case study of Afghanistan. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1377-1394. DOI: 10.1007/s40808-019-00597-9
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF, México: Limusa.
- Astudillo-Sánchez, C. C., Villanueva-Díaz, J., Endara-Agramont, A. R., Nava-Bernal, G. E., & Gómez-Albores, M. A. (2017). Climatic variability at the treeline of Monte Tlaloc, Mexico: A dendrochronological approach. *Trees-Structure and Function*, 31(2), 441-453. DOI: 10.1007/s00468-016-1460-z

- Baig, M. R., Shahfahad, Naikoo, M. W., Ansari, A. H., Ahmad, S., & Rahman, A. (2022). Spatio-temporal analysis of precipitation pattern and trend using standardized precipitation index and Mann-Kendall test in coastal Andhra Pradesh. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 2733-2752. DOI: 10.1007/s40808-021-01262-w
- Basarir, A., Arman, H., Hussein, S., Murad, A., Aldahan, A., & Al-Abri, M. A. (2018). Trend detection in annual temperature and precipitation using Mann-Kendall test. A case study to assess climate change in Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 7(Isbs 2017), 3-12. DOI: 10.1007/978-3-319-64349-6_1
- Bedewi, A., & Kumar, A. (2018). Current and projected water demand and water availability estimates under climate change scenarios in the Weyib River basin in Bale mountainous area of Southeastern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3-4), 727-735. DOI: 10.1007/s00704-017-2219-1
- Bee, B. (2014). "Si no comemos tortilla, no vivimos": Women, climate change, and food security in central Mexico. *Agriculture and Human Values*, 31(4), 607-620. DOI: 10.1007/s10460-014-9503-9
- Brassington, R. (1988). *Field hidrogeology*. Sydney, Australia: University Press and Halstead Press.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2013). *Hydrology and the Management of Watersheds*. Hoboken, USA: Wiley-Blackwell.
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, México: Universidad Potosina.

- Campos, D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. San Luis Potosí, México: Universidad Potosina.
- CEDIPIEM, Consejo Estatal para el Desarrollo Integral de los Pueblos Indígenas. (2022). *Pueblos indígenas en el Estado de México*. Gobierno del Estado de México. Recuperado de https://edomex.gob.mx/indigenas_edomex
- Cepanaf, Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna. (2019). Programa de Manejo del Área Natural Protegida Parque Estatal "Santuario del Agua y Forestal Subcuenca Tributaria Arroyo Sila". *Gaceta del Gobierno*.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Nueva York, Estados Unidos de América.
- Colaborador. (2020). Aseguran en el Estado de México que es imposible que avionetas inhiban lluvias. *BRIO Agropecuario*. Recuperado de <https://brioagropecuario.com/2020/06/29/aseguran-en-el-estado-de-mexico-que-es-imposible-que-avionetas-inhiban-lluvias/>
- Colín, O. (2021). *Automatización de la clasificación climática de Köppen-Geiger en un SIG (Master's thesis)*. Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2023). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Recuperado de <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

Conde, A. C., & López, J. (2016). *Variabilidad y cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002498.pdf>

Da Silva, P., Araujo, M. A., & Fábio, F. (2022). Evaluation of InVEST's Water Ecosystem Service Models in a Brazilian Subtropical Basin. *Water*, 14(10). DOI: 10.3390/w14101559

Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Taylor y Francis. Recuperado de <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=x0HfA6HJvogC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fundamentals+of+Hydrology&ots=fi3rcmkBRZ&sig=xXLEc2AGr243RS1Iqr6q66rbyFM>

De Oliveira, L. E., Da Silva, J. R., De Meneses, K. C., Botega, G., De Lima, R. F., & Silva, C. T. (2020). Köppen-Geiger and Camargo climate classifications for the Midwest of Brasil. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3-4), 1133-1145. DOI: 10.1007/s00704-020-03358-2

Deng, C., Pisani, B., Hernández, H., & Li, Y. (2020). Assessing the impact of climate change on water resources in a semi-arid area in central Mexico using a SWAT model. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. DOI: 10.1029/2008WR007615

