

TENDENCIAS DE LOS VALORES DE TEMPERATURA Y LLUVIA EN LA CUENCA DEL RÍO ATOYAC, OAXACA

Jesús Q. **García-Santos**, Laura Alicia **Ibáñez-Castillo**^{*}, Ramón **Arteaga-Ramírez**, Mauricio **Carrillo-García**

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

^{*}Autor de correspondencia: libacas@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó un análisis de datos climatológicos para identificar una tendencia de los valores de temperatura y lluvia dentro de la cuenca Río Verde - Río Atoyac, en el Estado de Oaxaca. Dicha información, se analizó con el software RCLimDex, para obtener las tendencias que presentan a través del tiempo. Se encontró que, se presenta un decremento en la cantidad de días frescos, aumento en las noches frías, aumento de la duración de los periodos fríos y aumento de días con heladas. Se encontró, un incremento considerable de los días secos consecutivos, incremento de rango diurno de temperatura, aumento de índice simple de intensidad diaria de la lluvia, aumento de días de verano, más días calurosos, mayor duración de los periodos cálidos, y valores más extremos de temperatura mínima y máxima. Para tener una panorámica más completa, se analizó una proyección escenario lejano (2075-2099), se observó que se espera una disminución de alrededor de 4% en las láminas precipitadas para casi todos los meses, un aumento en la temperatura máxima de hasta 4.8 °C para octubre y un aumento en la temperatura mínima de hasta 5.2 °C para octubre. La conclusión general, con ambos enfoques, análisis de tendencias de los datos medidos con los escenarios teóricos lejanos, es que las temperaturas, tendrán un incremento drástico, no así la lluvia, por el momento. Aunque en la tendencia, a partir del análisis de datos, se encontró un aumento en la intensidad diaria de la lluvia.

Palabras clave: cambio climático, datos meteorológicos en México, escenarios futuros del clima, índices climáticos, RCLimDex.

INTRODUCCIÓN

El clima, es el estado promedio del tiempo meteorológico en un periodo de generalmente, 30 años o más. La temperatura y precipitación promedio, durante un largo periodo de tiempo, son las principales variables utilizadas para caracterizar el clima (de la Fuente-Meraz y Olivera-Villaruel, 2018). El cambio climático, es la alteración del clima de la Tierra, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana; es un fenómeno que se manifiesta en un aumento de la temperatura promedio del planeta (Díaz-Cordero, 2012). Esta alteración en el clima, tiene repercusiones en la magnitud de los eventos extremos de temperatura y precipitación en todo el planeta.

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, esta alteración, está relacionada directamente con el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero al espacio, resultado de actividades humanas relacionadas con el uso de combustibles fósiles (carbón, gas natural y los combustibles derivados del petróleo), así como el cambio de uso de suelo (deforestación), pérdida de bosques, siendo estas dos de las principales fuentes de ese problema.

Los científicos que han analizado este comportamiento del clima, concluyen que cada vez, se presentarán climas más extremos. En general, los veranos serán más calurosos y

Citation: García-Santos JQ, Ibáñez-Castillo LA, Arteaga-Ramírez R, Carrillo-García M. 2024. Tendencias de los valores de temperatura y lluvia en la cuenca del Río Atoyac, Oaxaca. Agricultura, Sociedad y Desarrollo <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i4.1663>

ASyD 21(4): 536-552

Editor in Chief:

Dr. Benito Ramírez Valverde

Received: November 6, 2023.

Approved: May 9, 2024.

Estimated publication date:

September 27, 2024.

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



los patrones de las lluvias se modificarán, ocurriendo precipitaciones más altas en algunas partes y menos frecuentes en otras, aumentando así, las sequías (Bárcena *et al.*, 2015). México, es uno de los más vulnerables al cambio climático, debido a su ubicación geográfica, pues se encuentra rodeado de dos océanos, además, su relieve y las latitudes a las que se encuentra, lo exponen a que sea de los más afectados por el incremento de temperatura. El Grupo de Expertos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), considera 27 índices climáticos extremos de temperatura y precipitación, en muchos casos, los eventos que producen esos valores, pueden tener un alto impacto en el medio ambiente (Mendoza-Aguilar, 2019).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2019), ha encontrado que de los 2,456 municipios en los que se divide el país, 480 (20%) tienen un nivel de vulnerabilidad al cambio climático muy alto o alto. Al observar los municipios, se detecta que la mayoría, están ubicados en el Sur de México, entre ellos, los Estados de Oaxaca y Chiapas, los cuales se caracterizan por ser de las zonas más pobres del país. Además, según el Banco Mundial y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), se calcula que aproximadamente, 68% de la población y 71% del PIB de México, están expuestos a los efectos adversos del cambio climático. De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (González *et al.*, 2021), cuando se evalúa la vulnerabilidad al cambio climático, se califican los efectos adversos sobre: (a) los asentamientos humanos expuestos a deslaves, inundaciones y enfermedades, (b) sobre la producción ganadera a estrés hídrico e inundaciones, (c) vulnerabilidad de la producción forrajera sujeta a estrés hídrico.

