



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

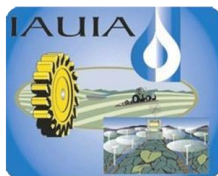


PRESENTA:

RICARDO ÁLVAREZ LÓPEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2023

TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA,
CHIAPAS

Tesis realizada por **Ricardo Álvarez López** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como
requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

DIRECTOR: _____

DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR: _____

DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

ASESOR: _____

DR. AGUSTÍN RUÍZ GARCÍA

CONTENIDO

HOJA DE APROVACIÓN DE TESIS	II
CONTENIDO	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
DEDICATORIAS	VII
AGRADECIMIENTOS	VIII
DATOS BIOGRÁFICOS	IX
RESUMEN GENERAL	X
GENERAL ABSTRACT	XI
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Literatura citada	3
2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	5
2.1. Cambio climático según varios autores e instituciones	5
2.2. Alteraciones en el entorno climático	6
2.3. Efectos del cambio climático	7
2.4. Obtención de datos climáticos	9
2.4.1. Servicio Meteorológico Nacional	10
2.4.2. Climate Engine.org	11
2.4.3. Método del inverso de la distancia (IDW)	12
2.5. Homogenización de datos	14
2.5.1. Homogenización de datos de temperatura y precipitación	14
2.5.2. Método de ajuste de los puntos de cambio	18
2.6. Índices de cambio climático	21
2.6.1. ETCCDI	21
2.6.2. Cálculo de los indicadores del ETCCDI	24
2.7. Regresión por mínimos cuadrados	25

2.8.	Regresión local ponderada.....	27
2.9.	Control de calidad de datos	28
2.10.	Literatura citada.....	29
3.	TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS	32
3.1.	Resumen	32
3.2.	Introducción	33
3.3.	Materiales y métodos.....	34
3.4.	Resultados y discusión	39
3.5.	Conclusiones	45
3.6.	Agradecimientos.....	46
3.7.	Referencias	46

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Lista de los 27 índices del ETCCDI, descripción y unidades.	21
Cuadro 2. Lista de los 27 índices del ETCCDI, descripción y unidades.	37
Cuadro 3. Sistema de clasificación de la pendiente de la recta de ajuste y relevancia estadísticamente significativa del índice.....	38
Cuadro 4. Índices referentes a temperatura de las estaciones analizadas.....	39
Cuadro 5. Índices referentes a precipitación de las estaciones analizadas.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efectos observados en extremos calurosos, precipitaciones fuertes y sequías y la seguridad en las contribuciones humanas en los cambios observados.	7
Figura 2. Estaciones Climatológicas del SMN operando en México.	10
Figura 3. Mapa del promedio temperatura máxima de 1991 a 2020 en interfaz de Climate Engine.....	12
Figura 4. Datos diarios de temperatura máxima sobre un punto específico del 2 de noviembre de 2022 al 31 de diciembre de 2022 en la interfaz de Climate Engine.....	12
Figura 5. Ubicación de la cuenca en estudio y estaciones meteorológicas analizadas.....	35
Figura 6. Tendencia y tasa de incremento de los índices: (A) TX90p, (B) SUnn, (C) WSDI y (D) TXx.	41
Figura 7. Tendencia y tasa de incremento de los índices (A) RX1day, (B) Rx5day, (C) CWD, (D) PRCPTOT.	43
Figura 8. Tendencia y tasas de cambio de los índices Rnnmm con umbrales de precipitación (A) R5mm, (B) R10mm, (C) R20mm y (D) R70mm.....	45

DEDICATORIAS

A mi familia

Mis hermanos Fernando y Guadalupe y a mi papa Chencho por respaldar cada decisión que tomo.

A mis amigos

Por formar este ambiente que hace llevadero lo que sea y estar en las buenas y en las malas.

A mis profesores

Por estar en disposición de ayudarme en todo momento y formar al profesionalista que soy y puedo llegar a ser.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por la beca otorgada que permitió la realización de esta tesis y del programa de maestría cursado.

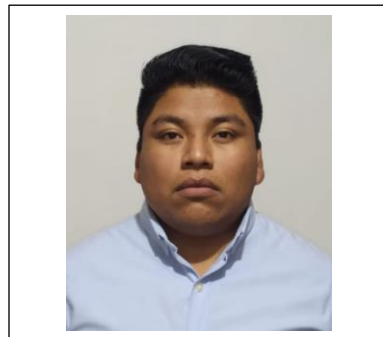
A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por la formación académica y profesional de alta calidad otorgada a mi persona.

A la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por guiarme durante la realización del proyecto de investigación, los consejos otorgados en el posgrado y su apoyo incondicional en mi formación profesional.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por los consejos y experiencia en la realización del proyecto de investigación.

Al Dr. Agustín Ruíz García por los consejos y disposición de tiempo para realizar este proyecto de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Ricardo Álvarez López
Fecha de nacimiento	15 de abril de 1995
Lugar de nacimiento	San Cristóbal de Las Casas
No. Cartilla militar	D-3339616
CURP	AALR950415HCLSPC05
Profesión	Ingeniero en Irrigación
Cédula profesional	12174722

Desarrollo académico

Bachillerato	Centro de Bachillerato Tecnológico, Industrial y de Servicios No. 92
Licenciatura:	Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2014-2018.

RESUMEN GENERAL

TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS

El cambio climático es un hecho inequívoco con efectos caracterizados por la comunidad científica y perceptibles por la población. Su afectación abarca desde la agricultura, escasez de agua, salud humana, etc., afectando principalmente áreas marginadas. Es necesario obtener información de estos cambios a nivel regional para poder abordarlos. Ante esta necesidad, se analizó la tendencia de temperatura y precipitación en la cuenca del Río Huixtla en la Costa del Pacífico Mexicano, estado de Chiapas, en el periodo 1960-2014. Se obtuvieron los 27 índices de cambio climático a partir de los datos de las estaciones Despoblado, Escuintla, Finca Chicharras, Huehuetán, Huixtla y Motozintla (SMN) del Servicio Meteorológico Nacional. Aunque se inició con la idea de analizar la cuenca Huixtla, se terminó ampliando el área de trabajo para tener un estudio completo del clima, aportando datos de estaciones climatológicas de las cuencas Huehuetán y Despoblado, cubriendo un total de aproximadamente 1000 km². Se generaron los datos faltantes de lluvia y temperatura. Se evaluó la homogeneidad de las series y se homogeneizaron cuando fuera necesario. Los índices se obtuvieron con el software RCLimDex. Se detectaron temperaturas más altas en la parte media y baja al oeste de la cuenca (TX90p), así como un período de días calurosos más largo (WSDI). La parte alta y baja de la cuenca presenta tendencia de enfriamiento, días más fríos (TX10p) y en periodos más largos (CSDI). En toda la cuenca ha aumentado la precipitación en uno y cinco días (RX1day y RX5day) y el total anual (PRCPTOT), se tiene periodos secos (CDD) de menor duración y periodos húmedos más largos (CWD). Las precipitaciones diarias mayores a 5, 10, 20, 70 y 150 mm muestran una tendencia de incremento.

Palabras clave: afectaciones por cambio climático, índices de cambio climático, Río Huixtla, temperatura, precipitación, RCLimDex.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ricardo Álvarez López

Director: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

GENERAL ABSTRACT

TEMPERATURE AND PRECIPITATION TRENDS DUE TO CLIMATE CHANGE IN THE RÍO HUIXTLA BASIN, CHIAPAS

Climate change is an unequivocal fact with effects characterized by the scientific community and perceptible by the population. Its impact ranges from agriculture, water scarcity, human health, etc., mainly affecting marginalized areas. In order to address these effects, it is necessary to obtain information at the regional level. Given this need, the temperature and precipitation trend were analyzed in the Río Huixtla basin on the Mexican Pacific Coast, state of Chiapas, from 1960 to 2014. The 27 climate change indices were obtained from data from Despoblado, Escuintla, Finca Chicharras, Huehuetán, Huixtla and Motozintla (SMN) meteorological stations of Servicio Meteorológico Nacional. Although the initial idea was analyzing the Huixtla basin, the study area expanded to have a complete study of the climate, providing data from climatological stations in the Huehuetán and Despoblado basins, covering a total area of approximately 1000 km². Missing rainfall and temperature data were generated. The homogeneity of the series was evaluated, and homogenized when necessary. The indices were obtained with the RClimDex software. Higher temperatures (TX90p) were detected in the middle and lower western part of the basin and longer period of hot days (WSDI). The upper and lower part of the basin present a cooling trend, colder days (TX10p) and in longer periods (CSDI). Throughout the basin, precipitation has increased in one and five days (RX1day and RX5day) and the annual total (PRCPTOT), the dry periods (CDD) are shorter and wet periods (CWD) are longer. Daily rainfall greater than 5, 10, 20, 70 and 150 mm show an increasing trend.

Keywords: affections due to climate change, climate change indices, Río Huixtla, temperature, precipitation, RClimDex.

Master's Degree Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Ricardo Álvarez López

Advisor: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático representa un gran reto en la actualidad. Los impactos del cambio climático se esparcen por múltiples áreas como la agricultura, salud, disponibilidad del agua, etc (Antronico et al., 2020). La percepción de este fenómeno es notable, un ejemplo es la encuesta a gran escala realizada por el European Investment Bank (EIB) a través de China, Europa y Estados Unidos con la intención de conocer la percepción de los ciudadanos sobre el alcance del cambio climático; los resultados mostraron que el 73% de los participantes de China perciben al cambio climático como el mayor reto, los europeos con un 47%, mientras que para los estadounidenses un 39% (EIB, 2020).

Hablando de México, el país es profundamente afectado por los impactos del cambio climático, no únicamente por su ubicación geográfica, ya que está posicionado en las franjas tropicales más afectadas por eventos extremos, sino también, por las condiciones socioeconómicas de pobreza y desigualdad que hacen al país más vulnerable a los efectos climáticos (Lucatello & Sánchez, 2022).

El IPCC (2014) en su Reporte de Síntesis menciona que las causas de los cambios observados en el sistema climático, así como en cualquier sistema natural o humano afectado por el clima, se establecen siguiendo un conjunto de métodos consistentes. Abordando más en eso, señala que la detección de cambios o la pregunta de si el clima o un sistema afectado por el clima ha realmente cambiado se aborda desde un sentido estadístico. Enfocándose más en la detección, se puede mencionar que existen métodos como los índices del Expert Team on Climate Change and Detection (ETCCDI) definidos por Frich et al. (2002), los cuales son utilizados para obtener información de datos diarios de observaciones meteorológicas sobre los valores de extremos del clima de forma objetiva (Zhang et al., 2011).

Se tienen antecedentes del uso de estos indicadores del ETCCDI en México, ejemplos de estos son el elaborado por Colorado-Ruiz & Cavazos (2021) donde

analizó la tendencia de 15 índices de extremos y no extremos de precipitación para México y el sur de los Estados Unidos de 1981 a 2010; en Zacatecas se tienen dos trabajos recientes, el realizado por Ortiz-Gómez et al. (2020) donde analiza los cambios espaciales y temporales de eventos de precipitación extremos en el periodo de 1961 a 2014 con la intención de determinar cambios en su frecuencia e intensidad y el trabajo realizado por Pita-Díaz & Ortega-Gaucin (2020) donde analiza los cambios en extremos de precipitación, pero también de temperatura en el mismo estado pero en el periodo de 1976-2015; el trabajo realizado por Ruiz-Alvarez et al. (2020), donde analizó la tendencia de 11 índices de precipitación extrema en 25 estaciones meteorológicas de Aguascalientes para el periodo de 1980 a 2013 con la intención de determinar las afectaciones por cambio climático y construir una imagen de la distribución espacial de los eventos de precipitación extremos en ese estado.

También se han utilizado los índices del ETCCDI para trabajos con enfoque a la agricultura y al entorno urbano, un ejemplo es el realizado por Ruiz-García et al. (2021) cuyo objetivo fue proyectar estrategias locales de adaptación para evaluar su impacto en un sistema cafetalero en Veracruz; el trabajo realizado en el valle de México por Montero-Martínez & Andrade-Velázquez (2022) donde analiza 50 índices anuales de cambio climático relacionados a la temperatura y precipitación de 1951-2010 y analizar su tendencia en los años debido a la urbanización, similar al trabajo realizado por García-Cueto et al. (2019), donde analiza 16 áreas urbanas en México de 1980 a 2010 mediante 14 índices del ETCCDI con el propósito de reducir la vulnerabilidad de las ciudades y proveer elementos técnicos a los gobiernos locales.

Tomando en cuenta los trabajos realizados en México y la necesidad de este tipo de estudios a nivel regional para determinar los cambios en los extremos climáticos, enfocándose en el estado de Chiapas, este trabajo de tesis tiene como objetivo analizar la tendencia de los índices de cambio climático del ETCCDI de temperatura y precipitación para la cuenca del Río Huixtla en Chiapas, siendo importante tanto a la población como al ser una zona que posee una importancia

en la agricultura por el cultivo del café, es importante saber estos cambios en la precipitación y temperatura y saber sus afectaciones, sobre todo por la presencia de la roya del café en la zona de estudio y la sensibilidad del cultivo ante estas variaciones (Libert-Amico & Paz-Pellat, 2018).

De esta forma, esta tesis está compuesta de tres capítulos, el primer capítulo consiste en esta introducción general, después y como segundo capítulo esta la revisión de literatura de conceptos y aspectos técnicos relevantes y finalmente como tercer capítulo, se encuentra el artículo realizado “Tendencias de temperatura y precipitación por cambio climático en la cuenca del Río Huixtla, Chiapas” como resultado de la investigación realizada.