Diaz, V., Bâ, K. M., Quentin, E., Ortiz, F. H., & Gama, L. (2015). Hydrological model to simulate daily flow in a basin with the help of a GIS. *Open Journal of Modern Hydrology*, 5(3), 58-67. DOI: 10.4236/ojmh.2015.53006

- Engelbrecht, C. J., & Engelbrecht, F. A. (2016). Shifts in Köppen-Geiger climate zones over southern Africa in relation to key global temperature goals. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1-2), 247-261. DOI: 10.1007/s00704-014-1354-1
- Fekadu, G., Biru, Z., & Mamo, G. (2019). Impacts of climate change on stream flow and water availability in Anger sub-basin, Nile Basin of Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1755-1764. DOI: 10.1007/s40899-019-00327-0
- Gobierno de la República. (2014). *Programa especial de Cambio Climático. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*. Ciudad de México, México.
- González-Celda, G., Ríos, N., Benegas-Negri, L., & Argotty-Benavides, F. (2021). Impacto del cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab. *Tecnología y ciencias del agua*. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-09
- Heano, J. (2006). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Hutchinson, M. F., & Xu, T. (2013). *Anusplin version 4.4. User Guide. August*. Recuperado de <http://fennerschool.anu.edu.au/files/anusplin44.pdf>
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación*. Recuperado de <http://atlasclimatico.unam.mx:8578/AECC/servmapas>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Marco geoestadístico*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Descargas>

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Cobertura y uso de suelo*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/>

IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2023). *Climate change 2023*. Recuperado de <https://www.unep.org/resources/report/climate-change-2023-synthesis-report>

Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., He, H., & He, G. (2017). Spatiotemporal variability of extreme precipitation in Shaanxi province under climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3-4), 831-845. DOI: 10.1007/s00704-016-1910-y

Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4, 1-20. DOI: 10.1038/sdata.2017.122

Krishnan, N., Prasanna, M. V., & Vijith, H. (2019). Statistical analysis of trends in monthly precipitation at the Limbang River Basin, Sarawak (NW Borneo), Malaysia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(4), 883-896. DOI: 10.1007/s00703-018-0611-8

Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1958). *Hydrology for engineers*. McGraw-Hill. Nueva York, Estados Unidos de América.

- López, S., Expósito, J. L., Esteller, M. V., Gómez, M. A., Paredes, J., & Esquivel, J. M. (2021). Delineation of protection zones for springs in fractured volcanic media considering land use and climate change scenarios in central Mexico region. *Environmental Earth Sciences*. DOI: 10.1007/s12665-021-09662-y
- Marques, R., Santos, C., Moreira, M., Corte-Real, J., Silva, V., & Medeiros, I. (2015). Rainfall and river flow trends using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2), 1205-1221. DOI: 10.1007/s11069-015-1644-7
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic Analysis and Design*. Pearson, Upper Saddle River, Nueva Jersey, Estados Unidos de América.
- Minga, S. (2018). *Análisis de cambio del rendimiento hídrico actual y bajo escenarios climáticos futuros en la región sur del Ecuador (Master's thesis)*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/99126>
- Nandi, S., & Manne, J. R. (2020). Spatiotemporal analysis of water balance components and their projected changes in near-future under climate change over Sina Basin, India. *Water Resources Management*, 34(9), 2657-2675. DOI: 10.1007/s11269-020-02551-2
- Naranjo, L., Glantz, M. H., Temirbekov, S., & Ramírez, I. J. (2018). El Niño and the Köppen-Geiger Classification: A Prototype concept and methodology for mapping impacts in Central America and the Circum-Caribbean. *International Journal of Disaster Risk Science*, 9(2), 224-236. DOI: 10.1007/s13753-018-0176-7