En este trabajo, se pretende detectar, la presencia o ausencia del cambio climático en una de las regiones hidrológicas del Estado de Oaxaca, en la zona del río Atoyac, que incluye la capital del estado y otros municipios pobres a su alrededor.

MARCO TEÓRICO

En 1992, las Naciones Unidas (UN, 1992), realizaron una conferencia sobre cambio climático y definieron cambio climático, como un cambio en el clima, el cual, es atribuido directa o indirectamente, a la actividad humana que altera la composición global de la atmósfera y dicho cambio, es adicional a la variabilidad climática natural observada durante el mismo periodo de tiempo. En 2021, el sexto reporte sobre el clima, por el Panel Intergubernamental para cambio climático (IPCC, 2021), definen cambio climático, como un cambio en el estado del clima, que puede ser identificado, usando pruebas estadísticas para detectar cambios en la media o la variabilidad de sus propiedades, por un periodo extendido de tiempo, típicamente al menos, por décadas. En el anexo VII del mismo IPCC (2021), definen clima, como el estado del tiempo promedio, en términos de la media y la variabilidad, para un periodo de al menos 30 años. Las variables más relevantes que integran el clima son temperatura, precipitación y viento. Se dice que el clima, está en constante cambio, sin embargo, cuando estadísticamente presenta una tendencia en cualquiera de sus variables, se debe de poner atención, ya que afecta los ecosistemas. Por tal razón, en el año 2010, el Instituto Nacional de Ecología, propuso una guía para el cálculo de índices

de cambio climático (Vázquez-Aguirre, 2010). En ese trabajo, se proponen 27 índices, que se enfocan en el análisis de varias formas de expresión de la lluvia y la temperatura. Para aplicar dicha guía, resulta muy útil utilizar el software RClimDex (Zhang *et al.*, 2018), el cual analiza estadísticamente, datos del clima para por lo menos, un periodo de 30 años. El software, busca tendencias estadísticas, basándose en el cambio de pendiente a través del tiempo de las variables analizadas. El software, analiza si el cambio, incremento o decremento, es significativo o no significativo, desde el punto de vista estadístico.

La Organización Meteorológica Mundial, a través de su equipo “Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices” (ETCCDMI), desarrolló 27 índices climáticos para la detección y el monitoreo de cambios en los registros extremos del clima (Zhang *et al.*, 2018). Básicamente, se analiza el comportamiento de temperaturas máximas y mínimas y de lluvia, a través de periodos de mínimo, 30 años. Esa metodología, se apoya en el software RClimDex v1.9, el cual facilita el análisis de ese posible cambio climático. El Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio climático (ICAyCC, 2023), mantiene una página web de posibles escenarios de cambio climático para México, a corto, mediano y largo plazo; esta es actualizada constantemente (<http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>). La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del ICAyCC, presenta los escenarios para los modelos CNRMCM5 francés, GFDL-CM3 estadounidense y HADGEM2-ES del Reino Unido.

Existe un escepticismo sobre si el cambio climático es real. Lo cierto es que, en los últimos 8 años, el Océano Pacífico, frente a las Costas Mexicanas, ha presentado dos de los huracanes más extremos y dañinos, como lo son el huracán Patricia en el año 2015 y el huracán Otis en el año 2023, frente a las costas de Colima y Guerrero, respectivamente (Servicio Meteorológico Nacional-SMN, 2023b). Dichos huracanes, trajeron consigo, grandes valores de lluvia en la región y se registraron temperaturas máximas extraordinarias, en la superficie del océano. En la zona de estudio del río Atoyac en Oaxaca, en la que se encuentra la capital del Estado de Oaxaca, se ha percibido por la población, un cambio en el clima, el cual, solo puede ser confirmado a través de un análisis formal del clima. En esta misma zona, también ha ocurrido un cambio en el uso de suelo, que contribuye negativamente, para que se presenten valores extremos del clima. En esta zona, se ha visto un deterioro grande de las zonas boscosas a causa de la deforestación, en muchas partes, de manera ilegal, durante el lapso entre 1980 y 2000; se encontraron índices de pérdida de bosques en la zona, alcanzando alrededor de 24,000 hectáreas anuales. Esto fue especialmente notable, en áreas como el Bajo Mixe, la región de Putla-Jamiltepec y la región de los Loxichas. La deforestación, se atribuye principalmente, a cambios en el uso del suelo para actividades agropecuarias, donde aún persiste la práctica del sistema de roza, tumba y quema (Ellis *et al.*, 2017).