1.1. Literatura citada

- Antronico, L., Coscarelli, R., De Pascale, F., & Di Matteo, D. (2020). Climate Change and Social Perception: A Case Study in Southern Italy. *Sustainability*, 12(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/su12176985>
- Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5406–5430. <https://doi.org/10.1002/joc.7225>
- EIB. (2020). The EIB climate survey 2019-2020: How citizens are confronting the climate crisis and what actions they expect from policymakers and businesses. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2867/653713>
- Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193–212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- García-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., López-Velázquez, E., Reyes-López, J., Cruz-Sotelo, S., & Ojeda-Benítez, S. (2019). Trends of climate change indices in some Mexican cities from 1980 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1), 775–790. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2620-4>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report (Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 151). Core Writing Team, R.K Pachauri and

L.A. Meyer (eds.). https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf

- Libert-Amico, A., & Paz-Pellat, F. (2018). Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: La roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914>
- Lucatello, S., & Sánchez, R. (2022). Climate Change in North America: Risks, Impacts, and Adaptation. A Reflection Based on the IPCC Report AR6 – 2022. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, 17(4), Article 4. <https://doi.org/10.21919/remef.v17i4.794>
- Montero-Martínez, M. J., & Andrade-Velázquez, M. (2022). Effects of Urbanization on Extreme Climate Indices in the Valley of Mexico Basin. *Atmosphere*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/atmos13050785>
- Ortiz-Gómez, R., Muro-Hernández, L. J., & Flowers-Cano, R. S. (2020). Assessment of extreme precipitation through climate change indices in Zacatecas, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(3), 1541–1557. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03293-2>
- Pita-Díaz, O., & Ortega-Gaucin, D. (2020). Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico. *Climate*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cli8040055>
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily extreme precipitation indices in Aguascalientes, Mexico. *Meteorological Applications*, 27(1), e1838. <https://doi.org/10.1002/met.1838>
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2021). Projections of Local Knowledge-Based Adaptation Strategies of Mexican Coffee Farmers. *Climate*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

2.1. Cambio climático según varios autores e instituciones

La Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) menciona al cambio climático como un cambio a largo plazo de los patrones climáticos promedios que han llegado a definir los climas locales, regionales y globales de la tierra (NASA, 2023). La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2023) agrega que dichos cambios pueden ser naturales, debido a la actividad del sol o a grandes erupciones volcánicas; pero que desde los 1800s, las actividades humanas han sido el principal actor del cambio climático, principalmente por la quema de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas. Las industrias, la generación de energía, el transporte, las construcciones, la agricultura, el uso del suelo están entre los principales sectores causantes de gases de efecto invernadero (ONU, 2023).

Con el continuo avance en el conocimiento de este tema, con la intención de revisar y coordinar las investigaciones que se realizan y las contribuciones de la comunidad científica el Programa Ambiental de Las Naciones Unidas (UNEP) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO) establecieron el Panel Intergubernamental de Cambio climático (IPCC). Este organismo se encarga de compilar sistemáticamente la literatura científica relacionada al cambio climático y publicar los reportes de evaluación o mejor conocidos como Assessment Report's (ARs) cada 4 o 6 años. Cuenta también con varios grupos de trabajo, el Working Group I se enfoca en las bases físicas del cambio climático, los Working Groups II y III son los que recopilan los avances multidisciplinarios en mitigación de impactos del cambio climático y originan los más recientes AR5 y AR6 (Ghil & Lucarini, 2020). El AR6 se publicó en el 2023. En estos documentos es posible encontrar una perspectiva amplia de las afectaciones, conocimientos y estado actual de la investigación climática, así como una base conceptual muy útil y de gran ayuda en la realización de esta investigación.

2.2. Alteraciones en el entorno climático

Es de importancia tener conceptos presentes como la variabilidad climática, esta se refiere a la variación del estado promedio y otras estadísticas (como desviación estándar, la ocurrencia de extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales más allá de eventos climáticos individuales. Esta variabilidad puede darse debido a un proceso natural dentro del sistema climático conocido como variabilidad interna o fuerzas antropogénicas externas conocido como variabilidad externa (IPCC, 2018). Cabe mencionar que en el United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) se maneja como cambio climático al cambio en el clima que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y el cual es en adición a la variabilidad climática observada sobre periodos de tiempo comparables (IPCC, 2018). Por lo que el cambio climático es el resultado de cambios en la variabilidad y en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y el momento de ocurrencia de los eventos climáticos extremos y de tiempo atmosférico (IPCC, 2012). Los cambios en los extremos climáticos antes mencionados y la variabilidad climática pueden verse en los cambios en las distribuciones de probabilidad de los registros de variables climáticas (IPCC, 2012). En la Figura 1 se muestran los principales efectos observados en diferentes regiones del mundo en temperaturas muy elevadas, en precipitación fuerte y en sequías en agricultura y ecología.

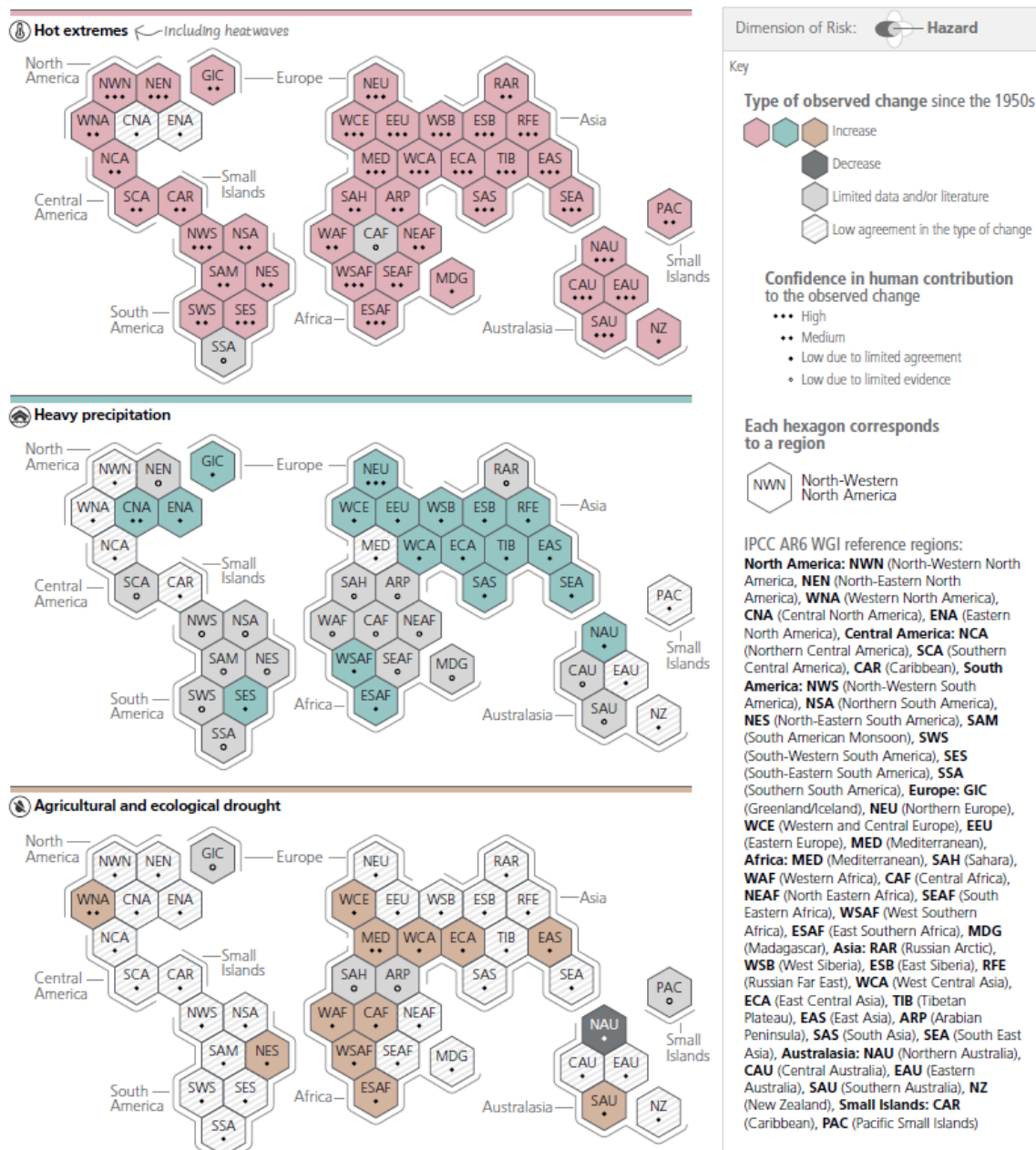


Figura 1. Efectos observados en extremos calurosos, precipitaciones fuertes y sequías y la seguridad en las contribuciones humanas en los cambios observados.

Fuente: (IPCC, 2023)

2.3. Efectos del cambio climático

El IPCC (2023) menciona las afectaciones del cambio climático, además de asociarlo con un grado de confiabilidad en su 6to reporte; según los resultados

de las investigaciones que se han realizado, se ha reducido la seguridad alimentaria y ha afectado la seguridad hídrica debido al calentamiento global, los cambios en los patrones de precipitación; además, ha incrementado la frecuencia e intensidad de los extremos climáticos, esto con alta confiabilidad (IPCC, 2023). En una confianza alta, los niveles actuales de calentamiento global son asociados con riesgos moderados del incremento de escasez de agua. De manera gruesa, la mitad de toda la población mundial ha experimentado escasez severa de agua en al menos un momento del año debido a la combinación de factores climáticos y no climáticos (confianza media) (IPCC, 2023).

De la misma forma, pero con confianza media, se puede aseverar que la productividad agrícola ha sido frenada levemente en alrededor de 50 años de manera mundial, esto se relaciona con un impacto negativo en la productividad de los cultivos en regiones de latitudes bajas y medias y algunos impactos positivos en latitudes altas (alta confianza) (IPCC, 2023). En el área urbana, el cambio climático ha causado impactos adversos en la salud humana, el modo de vida y la infraestructura clave (confianza alta), un ejemplo son los extremos calurosos incluidos olas de calor que se han intensificado en las ciudades (confianza alta). Los impactos observados están concentrados en áreas marginadas social y económicamente (confianza alta). De la misma forma, las ciudades intensifican el calentamiento causado por el hombre de manera local (muy alta confianza), mientras la urbanización también incrementa la precipitación alta y media sobre o cerca de las ciudades, resultando en un escurrimiento intenso (alta confianza) (IPCC, 2023).

Por su parte la Organización Mundial de la Salud o WHO (2021) menciona que el cambio climático es la mayor amenaza para la salud a la que se enfrenta la humanidad, siendo las personas cuya salud se está viendo perjudicada en primer lugar y de forma más grave son las que menos contribuyen a las causas del cambio climático, es decir, las personas de países y comunidades de bajos recursos. El cambio climático ya ha afectado a la población de muchas formas, desde provocar muertes y enfermedades por la ocurrencia de eventos climáticos

extremos más frecuentes, como inundaciones, el impacto por olas de calor, alteraciones en los sistemas alimentarios y las enfermedades que se pueden transmitir por alimentos y el agua, así como problemas por salud mental; entre las afectaciones a la salud igual se puede mencionar la mayor dificultad de acceso a la atención de salud y apoyo social (WHO, 2021).

Muchos cambios en el sistema climático, incluido eventos extremos, serán más extensos en el panorama cercano con incremento en el calentamiento global (alta confianza). Múltiples riesgos climáticos y no climáticos interactuarán y resultará una composición de impactos más difícil de manejar (alta confianza). Las pérdidas y daños incrementarán con el incremento del calentamiento global (muy alta confiabilidad), mientras se concentra fuertemente entre la población pobre más vulnerable (alta confianza). Continuando con el desarrollo no sostenible actual, los patrones incrementarán la exposición y vulnerabilidad de los ecosistemas y las personas ante amenazas climáticas (alta confianza) (IPCC, 2023).

Por su parte, la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2023) menciona que las instalaciones de atención médica también necesitan ser seguras y ser operativas durante y luego de desastres, esto ya que en las Américas el 67% de las instalaciones de atención médica están ubicadas en áreas proclives a desastres, además, menciona que, en la última década, 24 millones de personas quedaron sin acceso a la atención médica por meses debido a daños de la infraestructura (OPS, 2023).

2.4. Obtención de datos climáticos

Para esta investigación, los datos climáticos de la cuenca del Río Huixtla, Chiapas, se obtuvieron de diferentes fuentes e instituciones. La principal es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con la ayuda de métodos para completar los datos faltantes de la serie, estos se especifican enseguida.

2.4.1. Servicio Meteorológico Nacional

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dispone de un poco mas de 5,400 estaciones climatológicas que miden variables climatológicas como temperaturas extremas (máxima, mínima), precipitación acumulada en 24 horas y algunos registros de fenómenos como tormenta eléctrica, niebla, granizo, cobertura del cielo, evaporación. De las estaciones, cerca de 2,800 estaciones reportan datos, el restante de las estaciones ya no existen o han dejado de operar, pero todavía cuentan con un registro considerable de datos. La información puede ser consultada mediante dos formas: la primera es mediante el mapa interactivo del SMN y la segunda es mediante la visualización de un archivo KMZ en la plataforma de Google Earth (SMN, 2023).

Para los datos faltantes en la serie de datos del Servicio Meteorológico Nacional se puede optar por obtener los datos faltantes de diferentes maneras, para la temperatura es posible completar la serie de temperatura máxima y mínima con los datos de la plataforma Climate Engine, los datos de precipitación se pueden estimar con el método IDW o del inverso de la distancia de National Wheater Service, ambas herramientas son descritas en las siguientes secciones.