- Ngoma, H., Wen, W., Ojara, M., & Ayugi, B. (2021). Assessing current and future spatiotemporal precipitation variability and trends over Uganda, East Africa, based on CHIRPS and regional climate model datasets. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133(3), 823-843. DOI: 10.1007/s00703-021-00784-3
- Nigusie, A., & Wondimagegn, W. (2020). Assessment of hydrology and optimal water allocation under changing climate conditions: The case of Megech river sub basin reservoir, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2629-2642. DOI: 10.1007/s40808-020-01024-0
- Nonki, R. M., Lenouo, A., Lennard, C. J., & Tchawoua, C. (2019). Assessing climate change impacts on water resources in the Benue River Basin, Northern Cameroon. *Environmental Earth Sciences*, 78(20). DOI: 10.1007/s12665-019-8614-4
- Nourani, V., Mehr, A. D., & Azad, N. (2018). Trend analysis of hydroclimatological variables in Urmia lake basin using hybrid wavelet Mann-Kendall and Şen tests. *Environmental Earth Sciences*, 77(5), 1-18. DOI: 10.1007/s12665-018-7390-x
- Núñez-González, G. (2020). Analysis of the trends in precipitation and precipitation concentration in some climatological stations of Mexico from 1960 to 2010. *Natural Hazards*, 104(2), 1747-1761. DOI: 10.1007/s11069-020-04244-w
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial.

- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2022). *Organización Meteorológica Mundial. Preguntas frecuentes. Clima*. Recuperado de <https://public.wmo.int/es/preguntas-frecuentes-clima>
- Pandey, B. K., Khare, D., Kawasaki, A., & Mishra, P. K. (2019). Climate change impact assessment on blue and green water by coupling of representative CMIP5 climate models with physical based hydrological model. *Water Resources Management*. DOI: 10.1007/s11269-018-2093-3
- Pilares, I., Montalvo, N., Mejía, A., Guevara-Perez, E., Fano, G., & Alfaro, R. (2018). Evaluation of water availability in the Cabanillas river basin of the Peruvian Altiplano under regionalized climatic scenario. *Ingeniería UC*, 25(2), 307-319.
- Rahimi, J., Laux, P., & Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen-Geiger climate zones. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(1-2), 183-199. DOI: 10.1007/s00704-020-03190-8
- Rodríguez, A. (2022). Disputas por agua entre el Complejo Industrial Pastejé y Los Reyes Jocotitlán, Estado de México (México): espacialización industrial e hídrica a escala regional. *Secuencia*, 114. DOI: 10.18234/secuencia.v0i114.1917
- Ronald, J. (2016). *TerrSet. Geospatial Monitoring and Modeling System*. Clark University, Massachusetts, Estados Unidos de América. Recuperado de <https://clarklabs.org/terrset/>

- Rubel, F., & Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430
- Ruman, A. (2020). Modelling climate types in South Pannonian Basin, Serbia by applying the Köppen-Geiger climate classification. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1303-1313. DOI: 10.1007/s40808-020-00773-2
- Shaw, E. M., Beven, K. J., Chappell, N. A., & Lamb, R. (2011). *Hydrology in practice*. Taylor & Francis. DOI: 10.1201/9781315274904
- U.S. Army Corps of Engineers. (2005). Mann-Kendall analysis for the Fort Ord Site. *HydroGeoLogic, Inc.*, 1-7. Recuperado de <https://www.statisticshowto.com/wp-content/uploads/2016/08/Mann-Kendall-Analysis-1.pdf>
- UN, United Nations. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. 62220. New York, USA: United Nations.
- Vázquez-Ochoa, L. A., Correa-Sandoval, A., Vargas-Castilleja, R., Vázquez-Sauceda, M., & Rodríguez-Castro, J. H. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *CienciaUAT*. DOI: 10.29059/cienciauat.v16i1.1498
- Viessman, W., & Lewis, G. (1995). *Introduction to hydrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey, Estados Unidos de América.

- Wang, Y., Wang, X., Li, C., Wu, F., & Yang, Z. (2015). Spatiotemporal analysis of temperature trends under climate change in the source region of the Yellow River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(1-2), 123-133. DOI: 10.1007/s00704-014-1112-4
- Yanming, Z., Jun, W., & Xinhua, W. (2011). Study on the change trend of precipitation and temperature in kunming city based on Mann-Kendall analysis. *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 119, 505-513. DOI: 10.1007/978-3-642-25538-0_71
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2019). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen-Geiger climate classification scheme. *Climate Dynamics*, 52(1-2), 227-243. DOI: 10.1007/s00382-018-4128-0