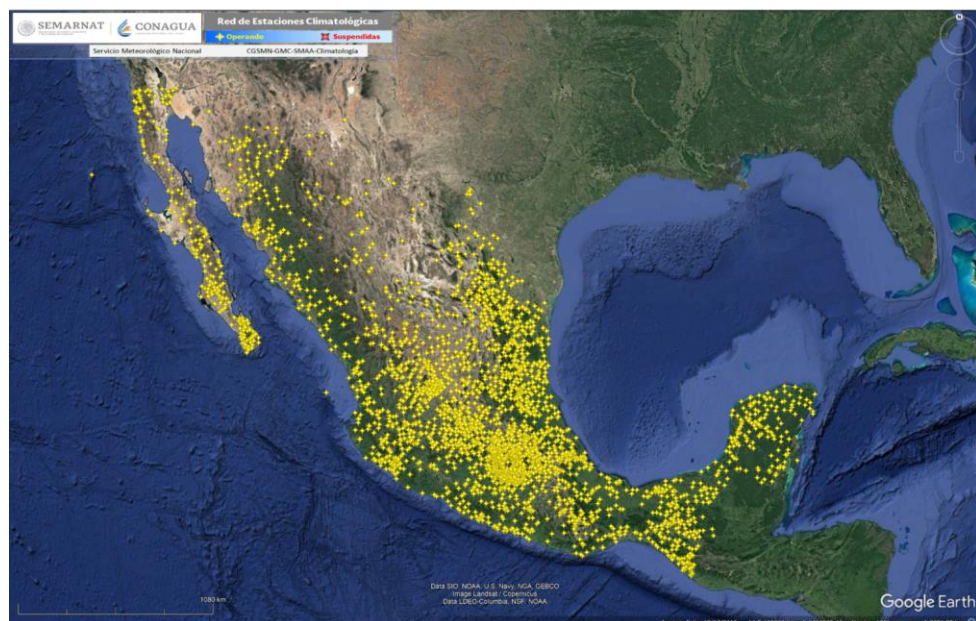


Figura 2. Estaciones Climatológicas del SMN operando en México.

Nota: KMZ de Estaciones Climatológicas (SMN, 2023) sobre Google Earth.

2.4.2. Climate Engine.org

Climate Engine es una plataforma de acceso libre de datos climáticos basados en computación en la nube y sensores remotos (Huntington et al., 2017) que corre sobre Google Earth Engine. Fue creada por el equipo de científicos del Desert Research Institute (DRI), University of Idaho y el equipo de Google. Esta plataforma permite al usuario procesar, visualizar, descargar y compartir conjuntos de datos de una región climática o de manera global en tiempo real (mapas de anomalías y series de tiempo) (Huntington et al., 2017). Así también, Climate Engine provee acceso a una variedad de conjuntos de datos geoespaciales que monitorean vegetación, nieve, y agua alrededor del planeta, así como variables del clima como temperatura, precipitación y velocidad del viento. Los datos se procesan en la nube, permitiendo al usuario no almacenar y procesar grandes cantidades de datos (DRI, 2023). De Climate Engine se pueden obtener las series de tiempo de datos de temperatura y precipitación desde el primero de enero de 1980 al 31 de diciembre de 2022. La información puede descargarse en formato .csv compatible con Excel, de esta forma se pueden incorporar a series de datos para completar datos faltantes. Una representación en forma de mapa puede verse en la Figura 3 y una serie de datos en la Figura 4.

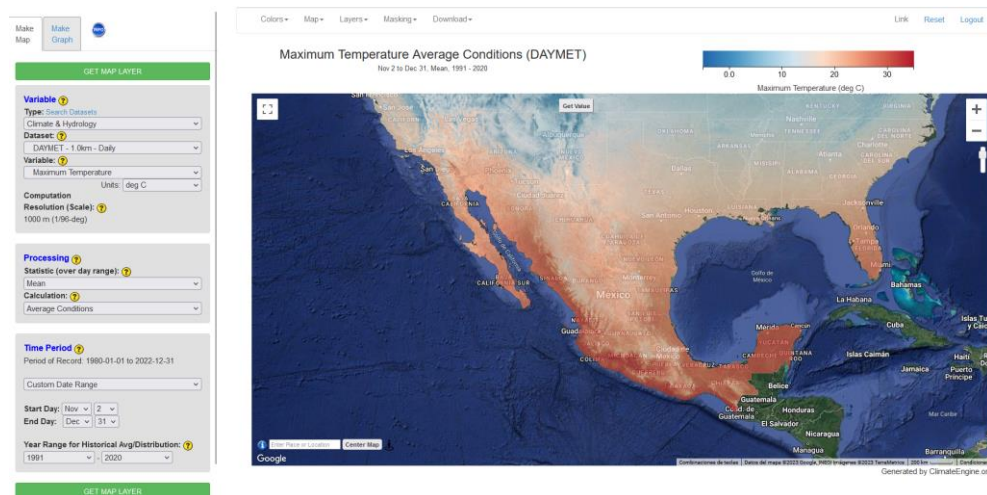


Figura 3. Mapa del promedio temperatura máxima de 1991 a 2020 en interfaz de Climate Engine.

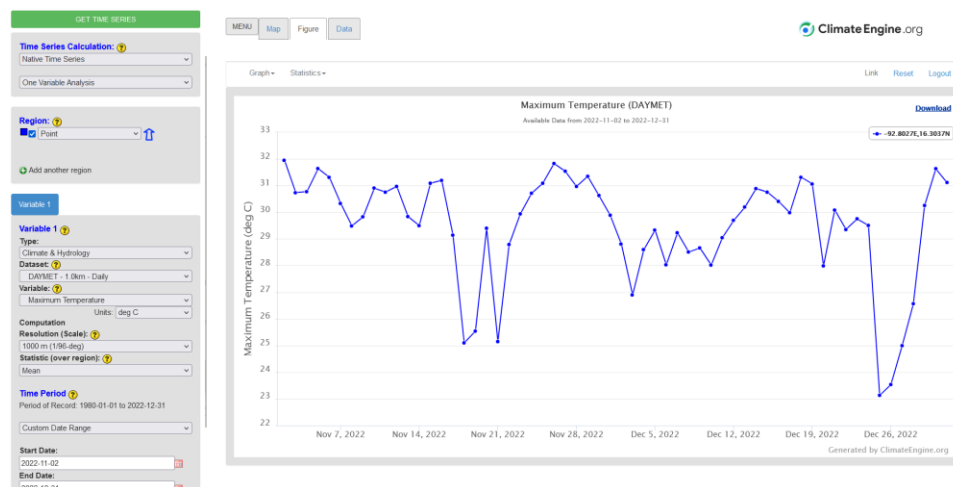


Figura 4. Datos diarios de temperatura máxima sobre un punto específico del 2 de noviembre de 2022 al 31 de diciembre de 2022 en la interfaz de Climate Engine.

2.4.3. Método del inverso de la distancia (IDW)

La interpolación del inverso de la distancia (IDW) o del U.S National Wheater Service supone explícitamente que los elementos cercanos son más parecidos entre sí que los que se encuentra más alejados, es decir, que los valores medidos más cercanos tiene más influencia al predecir un valor que los más alejados. El

método IDW permite predecir un valor en cualquier lugar sin medición teniendo las mediciones que rodean la ubicación del punto a predecir, otorgando una ponderación más alta a los puntos más cercanos y una ponderación menor a los puntos más alejados, por eso el nombre del inverso de la distancia (ESRI, 2023). Para el caso de la estimación de datos de precipitación o temperatura faltantes o perdidos, donde los puntos de medición son las estaciones meteorológicas y los elementos alrededor de la estación son estaciones de apoyo o auxiliares, el método IDW se puede expresar con la siguiente Ecuación (1 y 2).

$$P_x = \frac{\sum(P_i W_i)}{\sum W_i} \quad (1)$$

P_x = Dato perdido para el día, mes, o año en la estación X.

P_i = Dato existente en la estación auxiliar i , donde $i = 1, 2, \dots, n$ (*mínimo* $n = 2$) para el mismo día, mes o año.

$$W_i = \frac{1}{D_i^2} \quad (2)$$

D_i es la distancia entre cada estación circundante auxiliar y la estación del dato perdido.

Particularmente, en cuencas de Chiapas, la estimación de datos faltantes mediante el método del inverso de la distancia ha sido aplicada como en la cuenca del Río Sabinal, donde en el artículo realizado por (Aragón Hernández et al., 2019) analizó diferentes métodos tradicionales y de interpolación de datos de precipitación para obtener la precipitación media con datos puntuales, obteniendo buenos resultados con el método del inverso de la distancia.

2.5. Homogenización de datos

2.5.1. Homogeneidad de datos de temperatura y precipitación

Las series de datos climáticos usualmente contiene cambios artificiales debido al cambio de instrumentación de medición, el personal que se encarga de tomar los datos, la localización, el ambiente, avance en la tecnología de medición, etc., siendo casi inevitable su presencia (Wang et al., 2010). Presentándose estas discontinuidades, es importante su detección ya que estos cambios pueden causar un sesgo en las tendencias climáticas, su variabilidad y los resultados de un análisis de extremos (Wang et al., 2010). El registro de estos cambios durante la toma de datos facilita manejar o ajustar los datos con alguna prueba estadística regular, mientras que para las series con las que no se cuenten estos registros es necesario implementar alguna prueba estadística apropiada (Wang, 2008).

Para el caso donde se tiene series de datos sin ninguna serie de referencia ni metadatos de la estación a analizar, como es el caso de las estaciones de esta investigación, Wang (2008) propuso una modificación del método de regresión del modelo de F máxima de dos fases con tendencia común (TPR3) al cual menciona como prueba F de penalización máxima (PMFT); este método de detección permite encontrar los puntos artificiales de cambio en una serie de datos climáticos con una significancia nominal ($p=0.05$, en esta investigación) y con mayor fiabilidad que el TPR3. Este método consiste en la modificación mediante un parámetro empírico $P(k)$ que permite definir el estadístico PF_{max} con la siguiente Ecuación (3):

$$PF_{max} = \max_{1 \leq k \leq N-1} [P(k)F_c(k)] \quad (3)$$

Donde $P(k)$ es un factor de penalización construido empíricamente, N es el total de datos dentro de la serie y k es lugar del dato donde se da un quiebre o punto de cambio; $F_c(k)$ se define de la siguiente manera en la Ecuación (4, 5 y 6).

$$F_c(k) = \frac{(SSE_0 - SSE_A)}{SSE_A / (N-3)} \quad (4)$$

$$SSE_A = \sum_{t=1}^K (X_t - \hat{\mu}_1 - \hat{\beta}t)^2 + \sum_{t=k+1}^K (X_t - \hat{\mu}_2 - \hat{\beta}t)^2 \quad (5)$$

$$SSE_0 = \sum_{t=1}^N (X_t - \hat{\mu}_0 - \hat{\beta}_0 t)^2 \quad (6)$$

Donde $\hat{\mu}_0$ y $\hat{\beta}_0$ son estimaciones bajo la restricción $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, es decir $X_t = \mu_0 + \beta_0 t + \varepsilon_t$ para $t = 1, 2, \dots, N$.

El método PFMT es utilizado para la detección de puntos de cambio dentro de series de datos de temperatura máxima y mínima como es recomendado por el RClimDex (Zhang et al., 2011), programa el cual se explicará más adelante; este método es igualmente utilizado en precipitación, aunque es necesario transformar los datos ya que las series de precipitación no cumple el supuesto de normalidad (Wang et al., 2010). Una vez encontrados estos puntos de cambio en la serie de temperatura máxima y mínima, se realiza el ajuste de la serie para su homogenización, pero antes, en el párrafo siguiente se especifica el proceso de transformación necesario para detectar los puntos de cambio en la serie de precipitación y después se describirá el método utilizado para el ajuste de ambas series, precipitación y temperatura máxima y mínima.

Para que la serie de precipitación se ajuste a una serie normal Wang et al. (2010) propuso un proceso de transformación Box-Cox a la serie de datos de precipitación original $\{Y_i, i = 1, \dots, N\}$ de forma que la detección de puntos de cambio se realice sobre la serie transformada $\{X_i = h(Y_i; \lambda)\}$, donde λ es un parámetro de transformación. Es necesario encontrar el óptimo de este parámetro para cada estación de análisis de donde provienen los datos de precipitación. Para el caso donde se tiene un solo punto de cambio, el proceso de detección puede considerarse como el siguiente: paso A, definiendo a los puntos transformados como en la Ecuación (7):

$$X_i^j = \begin{cases} (Y_i^{\lambda_j} - 1)/\lambda_j & \lambda_j \neq 0 \\ \log Y_i & \lambda_j = 0 \end{cases} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

Donde $j = 1, 2, \dots, J$, donde J es un valor dado por un rango en el que se desea evaluar λ . Después de realizar la transformación, se considera como paso B utilizar el algoritmo PMFred (Wang, 2008) para encontrar el punto de cambio más probable en la serie transformada para cada λ_j , además de calcular $S_0^2(\lambda_j)$ y $S_0^2(c|\lambda_j)$ para cada c admisible tal que $c \in \{N_{min}, N_{min} + 1, \dots, N - N_{min}\}$ y encontrar $\hat{c}_j$ tal que (Wang et al., 2010), Ecuación (8).

$$PF_{max} = \max_{N_{min} \leq c \leq N - N_{min}} [P(c)F_c(\lambda_j)] = P(\hat{c}_j)F_{\hat{c}_j}(\lambda_j) \quad (8)$$

$$= P(\hat{c}_j) \frac{[S_0^2(\lambda_j) - S^2(\hat{c}_j|\lambda_j)]/k_d}{S^2(\hat{c}_j|\lambda_j)/(N-k)} \quad (9)$$

Donde nuevamente $P(c)$ denota la función de penalización y $\hat{c}|\lambda$ es el punto más probable de cambio en la serie de datos.

También se contempla el cálculo de la función de log-probabilidad (Ecuación (10)):

$$l(\hat{c}_j|\lambda_j) = -\frac{N}{2} \log \left[\frac{S^2(\hat{c}_j|\lambda_j)}{N-3} \right] + (\lambda_j - 1) \sum_{i=1}^N \log Y_i \quad (10)$$

Como paso C, se maximiza la función anterior sobre todo $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ para encontrar $\hat{\lambda}$ y $\hat{c}$ tal que, Ecuación (11):

$$l(\hat{c}|\hat{\lambda}) = \max_{1 \leq j \leq J} l(\hat{c}_j|\lambda_j) = l(\hat{c}_m|\lambda_m) \quad (11)$$

Donde m es un entero ajustado entre 1 y J (incluido), ahora $\hat{\lambda} = \lambda_m$ representa la mejor transformación entre todas las pruebas de transformación, así como $\hat{c} = \hat{c}_m$ es el punto de cambio más probable en la serie transformada y la original (Wang et al., 2010). Por último, el paso D define el valor de PF_{max} según la Ecuación (12):

$$PF_{max} = P(\hat{c})F_{\hat{c}} = P(\hat{c}) \frac{[S_0^2(\lambda_m) - S^2(\hat{c}|\lambda_m)]/k_d}{S^2(\hat{c}|\lambda_m)/(N-k)} \quad (12)$$

Donde kd es la diferencia del número de parámetros de la regresión entre la hipótesis nula y la alternativa.

Para después compararlo con su valor critico correspondiente al nivel de significancia determinado y señalar si $\hat{c}$ es un punto de cambio estadísticamente significativo.

Para el caso que se tengan más de un punto de cambio, es decir múltiples puntos de cambio, el proceso se puede definir como el siguiente. Primero se realiza la transformación de datos de la forma mencionada en el paso A y después se utiliza nuevamente el PMFred (Wang, 2008) como en el paso B anterior. Para la serie transformada $\{X_i^j\}$ se tiene $M_c^j \geq 0$ puntos de cambio y $\hat{C}_j = (\hat{c}_1^j, \hat{c}_2^j, \dots, \hat{c}_{M_c^j}^j)$ puntos con significancia estadística; entonces $k_j = N - (2 + M_c^j)$, se calcula también $S^2(\hat{C}_j|\lambda_j)$ que es la suma del cuadrado de los residuos del ajuste de mínimos cuadrado de la serie transformada $\{X_i^j = h(Y_i; \lambda_j)\}$, con todo lo anterior se tiene la siguiente función log-probabilidad, Ecuación (13) (Wang et al., 2010) :

$$l(\hat{C}_j|\lambda_j) = -\frac{N}{2} \log \left[\frac{S^2(\hat{C}_j|\lambda_j)}{N-K_j} \right] + (\lambda_j - 1) \sum_{i=1}^N \log Y_i \quad (13)$$

Como paso 3, la función anterior de log-probabilidad se maximiza sobre $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ para encontrar $\hat{\lambda}$ y $\hat{C}$ tales que, Ecuación (14):

$$l(\hat{C}|\hat{\lambda}) = \max_{1 \leq j \leq J} l(\hat{C}_j|\lambda_j) = l(\hat{C}_m|\lambda_m) \quad (14)$$

Donde m es un entero compuesto entre 1 y J (incluido), $\hat{\lambda} = \lambda_m$ representa la mejor transformación entre todas las transformaciones y $\hat{C} = \hat{C}_m = (\hat{c}_1^m, \hat{c}_2^m, \dots, \hat{c}_{M_c^m}^m)$ son los puntos estadísticamente significativos para la serie transformada y la serie original. Por último, el paso 4, los puntos identificados y su significancia correspondiente a la mejor transformación λ_m , y la mejor serie transformada $\{X_i^m = h(Y_i; \lambda_m)\}$, son guardadas. Estos puntos de cambio, así como la serie original y transformada son analizadas para determinar si estos

puntos artificiales de cambio tienen significancia física y si deben ser ajustados. En el caso de que uno o más puntos identificados se determine como no significativa y se elimine de la lista de puntos de cambio, el mejor valor de λ debe ser encontrado y se debe recalcular la significancia estadística de los puntos de cambio restantes usando la nueva serie transformada con el nuevo valor de λ , este proceso se realiza como se ha especificado anteriormente y se debe repetir hasta que todos los puntos encontrados se determinen que son significativos (Wang et al., 2010).

2.5.2. Método de ajuste de los puntos de cambio

Para realizar el ajuste de la serie de datos ya con los puntos de cambio detectados se utiliza el algoritmo Quantile-matching (QM), que puede utilizarse para datos no negativos como precipitación, velocidades de viento y para datos Gaussianos (después de procesar estos datos). Primero se define la “respuesta promedio del ajuste” de los datos de precipitación no negativos (Wang et al., 2010), Ecuación (15).

$$\hat{Y}_i^m = h^{-1}(\hat{X}_i^m; \hat{\lambda}) = \begin{cases} (\hat{\lambda} \hat{X}_i^m + 1)^{1/\hat{\lambda}} & \hat{\lambda} \neq 0 \\ \exp(\hat{X}_i^m) & \hat{\lambda} = 0 \end{cases} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

De la serie transformada Box-Cox, en el caso de la precipitación, se obtiene la función inversa denotada como $Y_i^{dtr} = h^{-1}(X_i^{tr}; \hat{\lambda})$, el componente $\{Y_i^{tr}\}$ representa el componente de la pendiente monótona del promedio de ajuste en la serie de precipitaciones mayores a cero (en el caso de la temperatura se utiliza la serie original de datos de temperatura máxima y mínima) (Wang et al., 2010). La remoción de la pendiente (únicamente del componente $\hat{Y}_i^m$) de esta serie de datos es la siguiente, Ecuación (16):

$$Y_i^{dtr} = Y_i + Y_{max}^{tr} - Y_i^{tr} \quad (16)$$

Donde $Y_{max}^{tr} = \max_{i=1}^N Y_i^{tr}$ es una constante para evitar valores negativos en la serie sin tendencia. La ecuación antes mencionada (serie sin tendencia) es la utilizada para obtener la función de probabilidad (PDF) para cada segmento de la serie de datos (no se recomienda menos de 30 años de precipitación diaria o 15 años de datos continuos como temperatura diaria para evitar una incertidumbre alta), el cual es usado por estimar los ajustes QM necesarios para hacer la serie homogénea (Wang et al., 2010). Por cada punto de cambio hay dos partes de la serie que pueden usar para estimar dos PDFs, respectivamente, antes y después del cambio, los datos de la serie $\{Y_i^{dtr}\}$ es ordenado ascendentemente y dividido en M_q categorías lo más iguales posibles para estimar los PDFs en M_q frecuencias acumuladas separadas por un incremento de $1/M_q$. Para $l \in \{1, 2, \dots, M_q\}$, se tiene $F(l) = (l - 0.5)/M_q$ que denota la frecuencia media empírica acumulativa (ECF) de las l categorías de datos. También se definen $F(0) = F(1) - 1/M_q$ y $F(M_q + 1) = F(M_q) + 1/M_q$ que son las condiciones de frontera superior e inferior para usar en la interpolación por spline. Se define $P_b(k, l)$ y $P_a(k, l)$ como la media de la l -ésima categoría entre dos segmentos separados por el k -ésimo punto de cambio respectivamente. La diferencia entre la media de la l -ésima categoría entre dos segmentos separados por el k -ésimo punto de cambio se deriva como la Ecuación (17):

$$D(k, l) = P_a(k, l) - P_b(k, l) \quad (1 = 1, 2, \dots, M_q) \quad (17)$$

Note que esta es la categoría promedio de la posición del $(k + 1)$ -ésimo segmento menos el del k -ésimo segmento ($K = 1, 2, \dots, M_c$), y el $P_a(k, l) = P_b(k + 1, l)$ si todo el segmento fue escogido para estimar el PDF. Denotamos S_0 como el segmento en el que los otros segmentos serán ajustados (también conocido como el segmento base), por cada segmento $s \in \{1, 2, \dots, (M_c + 1)\}$, la diferencia en la l -ésima categoría promedio entre el s -ésimo y s_0 -ésimo segmento se puede definir como la Ecuación (18):

$$A(s, l) = \begin{cases} \sum_{k=s}^{s_0-1} D(k, l) = \sum_{k=s}^{s_0-1} [P_a(k, l) - P_b(k, l)] & \text{if } s < s_0 \\ 0 & \text{if } s = s_0 \\ \sum_{k=s_0}^{s-1} [-D(k, l)] = \sum_{k=s_0}^{s-1} [-P_a(k, l) + P_b(k, l)] & \text{if } s > s_0 \end{cases} \quad (18)$$

Además, definiendo el límite inferior como $A(s, 0) = 0$ para datos positivos, pero $A(s, 0) = A(s, 1)$ para datos Gaussianos, también, el límite superior definido como $A(s, M_q + 1) = A(s, M_q)$ (estas condiciones de frontera mantienen el menor y mayor $(50/M_q)\%$ de datos delimitados y que no se alejen mucho de la media del ajuste QM para la categoría respectiva). Entonces por cada segmento s , hay $(M_q + 2)$ puntos de datos, $(F(l), A(s, l))$ para $l = 0, 1, \dots, M_q + 1$. Del ajuste por spline, el método QM homogenizara la serie $\{Y_i\}$ de la siguiente manera: se define $\mathcal{F}_s(i)$ como el ECF del i -ésimo datum en segmentos s de la serie $\{Y_i^{dtr}\}$. Del spline ajustado por segmentos s , podemos identificar la diferencia de intersección que corresponde a la frecuencia acumulada de $\mathcal{F}_s(i)$. Esta diferencia, $\mathcal{A}(s, i)$ es la cantidad que será añadida al i -ésimo datum en el segmento s de la serie $\{Y_i\}$ para ajustarlo al segmento s_0 . Esta interpolación spline es llevada a cabo para cada valor en el segmento que es necesario ajustar (excepto el segmento base). Las diferencias resultantes $\mathcal{A}(s, i)$ para $i = 1, 2, \dots, N$ son referidos como el ajuste QM por segmento s . De manera similar, los valores no negativos pueden aparecer en las cantidades de precipitación ajustada usando este ajuste QM. Nuevamente, estos valores no positivos son reemplazados con la cantidad mínima de precipitación medida (o el valor más pequeño en la serie positiva original, en general) (Wang et al., 2010).

Si existiera una discontinuidad en la frecuencia de mediciones de una variable no continua (como precipitación o velocidad del aire), se debe ser muy cuidadoso al usar un algoritmo QM. Se deben manejar estas discontinuidades en las frecuencias antes de estimar y aplicar cualquier ajuste QM, de otra forma, el ajuste puede resultar muy sesgado por las discontinuidades en la frecuencia y causar problemas, alejando los datos de la realidad (Wang et al., 2010).

2.6. Índices de cambio climático

2.6.1. ETCCDI

En la necesidad de la medición objetiva y la caracterización de la variabilidad climática y su cambio, el Equipo de Expertos en Cambio Climático y Detección (ETCCDI) propuso coordinación internacional y ayuda en la organización de la detección de cambio climático mediante índices. Para realizar esto, desarrollaron un conjunto de herramientas que incluyen software, documentación y otros materiales para el cálculo de índices de detección de cambio climático y la homogenización de los datos climáticos (Pacifclimate.org, 2020). En el año 2018, en su sesión número 17, la Organización Mundial Meteorológica en su Comisión para Climatología, decidió descontinuar las actividades del ETCCDI, el responsable de los aspectos operacionales de las herramientas de software para el sector de índices de cambio climático sería el ET-SCI (CCI Expert Team on Sector-specific Climate Indices) (WCRP, 2023).

El grupo de expertos considero un total de 27 índices, basados en valores de temperatura y/o precipitación diaria. Algunos de estos índices están basados en umbrales fijos relevantes para ciertas aplicaciones. Otros índices están basados en umbrales que varían de lugar en lugar, usualmente definidos como un percentil de la serie de datos (ejemplo: 90 y 10 %). El cálculo de estos índices puede realizarse mediante los programas proporcionados por el ETCCDI (Pacifclimate.org, 2020). Los índices pueden observarse en Cuadro 1.

Cuadro 1. Lista de los 27 índices del ETCCDI, descripción y unidades.

ID	Nombre del Indicador	Definición	UNIDAD
FD0	Días de heladas	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) $< 0^{\circ}\text{C}$	Días

SU25	Días de verano	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) >25°C	Días
ID0	Días de hielo	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) <0°C	Días
TR20	Noches tropicales	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) >20°C	Días
GSL	Duración de la estación de cultivo	Anual (1st Ene a 31st Dic en HN, 1st Julio a 30th Junio en HS) cuenta entre el primer periodo de por lo menos 6 días con TG>5°C y primer periodo después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG<5°C	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	Días
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	Días

TN90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	Días
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	Días
WSDI	Indicador de la duración de periodos calientes	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX>90th percentil	Días
CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
DTR	Rango diurno de temperatura	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
RX1day	Cantidad Máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
Rx5day	Cantidad Máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP>=1.0mm) en un año	mm/día
R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP>=10mm	Días

R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que $PRCP \geq 20\text{mm}$	Días
Rnn	Número de días sobre nn mm	Número de días en un año en que $PRCP \geq nn\text{ mm}$, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR < 1\text{mm}$	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con $RR \geq 1\text{mm}$	Días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	Mm
R99p	Días extremadamente secos	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación anual total en los días húmedos ($RR \geq 1\text{mm}$)	mm

Fuente: (Zhang et al., 2018)

2.6.2. Cálculo de los indicadores del ETCCDI

Entre los programas desarrollados por el ETCCDI, para el cálculo de los 27 índices de cambio climático se encuentra el RClmDex (RClmDex_extraqc en la realización de esta investigación); para la homogenización de datos diarios de temperatura máxima y mínima se utiliza el RHtests (RHtests_V4 en la realización de esta investigación) y el RHtests_dlyPRCP para datos diarios de precipitación,

estos programas se pueden encontrar en Pacifclimate.org (2020). El RHtestsV4 es utilizado para detectar y ajustar múltiples puntos de cambio que puedan tenerse en la serie de datos de temperatura que puedan contener errores autorregresivos de primer orden utilizando el método de detección PMTF y el ajuste QM antes descrito. Las series de tiempo analizadas con estos programas conforman las series de referencia para el cálculo de índices con RClimDex. Ambos programas, así como el RClimDex se encuentran programados en el lenguaje R y pueden correr en Microsoft Windows y Unix/Linux (Pacifclimate.org, 2020). Mas información relacionada a los programas, así como sus respectivos manuales de uso, es posible consultar la siguiente página: <http://etccdi.pacifclimate.org/software.shtml>.

2.7. Regresión por mínimos cuadrados

Al calcular los índices con el RClimDex para cada año o mes del periodo de estudio, el programa realiza también un ajuste lineal por mínimos cuadrados y una regresión lineal ponderada localmente por índice, el primer ajuste con una línea sólida y el segundo ajuste con una línea cortada, estos ajustes se presentan en gráficas que proporciona el RClimDex y sus correspondientes estadísticos en imágenes en formato JPEG (Zhang & Yang, 2004).

El ajuste por mínimos cuadrados consiste en encontrar una línea que, de todas las líneas que pueden pasar por los puntos de las observaciones o datos, solo una línea es la que minimiza el SSE (la suma de errores al cuadrado). Estos errores de predicción o desviaciones, es decir, las diferencias entre los valores observados y los valores predichos pueden verse como las distancias verticales de los datos observados y la recta de ajuste (valores predichos). Es importante saber que la suma de errores o desviaciones es igual a 0 (McClave & Sincich, 2018).

La línea de menor SSE es llamada línea de mínimos cuadrados, regresión lineal o la ecuación de predicción de mínimos cuadrados. La metodología de uso es

llamada el método de mínimos cuadrados y es el siguiente: asumiendo que se tiene una muestra con n datos que consisten en pares de datos de valores de x y y como $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, la línea de ajuste puede escribirse como la Ecuación (19) (McClave & Sincich, 2018):

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (19)$$

Donde los “gorros” indican que los símbolos debajo son estimados: $\hat{y}$ (y -gorro) es un estimador del valor medio de y , $E(y)$, y es un predictor de valores futuros de y y $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ son estimadores de β_0 y β_1 , respectivamente (McClave & Sincich, 2018).

Para cada punto dado (x_1, y_1) se tiene la Ecuación (20) de predicción:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \quad (20)$$

La desviación en el i -ésimo valor de y de su valor predicho es (Ecuación (21))

$$(y_i - \hat{y}_i) = [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)] \quad (21)$$

Entonces la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores de y con relación a sus valores predichos para todos los n datos es la Ecuación (22) (McClave & Sincich, 2018):

$$SSE = \sum [y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i)]^2 \quad (22)$$

Las cantidades $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ que hacen el SSE mínimo son llamados estimadores de mínimos cuadrados de los parámetros de la población β_0 y β_1 y la ecuación $\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$ es llamada la línea de mínimos cuadrados. Los valores de $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ que minimizan SSE están dadas por las Ecuaciones (23, 24, 25, 26) (McClave & Sincich, 2018).

$$\text{Pendiente: } \hat{\beta}_1 = \frac{SS_{xy}}{SS_{xx}} \quad (23)$$

$$y \text{ de intercepción: } \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (24)$$

Donde:

$$SS_{xy} = \sum (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n} \quad (25)$$

$$SS_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad (26)$$

Hay que recordar que n es el tamaño de la muestra.

2.8. Regresión local ponderada

Considere el modelo de regresión de la Ecuación (27):

$$y = f(x) + \epsilon \quad (27)$$

En el cual $f(\cdot)$ es conocido por ser una estructura altamente no lineal, pero de estructura conocida. Una propuesta no paramétrica para este caso es el de la regresión lineal local. La idea de este método es que si $f(\cdot)$ sea suficientemente suave, entonces el modelo lucirá lineal en pequeñas regiones del espacio de entrada. Suponiendo que consideramos puntos en el espacio de entrada cercano a x_0 , entonces el modelo luce como la Ecuación (28) (Aswani, 2017).

$$y = \beta_0[x_0] + \sum_{j=1}^p \beta_j[x_0] \cdot (x^j - x_0^j) + \epsilon \quad (28)$$

Para x cerca de x_0 (por ejemplo, $\|x - x_0\| \leq h$ para pequeños $h > 0$). Y los paréntesis cuadrados $[x_0]$ son usados para representar el hecho de que el valor de β variara para diferentes valores de x_0 (Aswani, 2017).

La idea de vecindario para el radio de radio h es central a la regresión lineal local. Comúnmente a h se le conoce como la ventana de valores. En este método, seleccionamos puntos dentro del radio de h desde x_0 . Además, necesitamos ponderar los puntos acordeamente de forma que los puntos cercanos a x_0 son

dados mas peso que los mas alejados de x_0 . Para hacer esto, definimos una función kernel $K(u): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ el cual tiene las siguientes propiedades (Aswani, 2017).

- 1.- Soporte finito – $K(u) = 0$ para $|u| \geq 1$;
- 2.- Simetría - $K(u) = K(-u)$;
- 3.- Valores positivos - $K(u) > 0$ para $|u| < 1$

La forma particular del kernel no llega a ser tan importante de la ventana de valores de h . Si se escoge un alto valor de h , entonces la suposición local lineal no es precisa. Por otro lado, si se escoge un valor muy pequeño de h , el estimado no será preciso debido a que únicamente unos cuantos valores serán considerados. La estimación de la regresión local ponderada estima $\hat{\beta}_0[x_0]$, dado de minimizar la siguiente Ecuación (29) (Aswani, 2017).

$$\begin{bmatrix} \hat{\beta}_0[x_0] \\ \hat{\beta}[x_0] \end{bmatrix} = \underset{\beta_0, \beta}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n K(\|x_i - x_0\|/h) \cdot (y_i - \beta_0 - (x_i - x_0)' \beta)^2 \quad (29)$$

2.9. Control de calidad de datos

El RClimDex realiza un control de calidad de datos, proporcionando un conjunto de archivos con los potenciales errores y que pueden revisarse para hacer un juicio de su posible viabilidad, esta revisión es importante ya que no se quieren descontar valores extremos genuinos que puedan tener un efecto significativo en los índices y las tendencias de los resultados de los datos, eliminando únicamente los valores que tenemos certeza que son incorrectos (McSweeney & Caesar, 2011).

El programa cuenta con dos controles de calidad de datos, el control de calidad básico y el control de calidad extra o EXTRAQC, el control de calidad básico permite remplazar los datos faltantes por un código conocido por el programa, en

este caso -99.9, establecer valores no razonables como NA, también identificar cantidades de precipitación diarias menores que cero y coherencia entre un máximo y mínimo de temperatura ($T_{max} > T_{min}$), se identifican outliers en datos diarios que se encuentran fuera de un rango (comúnmente se escoge la media $\pm$ 4, 3.5 y 3 desviaciones típicas, en el caso de esta investigación se seleccionó 3 desviaciones) para señalar los datos problemáticos, para finalmente dejar al usuario decidir si dejar, modificar o eliminar el dato (Zhang & Yang, 2004).

El control de calidad extra o EXTRAQC es una rutina que permite aplicar pruebas como el control de datos duplicados, evaluación de problemas de redondeo, valores fuera de rango, valores fuera de un umbral fijo, outliers basados en un rango de excedencia, etc (Aguilar & Prohom, 2013). El EXTRAQC produce salidas numéricas y gráficas al igual que el control de calidad básico. Después de realizar ese proceso de control de datos, se re realiza el proceso de homogenización de datos y el calculo de los índices antes descrito para su posterior análisis.

2.10. Literatura citada

- Aguilar, E., & Prohom, M. (2013). EXTRAQC quality control software. Universitat Rovira i Virgili de Tarragona, Spain, Servei Meteorològic de Catalunya, Barcelona. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
- Aragón Hernández, J. L., Aguilar Martínez, G. A., Velázquez Ríos, U., Jiménez Magaña, M. R., & Maya Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 20(2), 1–15. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Aswani, A. (2017). Local Linear Regression. Berkeley; IEOR 265- Lecture 6. https://aswani.ieor.berkeley.edu/teaching/SP17/265/lecture_notes/ieor265_lec6.pdf
- DRI. (2023). Climate Engine. DRI. <https://www.dri.edu/project/climate-engine/>
- ESRI. (2023). Cómo funciona la interpolación de distancia inversa ponderada—ArcGIS Pro | Documentación. ESRI. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm>

- Ghil, M., & Lucarini, V. (2020). The physics of climate variability and climate change. *Reviews of Modern Physics*, 92(3), 035002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.035002>
- Huntington, J. L., Hegewisch, K. C., Daudert, B., Morton, C. G., Abatzoglou, J. T., McEvoy, D. J., & Erickson, T. (2017). Climate Engine: Cloud Computing and Visualization of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2397–2410. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00324.1>
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe, Eds.; 1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- IPCC. (2018). Glossary of Terms. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/wg2TARannexB.pdf>
- IPCC. (2023). Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. (First, pp. 35–115). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- McClave, J., & Sincich, T. (2018). *Statistics (Thirteenth Edition)*. Pearson.
- McSweeney, C., & Caesar, J. (2011). Additional Guidance on Quality Control and Homogeneity Testing for the assessment for calculation of Extremes Indices with RCLimDex. Hadley, UK. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
- NASA. (2023). What Is Climate Change? Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/what-is-climate-change>
- ONU. (2023). What Is Climate Change? United Nations; United Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>
- OPS. (2023). Cambio Climático y Salud—OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud. Cambio climático y salud. <https://www.paho.org/es/temas/cambio-climatico-salud>
- Pacificclimate.org. (2020). ETCCDI Climate Change Indices. ETCCDI Climate Change Indices. <http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>
- SMN. (2023). Información Estadística Climatológica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Wang, X. L. (2008). Penalized Maximal F Test for Detecting Undocumented Mean Shift without Trend Change. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3), 368–384. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA982.1>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y., & Pu, Q. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), 2416–2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>

- WCRP. (2023). About ETCCDI. World Climate Research Programme.
<https://www.wcrp-climate.org/etccdi>
- WHO. (2021, octubre 30). Cambio climático y salud. World Health Organization.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhang, X., Feng, Y., & Chan, R. (2018). Introduction to RClimDex v1.9. Climate Research Division, Downsview, Ontario, Canada.
<https://github.com/ECCC-CDAS/RClimDex/blob/master/inst/doc/manual.pdf>
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). RClimDex(1.0) User Manual. Environment Canada.
<https://acmad.net/rcc/procedure/RClimDexUserManual.pdf>

3. Tendencias de temperatura y precipitación por cambio climático en la cuenca del Río Huixtla, Chiapas 2 3

Ricardo Álvarez-López¹, Laura Alicia Ibáñez-Castillo^{2*}, Mario Alberto Vázquez-Peña², Agustín Ruíz-García³ 4 5

¹ Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 36.5, Chapingo, Estado de México, México. C.P. 56230. 6 7

² Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 36.5, Chapingo, Estado de México, México. C.P. 56230. 8 9

³ Universidad Autónoma Chapingo. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 36.5, Chapingo, Estado de México, México. C.P. 56230. 10 11

*Autor para correspondencia: libacas@gmail.com 12

3.1. Resumen 13

Ante la necesidad de obtener información de las tendencias de la temperatura y precipitación cuenca del Río Huixtla en la Costa del Pacífico Mexicano, del estado de Chiapas se analizaron tendencias para el periodo 1960-2014. Se obtuvieron los 27 índices del ETCCDI para esta zona de estudio. Se obtuvieron datos de temperaturas máxima y mínima y precipitación de las estaciones siguientes: Despoblado, Escuintla, Finca Chicharras, Huehuetán, Huixtla y Motozintla (SMN) del Sistema Meteorológico Nacional. Se generaron datos faltantes de lluvia con el método del U.S. National Wheeler Service y de temperaturas con la plataforma ClimateEngine.org. Se evaluó la homogeneidad de las series y el ajuste mediante cuantiles QM en caso de ser necesario con el RHtest V4 para la temperatura y RHtest_flyPrp para la precipitación. La obtención de los índices se realizó con el RCLimDex realizando los controles de calidad de datos que propone. Los índices obtenidos se clasificaron en base a su significancia estadística (pvalue<0.05) y su tendencia de aumento o decremento. Entre los cambios encontrados, se detectaron temperaturas más altas en la parte media y baja al oeste de la cuenca (TX90p), así como un periodo de días calurosos más largo (WSDI); en la parte alta y baja al este de la cuenca presentan un periodo de días calurosos más corto. La parte alta y baja de la cuenca presenta tendencia de enfriamiento, días más fríos (TX10p) y en periodos más largos (CSDI). En toda la cuenca ha aumentado la precipitación en uno y cinco días (RX1day y RX5day) así como en la cantidad total (PRCPTOT), se tiene periodos secos (CDD) de menor duración y periodos húmedos más largos (CWD). Las precipitaciones por encima de los umbrales R5mm, R10mm, R20mm, R70mm y R150mm en toda la cuenca muestran tendencia de aumento. 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34

Citation: Apellido-Apellido NN, Apellido-Apellido NN, Apellido-Apellido N, Apellido-Apellido N. 2023. Título del artículo. Agrociencia <https://doi.org/10.47163/xxx>

Editor in Chief:
Dr. Fernando C. Gómez-Merino

Received: month, year.
Approved: month, year.
Published in Agrociencia #: #-#. 2023.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non- Commercial 4.0 International license.



Los autores no deben realizar ningún cambio en este apartado.

Palabras clave: índices, Río Huixtla, temperatura, precipitación, RClimDex, clima Costa de Chiapas.

3.2. Introducción

El cambio climático es mencionado por la Organización Mundial Meteorológica (WMO, 2022) como una variación estadísticamente significativa del estado promedio climático o de su variabilidad, de forma continua en un periodo de tiempo largo, comprendiendo décadas o más. En esto, el Panel intergubernamental de Cambio Climático o IPCC (2014) menciona a la detección como el abordar la pregunta de si el clima o un sistema, natural o humano, afectado por el clima tiene realmente un cambio de forma estadística. De la misma forma, menciona que las causas de los cambios observados en el sistema climático, de un sistema natural o humano impactado por el clima, son establecidos siguiendo un conjunto de métodos consistentes (IPCC, 2014).

El IPCC (2023) en su sexto reporte de síntesis, menciona algunos ejemplos de riesgos claves en diferentes regiones, con un nivel de confianza medio, en la región de Centro América y Sudamérica, el riesgo a la seguridad del agua, afectaciones severas a la salud, degradación de los arrecifes de coral, riesgo en la seguridad alimentaria por sequías extremas y daños a estructuras por inundaciones, deslizamientos, incremento del nivel del mar, etc. El IPCC (2023), también menciona que obstáculos sistémicos como las lagunas en la financiación, los conocimientos y las prácticas, incluida la falta de conocimientos y datos sobre el clima, dificultan el progreso de la adaptación.

En un intento de responder preguntas sobre los valores extremos del clima que afectan a los sistemas humanos y naturales, se usan los índices que intentan extraer información a partir de datos diarios, de las observaciones meteorológicas y de forma objetiva (Zhang et al., 2011). Mas conocidos como los índices del ETCCDI, definidos por Frich et al. (2002), son un conjunto de índices basados en los índices del European Climate Assessment (ECA) (Klein Tank et al., 2002) para analizar tendencias para la segunda mitad del siglo 20. En total se definieron 27 índices.

En México se han utilizado los índices del ETCCDI en diversos estudios, tanto de temperatura como precipitación, entre ellos se puede mencionar el realizado por Ortiz-Gómez et al. (2020), dónde calculó 10 índices de precipitación para el estado de Zacatecas en el periodo 1961-2014. Otro trabajo realizado es el desarrollado por Ruiz-Alvarez et al. (2020), donde obtuvo 11 índices relacionados a precipitación para todo el estado de Aguascalientes en el periodo 1980-2013. Otro ejemplo es el trabajo desarrollado por Colorado-Ruiz & Cavazos, (2021), centrado en 15 índices de frecuencia e intensidad de precipitación, de los cuales 8 son parte de la lista propuesta por el ETCCDI, para evaluar

tendencias extremas y no extremas de precipitación diaria para México y el sur de los Estados Unidos de 1981 a 2010, utilizando diferentes fuentes de datos como observaciones, reanálisis, Modelos Climáticos Regionales y Modelos de Circulación General.

Entre las investigaciones realizadas en el estado de Chiapas, México, referentes al uso de los índices para la detección de tendencias de cambio climático, podemos mencionar los trabajos realizados por de la Mora Orozco et al. (2016), donde analizó 16 estaciones distribuidas en el estado de Chiapas en el periodo de 1960 a 2009 para 8 indicadores basados en temperaturas máximas, mínimas y precipitación. De igual forma, Figueroa Gallegos (2016) realizó una investigación en dos estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca del Río Sabinal, Chiapas; del mismo autor (Figueroa Gallegos, 2017), se tiene una nota técnica publicada sobre índices de cambio climático en la Cuenca del Río Grande, Chiapas, pero cabe mencionar que esta nota técnica tiene una Discusión realizada por Mundo-Molina (2019) donde refuta los resultados, apartados metodológicos y conclusiones realizadas del estudio, por lo que imposibilita la consideración de esta nota técnica como material científico relevante realizado en Chiapas. Es necesario realizar más investigación relacionada a los cambios en temperatura y precipitación en el estado de Chiapas. Por lo tanto, ante la necesidad de determinar los cambios en los extremos climáticos, este estudio tiene como objetivo obtener los índices de cambio climático del ETCCDI relacionados a temperatura y precipitación para la cuenca del Río Huixtla ubicada en el estado de Chiapas y analizar el comportamiento de la tendencia de temperatura y precipitación. Estudiar el cambio climático en Chiapas resulta importante para la población y para la agricultura, tal como el café que es muy sensible a cambios de temperatura y comportamiento de la lluvia, ya que se pueden descontrolar algunas enfermedades como la roya del café (Libert-Amico y Paz-Pellat, 2018).

3.3. Materiales y métodos

El área de estudio se encuentra en la Región hidrológica No. 23 Costa de Chiapas, definida por la cuenca del Río Huixtla clasificada como RH23, Chiapas, de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y las estaciones climatológicas 7038 Despoblado, 7053 Escuintla, 7057 Finca Chicharras, 7075 Huehuetán, 7077 Huixtla y 7119 Motozintla (SMN) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el área circundante a estas estaciones (Figura 5). La cuenca del Río Huixtla cuenta con un área de 828.97 km² y presenta una variación brusca de elevaciones que van de cerca de los 0 msnm a por encima de los 1300 msnm (Figura 5). Los climas predominantes en la cuenca en estudio son cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2), cálido húmedo con lluvias en verano (Am), semicálido húmedo con lluvias en verano ((A)C(m)) y templado húmedo con lluvias en verano (C(m)) (Figura 5). De aquí en

adelante a las estaciones se les nombrará únicamente como Despoblado, Escuintla, Chicharras, Huehuetán, Huixtla y Motozintla y a la cuenca en estudio se le referirá como “cuenca” o cuenca del Río Huixtla para facilitar la comprensión y redacción del artículo. Es importante hacer notar que originalmente se pensó en analizar el comportamiento del clima en la cuenca Huixtla, Chiapas, pero al buscar los datos del clima, varias de las estaciones están también en la cuenca del río Huehuetán y unas pocas en la cuenca del río Despoblado (Fig. 5), todas en Chiapas en la región hidrológicas #23, Costa de Chiapas, en el Sureste Mexicano.

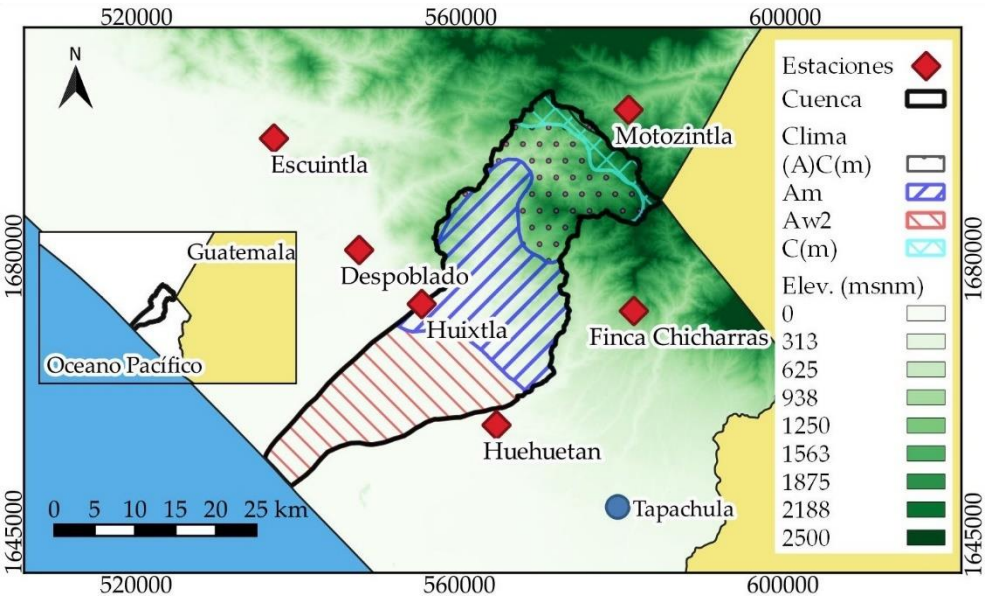


Figura 5. Ubicación de la cuenca en estudio y estaciones meteorológicas analizadas.

Según la cartografía Serie VII de Uso de suelo y Vegetación escala 1:250 000 (INEGI, 2021), los principales usos de suelo y vegetación en la zona son: agricultura de temporal permanente y semipermanente, pastizal cultivado, manglar y tular en la parte media y baja de la cuenca, bosque mesófilo de montaña, vegetación secundaria arbórea y arbustiva de bosque de pino, de pino-encino y encino-pino en la parte alta de la cuenca. La ruta del café de Chiapas pasa por algunos de estas estaciones climatológicas analizadas. Según la carta de Efectos Climáticos Locales escala 1:250 000 (INEGI, 1984), en el periodo de mayo a octubre, el total de precipitación en la mayor parte de la región va de los 1700 a los 3000 mm, teniendo la mayor precipitación en la parte media de la cuenca. En el periodo de noviembre a abril se tienen precipitaciones que van de los 125 mm en la parte baja de la cuenca hasta la salida al mar a 700 mm cercano a la estación Finca Chicharras. Las temperaturas medias máximas van de 21 a 33 °C para el periodo de mayo a octubre y de noviembre a abril. Las temperaturas medias mínimas van de 12 a 21 °C en el periodo de

mayo a octubre y de 9 a 18 °C para el periodo de noviembre a abril, según la cartografía de INEGI antes mencionada.

La selección de estaciones a analizar se realizó en base a la cercanía de la cuenca en estudio y a la longitud de registros de las series históricas de datos. Las estaciones fueron elegidas por contar con una longitud de registros mayor a 30 años y que no tuvieran más de 20% de datos faltantes. Los periodos de análisis se realizaron con respecto al máximo registro de cada estación, definiéndose los periodos siguientes: de 1965-2014 para la estación Despoblado, de 1960 al 2014 para la estación Escuintla, 1961-2013 para la estación Finca Chicharras, de 1965-2014 para la estación Huehuetán, de 1961 al 2014 para la estación Huixtla y del 1960 al 2014 para la estación Motozintla (SMN). No se analizaron años más recientes por lo incompleto de los datos.

Los datos utilizados para realizar la presente investigación se tomaron de las estaciones meteorológicas antes mencionadas. De estas estaciones se extrajeron las series de datos diaria de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación del Servicio Meteorológico Nacional. Estas series de datos presentaron datos faltantes en las tres variables en diferentes días y en diferentes años, para completar estas series de datos se generaron datos faltantes de temperatura máxima y mínima mediante el uso de la plataforma Climate Engine (ClimateEngine.org, 2023) para los datos faltantes de 1980 en adelante para cada estación meteorológica, para los datos faltantes de temperatura máxima y mínima para años anteriores a 1980 se utilizó el método del U.S. National Wheeler Service (WS) (Chow et al., 1996). Para los datos faltantes de precipitación se utilizó el método WS en cada estación para toda la longitud de la serie de datos donde fuera posible utilizar el método. La preparación de datos se realizó según lo recomendado en el manual de usuario del programa RClimDex (Zhang et al., 2018), el cuál fue utilizado también para realizar el control de calidad básico y extra de las series extraídas y el cálculo de los 27 indicadores del ETCCDI (Cuadro 2) de cambio climático en cada estación (Karl et al., 1999), más los parámetros definidos por el usuario (SUnn, FDnn, TRnn, IDnn), haciendo un total de 32 índices.

El control de calidad básico y extra se realizó con el componente incluido en el RClimDex, así como el cálculo de los indicadores de cambio climático (Zhang et al., 2018). El control de calidad consiste en identificar valores inconsistentes con la serie o atípicos, como lo pueden ser cantidades negativas de precipitación, precipitación muy elevada, condición de redondeo y datos repetidos en cierta cantidad de días de forma continua (Jaimes Rodríguez et al., 2022). Se realizó un análisis de homogeneidad con el módulo RHtests V4 (Wang & Feng, 2013a), el cuál realiza una Prueba F de Penalización Máxima para la temperatura máxima y mínima y el módulo RHtests_flyPrp (Wang & Feng, 2013b) para la precipitación, el cuál realiza el algoritmo transPMFred igualmente basado en la Prueba F de Penalización Máxima. Se realizó también el proceso de homogenización en las series de datos con ajuste

por cuantiles (QM) (Wang et al., 2010) en los casos donde las series resultaran no homogéneas.

Cuadro 2. Lista de los 27 índices del ETCCDI, descripción y unidades.

ID	Nombre del Indicador	Definición	UNIDAD
FD0	Días de heladas	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) <0°C	Días
SU25	Días de verano	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) >25°C	Días
ID0	Días de hielo	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) <0°C	Días
TR20	Noches tropicales	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) >20°C	Días
GSL	Duración de la estación de cultivo	Anual (1st Ene a 31st Dic en HN, 1st Julio a 30th Junio en HS) cuenta entre el primer periodo de por lo menos 6 días con TG>5°C y primer periodo después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG<5°C	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	Días
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	Días
TN90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	Días
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	Días
WSDI	Indicador de la duración de periodos calientes	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX>90th percentil	Días
CSDI	Indicador de la duración de periodos fríos	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
DTR	Rango diurno de temperatura	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
RX1day	Cantidad Máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
Rx5day	Cantidad Máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP>=1.0mm) en un año	mm/día

R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP>=10mm	Días
R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que PRCP>=20mm	Días
Rnn	Número de días sobre nn mm	Número de días en un año en que PRCP>=nn mm, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR<1mm	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR>=1mm	Días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	Mm
R99p	Días extremadamente secos	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación anual total en los días húmedos (RR>=1mm)	mm

Fuente: Zhang et al., (2018)

Para determinar el grado de cambio o tendencia en los índices calculados y su significancia estadística, se utilizó el sistema propuesto por Ruiz-García et al. (2021) del uso de signos y colores. Agregando que, en esta tabla (Cuadro 3) se asocia un signo al grado de decremento/incremento (- o +, respectivamente) que va de bajo a muy alto según la pendiente de la recta de ajuste, y un color asignado en caso de presentarse relevancia estadísticamente significativa (Pvalue < 0.05) y dejando sin color a los que no presenten relevancia estadísticamente significativa. Se maneja S/C cuando no se presentan cambios en el índice y ND cuando no se tiene un resultado del índice.

Cuadro 3. Sistema de clasificación de la pendiente de la recta de ajuste y relevancia estadísticamente significativa del índice.

Tendencia	Rango	Signo y color*	Rango	Signo y color*
Bajo	-0.01 a -0.05	-	0.01 a 0.05	+
Moderado	-0.05 a -0.1	--	0.05 a 0.1	++
Alto	-0.1 a -0.5	---	0.01 a 0.5	+++
Muy alto	menor a -0.5	----	mayor a 0.5	++++

*En caso de no tener relevancia estadísticamente significativa se omite el color.

3.4. Resultados y discusión

El resultado del cálculo de los índices se clasifico con el sistema antes descrito, separando los resultados en los índices referentes a la temperatura (Cuadro 4) y los índices referentes a la precipitación (Cuadro 5).

Cuadro 4. Índices referentes a temperatura de las estaciones analizadas.

Índice	Despoblado	Escuintla	Chicharras	Huehuetán	Huixtla	Motozintla
Latitud	15.203	15.331	15.133	15.002	15.141	15.364
Longitud	-92.558	-92.656	-92.242	-92.400	-92.486	-92.248
Elev. (msnm)	63	92	1328	65	40	1260
SU25	-	+++	++++	-	-	----
ID0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TR20	+++	++++	+	---	----	----
FD0	ND	ND	ND	ND	ND	ND
SUnn*	++++	++++	++++	----	----	----
TRnn*	-	++	++	----	--	----
GSL	+	-	+	+	-	-
TXx	+	+	+	--	--	---
TXn	+	+++	+	+	+	---
TNx	-	-	-	--	-	--
TNn	+	+	-	-	+	---
TX10p	--	---	---	++++	++++	++++
TX90p	+++	++++	+++	---	---	---
TN10p	---	-	+++	++++	+++	++++
TN90p	++++	+	-	---	+++	---
WSDI	++++	++++	+++	-	++	---
CSDI	++	+++	++++	++++	++++	++++
DTR	+	++	-	-	-	-

*Las siglas nn se refieren a umbrales de temperatura establecidos por estación, Despoblado, Escuintla, Huehuetán y Huixtla tiene un umbral de 35 °C, las estaciones Chicharras y Motozintla tienen un umbral de 28 °C.

Respecto a los índices relacionados a la temperatura, Escuintla y Despoblado son las estaciones que cuentan con más índices con tendencia de incremento estadísticamente significativo con 7, seguidas de Chicharras con 6 índices. La estación que presenta más índices con tendencia de disminución significativa es Motozintla con 11 índices, seguido de Huehuetán con 7 índices. Por último, Huixtla presenta 5 índices significativos en incremento.

En referencia a los índices de temperatura, para las estaciones Escuintla y Chicharras, se presentan tendencias de aumento alto y muy alto estadísticamente significativo en el índice días de verano (SU25), con una tasa de incremento de 1.43 y 13.07 días década⁻¹ respectivamente, coincidiendo con lo encontrado por de la Mora Orozco et al. (2016) donde se encontró la mayoría de las estaciones con una tendencia de incremento en este índice, pero con marcadas oscilaciones y concordante con lo encontrado por Zarazúa Villaseñor et al. (2014), aunque con incremento ligero y con poco impacto en la Llanuras Costeras del Golfo Sur. Para el índice referente a la frecuencia de días calurosos (TX90p) presenta tendencia de incremento de alto a muy alto significativo de 3.94, 2.33 y 15.01 días década⁻¹ para Despoblado, Chicharras y Escuintla (Figura 6-A). En las estaciones Despoblado, Escuintla (SU35) y Chicharras (SU28), en el índice SUnn, se tiene una tasa de cambio muy alta de 7.20, 31.32 y 5.34 días década⁻¹ respectivamente para las estaciones mencionadas (Figura 5-B) y muy alto a alto de 4.34, 48.09 y 4.09 días década⁻¹ respectivamente para el índice WSDI o duración del periodo caluroso (Figura 6-C). Marcando para estos índices una tendencia de aumento muy alta en la clasificación elaborada. Para estos cuatro indicadores (SU25, TX90p, SUnn y WSDI) en el resto de las estaciones, Huehuetán, Huixtla y Motozintla, se presentan tendencias de disminución de alta a muy alta, especialmente en Motozintla, siendo las mayores en los indicadores SUnn con 46.27, 36.82 y 33.38 días década⁻¹ (Figura 6-B) y TX90p con 3.08, 2.26 y 3.84 días década⁻¹ (Figura 6-A) y en los índices SU25 y WSDI pero con menores tasas de disminución (Figura 6-C). El comportamiento de los días calurosos presenta variabilidad en las estaciones analizadas, mientras en otra región de costa como en las Llanuras costeras del Golfo Sur se presenta una tendencia de aumento más generalizada de acuerdo con Zarazúa Villaseñor et al. (2014). Con esto se puede considerar que la parte media y baja al oeste de la cuenca presenta más días con temperaturas más altas (35 y 28 °C) y en un periodo de días calurosos más largo, mientras la parte alta y baja al este de la cuenca presenta un periodo de días calurosos más corto y con menos días por encima del umbral de 28 °C.

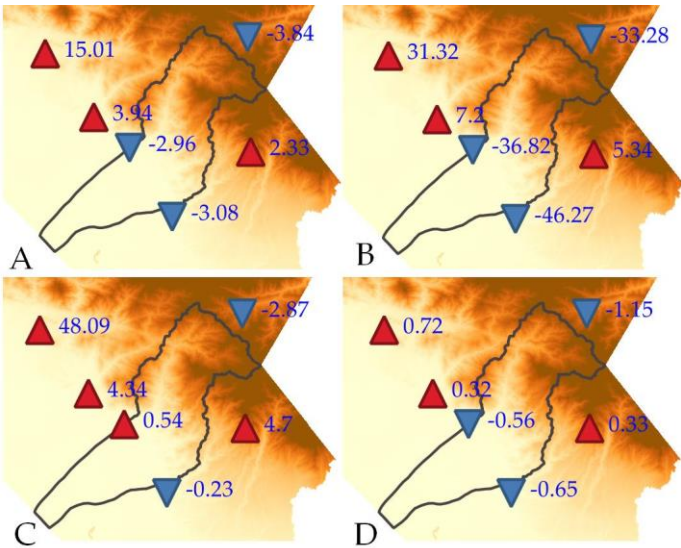


Figura 6. Tendencia y tasa de incremento de los índices: (A) TX90p, (B) SUnn, (C) WSDI y (D) TXx.

En la temperatura máxima extrema (TXx), de la Mora Orozco et al. (2016) encontró una tendencia clara de incremento en el estado de Chiapas (10 de 16 estaciones con incremento), en lo encontrado en esta investigación se tiene una mayor variación, tres estaciones con incremento bajo (Despoblado, Escuintla y Chicharras) y tres estaciones con decremento de moderado a alto (Huehuetán, Huixtla y Motozintla) (Figura 6-D). Esto puede interpretarse como un ligero incremento en la parte centro al oeste de la cuenca en la temperatura máxima extrema y un comportamiento de disminución de la máxima extrema en la parte alta y baja de la cuenca.

Para la frecuencia de días frescos (TX10p) se observa una tendencia de incremento significativo muy alto en las estaciones Huehuetán, Huixtla y Motozintla con razones de cambio de 6.62, 7.00 y 12.02 días década⁻¹, caso contrario a lo encontrado en las estaciones Despoblado, Escuintla y Chicharras que muestran una tendencia de disminución moderada a alta en una tasa de 0.64, 3.37 y 1.50 días década⁻¹, siendo Despoblado la estación cuyo índice TX10p no es significativa. Para el índice TN10p o frecuencia de noches frescas, se presenta un comportamiento similar, las estaciones Huehuetán, Huixtla, Motozintla, además de Chicharras presentan una tendencia de aumento significativo de alto a muy alto (6.51, 2.92, 7.67, 4.67 días década⁻¹ respectivamente), mientras que en las estaciones Despoblado y Escuintla presentan una tendencia de disminución no significativa. Este comportamiento de la frecuencia de noches frescas es contrario a lo encontrado por Zarazúa Villaseñor et al. (2014), donde encontró tendencia de disminución en la mayoría de las estaciones analizadas en la zona de las Llanuras Costeras del Golfo Sur, aunque presentando variaciones entre estaciones cercanas. Para el índice CSDI o duración del

periodo frío, se presenta un comportamiento de aumento muy alto en todas las estaciones, significativa en Chicharras, Huehuetán, Huixtla y Motozintla (9.85, 17.1, 13.92, 12.5 días década⁻¹ respectivamente) y no significativa en Despoblado y Escuintla. Esto va de acuerdo con el comportamiento de la parte alta y baja de la cuenca de enfriamiento, en este caso con más días frescos y en periodos de mayor duración, este último comportamiento de manera más generalizada en la cuenca. En la parte media de la cuenca no se tiene una tendencia clara.

Cuadro 5. Índices referentes a precipitación de las estaciones analizadas.

Índices	Despoblado	Escuintla	Chicharras	Huehuetán	Huixtla	Motozintla
Latitud	15.203	15.331	15.133	15.002	15.141	15.364
Longitud	-92.558	-92.656	-92.242	-92.400	-92.486	-92.248
Elev. (msnm)	63	92	1328	65	40	1260
RX1day	++++	++++	+++	++++	+++	++++
RX5day	++++	++++	++++	++++	++++	++++
SDII	--	-	++	---	-	+
CDD	----	----	+++	----	---	----
CWD	+++	+++	+	++++	+++	+++
R95p	++++	++++	++++	++++	++++	++++
R99p	++++	++++	++++	++++	++++	++++
PRCPTOT	++++	++++	++++	++++	++++	++++
R0.1mm	---	-	----	++++	---	---
R5mm	++++	+++	-	++++	+++	++++
R10mm	++++	+++	+++	++++	+++	++++
R20mm	++++	+++	+++	+++	+++	+++
R70mm	+++	+	+++	+	+	+
R150mm	+	+	+	+	+	+

En el caso de la precipitación (Cuadro 5), la estación con mayores índices de cambio significativos es Despoblado con 12 índices en total, 10 en aumento y dos en disminución. Después se encuentran las estaciones Escuintla y Motozintla, ambas con 10 índices, 9 en aumento y uno en disminución. La estación que menos índices con tendencia significativa presenta es Chicharras con cuatro índices significativos, tres en aumento y uno en disminución.

En los índices RX1day y RX5day se presenta una tendencia general de incremento en todas las estaciones; para RX1day se presentan tasas de incremento significativo muy alto en Despoblado, Escuintla y Motozintla (12.25, 10.73 y 11.03 mm década⁻¹ respectivamente) (Figura 7-A), en el resto de las estaciones se tiene tendencias de incremento muy alto y alto

no significativas. Para RX5day se tiene incrementos significativos muy altos (Figura 7-B),
excepto en Chicharras, en tasas de 35.33, 19.85, 26.69, 15.85 y 19.95 mm década⁻¹ para
Despoblado, Escuintla, Huehuetán, Huixtla y Motozintla respectivamente. De esto se
puede decir que la precipitación máxima en cada mes, en un día y cinco días, ha aumentado
en toda la cuenca, destacando el año 2005 en los meses de septiembre y octubre que cuentan
con altas precipitaciones en la serie de años. Para el índice SDII se tiene únicamente
tendencia de aumento moderada significativa en Chicharras (0.93 mm día⁻¹ década⁻¹) y de
disminución alta significativa en Huehuetán (1.65 mm día⁻¹ década⁻¹).

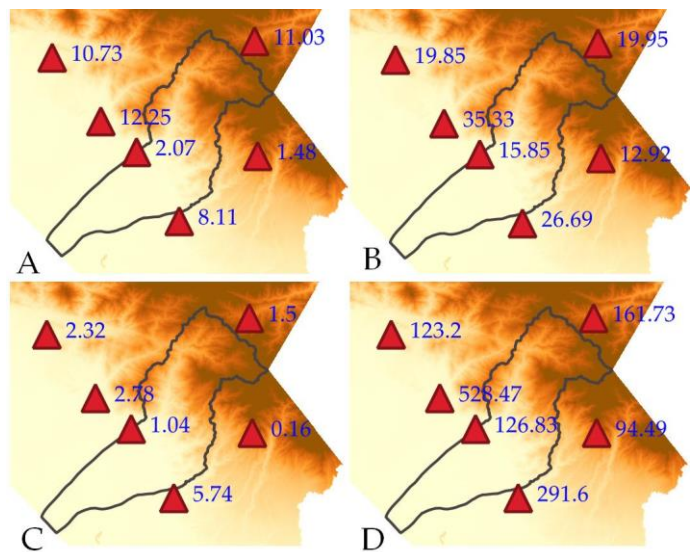


Figura 7. Tendencia y tasa de incremento de los índices (A) RX1day, (B) Rx5day, (C) CWD, (D) PRCPTOT.

Para el índice duración máxima del periodo seco o CDD, se presenta tendencia de
disminución muy alta significativa en la mayoría de las estaciones (4 de 6) con tasas de 19.35
días década⁻¹ en Despoblado, 5.51 días década⁻¹ en Escuintla, 16.99 días década⁻¹ en
Huehuetán y 20.92 días década⁻¹ en Motozintla, lo que indica periodos secos de menor
duración en la cuenca; esto coincide en cierta forma con de la Mora Orozco et al. (2016) ya
que en su estudio encontró una ligera tendencia de disminución en el CDD pero no una
tendencia marcada para todo el estado de Chiapas.

Se tiene comportamiento de aumento alto para el índice referente a la máxima duración del
periodo húmedo o CWD (Figura 7-C), estadísticamente no significativo únicamente en
Chicharras, en el resto de las estaciones se presentan cambios de 2.78 días década⁻¹ en
Despoblado, 2.32 días década⁻¹ en Escuintla, 5.74 días década⁻¹ en Huehuetán, 1.04 días
década⁻¹ y 1.50 días década⁻¹ en Motozintla. En la cuenca no solo se presentan periodos secos
de menor duración, sino también periodos húmedos más largos. Este comportamiento de
incremento es consistente con Wootton et al. (2023) donde encontró que, en promedio, la

longitud del periodo húmedo incrementó en 2.7 ± 13.6 días en la zona de la Sierra Madre de Chiapas para el período 1990-2016, además de un inicio temprano de la temporada húmeda en las zonas de menor elevación.

En los índices R95p y R99p se observa una tendencia generalizada de aumento muy alto en ambos índices, para el R95p se tiene tasas de aumento de gran magnitud en las estaciones, significativo de 112.04 mm década⁻¹ en Despoblado, de 62.59 mm década⁻¹ en Escuintla, 106.70 por ciento década⁻¹ en Chicharras y 55.24 por ciento década⁻¹ en Motozintla, no significativo en Huehuetán y Huixtla. Para el R99p se presentan tasas menores que en R95p pero aun bastante altas, significativo en razón de 41.2 mm década⁻¹ en Despoblado, 44.75 mm década⁻¹ en Escuintla y 19.47 mm década⁻¹ en Motozintla, en las estaciones Chicharras, Huehuetán y Huixtla es no significativa.

En todas las estaciones analizadas se observa una tendencia de incremento muy alta para el índice de precipitación total de los días húmedos o PRCPTOT (Figura 7-D), no significativa en la estación Chicharras, pero de incremento a una tasa muy alta de 94.49 mm década⁻¹, en el resto de las estaciones se tiene incrementos estadísticamente significativos en razón de 528.47 mm década⁻¹ en Despoblado, 123.2 mm década⁻¹ en Escuintla, 291.6 mm década en Huehuetán, por mencionar un ejemplo. Este comportamiento de incremento en la cantidad de precipitación coincide con lo encontrado por Wootton et al. (2023) en su análisis de tendencias, donde en la zona costera (donde se encuentra el área de estudio) encontró incrementos en la precipitación de junio y septiembre, además de en los inicios de la Sierra Madre por debajo de los 1000 m (parte alta de la cuenca) con valores de cambio mensuales que oscilaron entre de 110 a 650 mm. Por lo que se puede decir que la precipitación total anual de los días húmedos ha aumentado en toda la cuenca a una tasa muy alta, sobre todo en la zona cercana a la costa.

Para el total anual de días con un umbral de precipitación definida (Rnnmm) en las precipitaciones 0.1 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 70 mm, 150 mm se tiene lo siguiente: para R0.1mm en el total de estaciones no se presenta una tendencia clara general de incremento o disminución, para R5mm se puede observar una tendencia de incremento en la mayoría de las estaciones de muy alto a alto (5 de 6 estaciones, no significativo en una estación), teniendo la mayor tasa de aumento en Despoblado con 17.72 días década⁻¹ (Figura 8-A). En R10mm (Figura 8-B) y R20mm (Figura 8-C) se tiene un comportamiento similar de incremento significativo que va de muy alto a alto, con la mayor tasa más nuevamente en Despoblado con 14.10 días década⁻¹. Para el índice R70mm se tiene una tendencia de incremento de bajo a alto en tres estaciones de manera significativa, pero con una tasa de cambio menor a los índices Rnnmm de precipitaciones menores, las estaciones Despoblado con 1.23 días década⁻¹ y Motozintla con 0.11 días década⁻¹ tienen la tasa mayor y menor respectivamente (Figura 8-D). Por último, en el índice R150mm se tiene una tendencia de

incremento menor al R70mm, en este caso, únicamente se presenta tendencia estadísticamente significativa baja en Escuintla con 0.20 días década⁻¹.

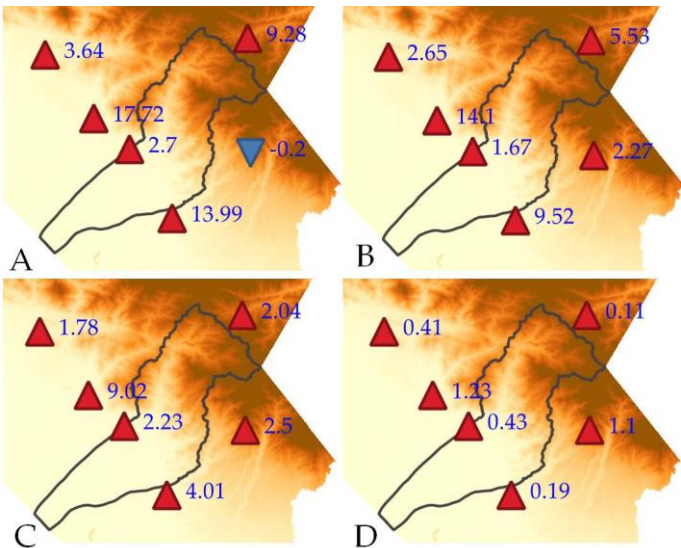


Figura 8. Tendencia y tasas de cambio de los índices Rnnmm con umbrales de precipitación (A) R5mm, (B) R10mm, (C) R20mm y (D) R70mm

Del comportamiento de los índices Rnnmm se puede mencionar que en la cuenca se presenta una tendencia general de incremento que va de muy alto a alto en la ocurrencia de precipitaciones por encima de los umbrales definidos; la tasa de cambio de estos índices va descendiendo al analizar precipitaciones de mayor magnitud, hasta tener la tasa de cambio menor en R150mm, esto coincide con la ocurrencia de cada evento (0.1 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 70 mm, 150 mm) de precipitación durante un año.

3.5. Conclusiones

El cálculo de los índices del ETCCDI permitió definir las tendencias de temperatura y precipitación en la cuenca del Río Huixtla en el período comprendido de la década de 1960 al año 2014. Se encontró relevancia estadística en algunos de los índices calculados en cada estación. La temperatura ha cambiado en el período analizado, los cambios se ven reflejados en índices de umbrales de temperatura de 35 y 28 °C de temperatura máxima diaria (SU_{nn}) según la estación, presentando incremento en la mitad de las estaciones y decremento en la mitad restante de estaciones. Comportamiento similar se observa en los índices de percentiles de temperatura máxima diaria al 90 y 10 por ciento (TX_{90p} y TX_{10p}), temperatura mínima diaria (TN_{10p}) y en la duración del periodo frío (CSDI), las estaciones

que muestran incremento responden a un comportamiento de calentamiento y las que registran decremento a un comportamiento de enfriamiento. La temperatura máxima extrema (TXx) no muestra un patrón claro al presentar también tres estaciones con incremento bajo y tres estaciones con disminución moderada, no coincidiendo con otros autores. La precipitación también ha cambiado en la cuenca del Río Huixtla, la mayoría de los índices muestran tendencia de aumento, resaltan los relacionados a cantidades de precipitación diaria (RX1day), en 5 días (RX5day) y el total anual de los días húmedos (PRCPTOT), este último mostrando tasas de aumento de aproximadamente 500 mm década⁻¹ en Despoblado, es decir que llueve más en cantidad sobre la cuenca y en una tasa de incremento bastante alta, así como en un periodo húmedo más largo (CWD). Este incremento en la cantidad de precipitación no se ve distribuida equitativamente en los días húmedos ya que el índice simple de precipitación diaria no muestra un patrón de incremento; más bien se concentra en precipitaciones diarias mayores a 5, 10, 20 y 70 mm (Rnnmm) que muestran tendencia de aumento entre moderado a alto sobre la cuenca, esto es de relevancia, sobre todo las lluvias mayores a 20 y 70 mm consideradas como lluvias fuertes e intensas que pueden considerarse de riesgo a la población.

3.6. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por la beca otorgada para la realización de este artículo en la Universidad Autónoma Chapingo.

3.7. Referencias

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. 1996. Hidrología Aplicada. McGraw-Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 580 p.

ClimateEngine.org. 2023. Desert Research Institute, The University of California Merced, US Bureau of Land Management, Google Earth Engine, NOAA's National Integrated Drought Information System. ClimateEngine.Org. <https://www.climateengine.org> (Recuperado: mayo de 2023).

Colorado-Ruiz, G., & Cavazos, T. 2021. Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. International Journal of Climatology, 41(11), 5406-5430. <https://doi.org/10.1002/joc.7225>

de la Mora Orozco, C., Ruíz Corral, J. A., Flores López, H. E., Zarazúa Villaseñor, P., Ramírez Ojeda, G., Medina García, G., Rodríguez Moreno, V. M., & Chavéz Durán, Á. A. 2016. Índices de cambio climático en el estado de Chiapas, México, en el periodo 1960-

2009. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Pub. Esp.(13), 2523-2534. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe13/2007-0934-remexca-7-spe13-2523.pdf>
- Figueroa Gallegos, J. A. 2016. Índices de cambio climático en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, México. *Aqua-LAC*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2016-v8-2-04>
- Figueroa Gallegos, J. A. 2017. Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(6), Article 6. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-10>
- Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., & Peterson, T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193-212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1984. Conjunto de datos vectoriales del Continuo Nacional [Map]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/> (Recuperado: junio 2023).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2021. Conjunto de datos vectoriales del uso de suelo y vegetación [Map]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html> (Recuperado: junio 2023).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report (Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p. 151)*. Core Writing Team, R.K Pachauri and L.A. Meyer (eds.). https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf (Recuperado: agosto 2023).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. (First, pp. 35-115). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647> (Recuperado: agosto 2023).
- Jaimes Rodríguez, J., Ibáñez Castillo, L. A., Arévalo Galarza, G. A., Vázquez Peña, M. A., & Monterroso Rivas, A. I. 2022. Tendencias en la precipitación diaria de la cuenca alta Laja-Peñuelitas, Guanajuato | *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1263-1274. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2919>
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. 1999. Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 42(1), 3-7. <https://doi.org/10.1023/A:1005491526870>

- Klein Tank, A. M. G., Wijngaard, J. B., Können, G. P., Böhm, R., Demarée, G., Gocheva, A., Mileta, M., Pashiardis, S., Hejkrlik, L., Kern-Hansen, C., Heino, R., Bessemoulin, P., Müller-Westermeier, G., Tzanakou, M., Szalai, S., Pálsdóttir, T., Fitzgerald, D., Rubin, S., Capaldo, M., ... Petrovic, P. 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22(12), 1441-1453. <https://doi.org/10.1002/joc.773>
- Libert-Amico A., Paz-Pellat Fernando. 2018. Del papel a la acción en la mitigación y adaptación al cambio climático: la roya del cafeto en Chiapas. *Madera y Bosques*. Vol. 24, # especial. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401914>.
- Mundo-Molina, M. D. 2019. Discusión a la nota técnica “Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México” de José Alonso Figueroa-Gallegos, 8(6), noviembre-diciembre 2017, 137-143. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-06-D1>
- Ortiz-Gómez, R., Muro-Hernández, L. J., & Flowers-Cano, R. S. 2020. Assessment of extreme precipitation through climate change indices in Zacatecas, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 141(3), 1541-1557. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03293-2>
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. 2020. Observed trends in daily extreme precipitation indices in Aguascalientes, Mexico. *Meteorological Applications*, 27(1), e1838. <https://doi.org/10.1002/met.1838>
- Ruiz-García, P., Conde-Álvarez, C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. 2021. Projections of Local Knowledge-Based Adaptation Strategies of Mexican Coffee Farmers. *Climate*, 9(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/cli9040060>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y., & Pu, Q. 2010. New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Wang, X. L., & Feng, Y. 2013a. RHtests V4 User Manual. Climate Research Division. Atmospheric Science and Technology Directorate. Science and Technology Branch, Environment Canada. Toronto, Ontario, Canada. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml> (Recuperado: mayo 2023).
- Wang, X. L., & Feng, Y. 2013b. RHtests_dlyPrp User Manual. Climate Research Division. Atmospheric Science and Technology Directorate. Science and Technology Branch, Environment Canada. Toronto, Ontario, Canada. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml> (Recuperado: mayo 2023)
- WMO (World Meteorological Organization). 2022, mayo 27. FAQs—Climate. World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate>

- Wootton, A., Enríquez, P. L., & Navarrete-Gutiérrez, D. 2023. Regional patterns of 1
vegetation, temperature, and rainfall trends in the coastal mountain range of Chiapas, 2
Mexico. *Atmósfera*, 36(1), Article 1. <https://doi.org/10.20937/ATM.53026> 3
- Zarazúa Villaseñor, P., Ruiz Corral, J. A., Ramírez Ojeda, G., Medina García, G., Rodríguez 4
Moreno, V. M., de la Mora Orozco, C., Florez López, H., & Durán Puga, N. 2014. Índices 5
de extremos térmicos en las Llanuras Costeras del Golfo Sur en México. *Revista* 6
Mexicana de Ciencias Agrícolas, Pub. Esp.(12), 1843-1857. 7
[https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5nspe10/2007-0934-remexca-5-spe10-](https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5nspe10/2007-0934-remexca-5-spe10-1843.pdf) 8
1843.pdf 9
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & 10
Zwiers, F. W. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily 11
temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2(6), 851-870. 12
<https://doi.org/10.1002/wcc.147> 13
- Zhang, X., Feng, Y., & Chan, R. 2018. Introduction to RClimDex v1.9. Climate Research 14
Division, Downsview, Ontario, Canada. [https://github.com/ECCC-](https://github.com/ECCC-CDAS/RClimDex/blob/master/inst/doc/manual.pdf) 15
CDAS/RClimDex/blob/master/inst/doc/manual.pdf (Recuperado: mayo 2023). 16

17