En este trabajo, siempre se tuvo claro realizar ese análisis de tendencia del clima en el Estado de Oaxaca, dado que es una región con una economía deprimida y los cambios climáticos adversos, pueden afectar más a dichas regiones, ya que su población, tendrá menos recursos para afrontar tales cambios adversos. Sin embargo, la selección específica de las estaciones a analizar, dependió mucho de la disponibilidad de datos reportada por SMN

(2023a); es decir, se buscaron series de por lo menos, 30 años de datos y con el menor porcentaje de datos faltantes medidos. Los meteorólogos y los estadísticos, recomiendan que no haya datos faltantes mayores a 20%; sin embargo, en este trabajo, se consideró ser más rigurosos y usar series con datos faltantes menores a 10% y rellenar datos faltantes, con el método del inverso del cuadrado de la distancia (Campos-Aranda, 1998) para la lluvia, que exhibe mayor variabilidad temporal y espacial que la temperatura. Aunque también, se pudieran rellenar esos vacíos de datos faltantes, con datos digitales obtenidos a partir de imágenes de satélite para lluvia y temperatura (App Climate Engine, 2023). Dentro de la App Climate Engine, se recomienda usar la base de datos CHIIRPS para lluvia y la base de datos DAYMET, para las temperaturas máximas y mínimas.

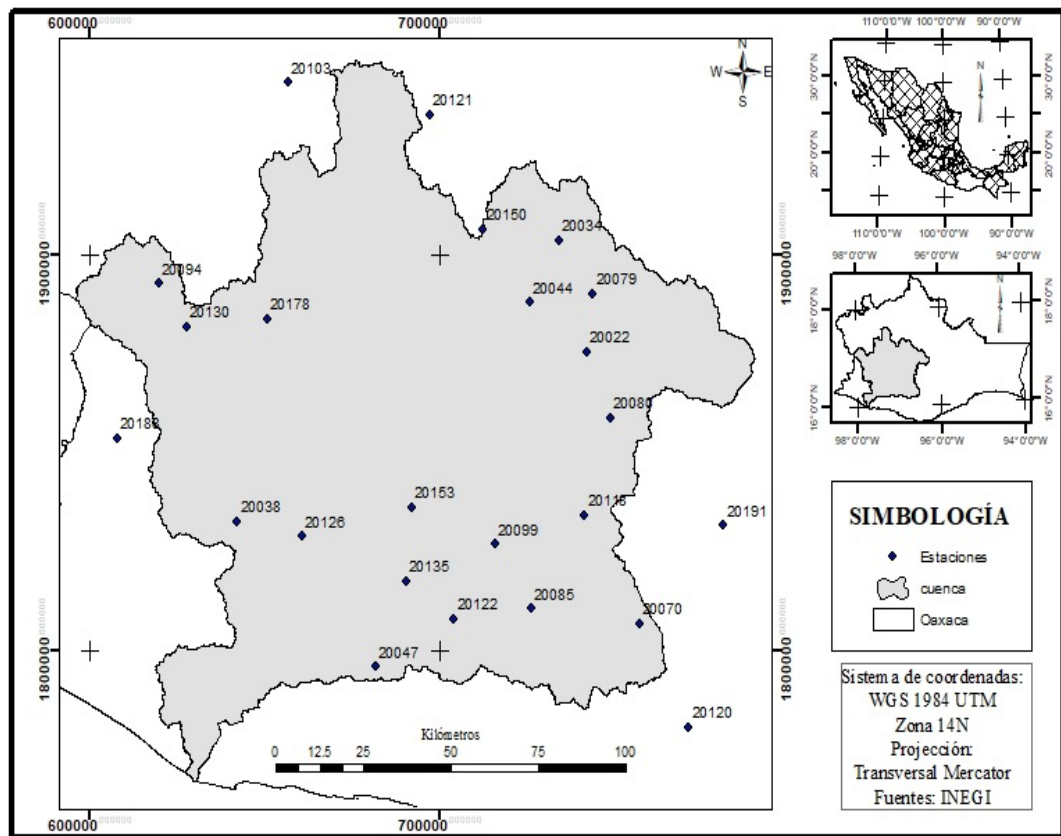
Un trabajo previo reciente, sobre las tendencias de la precipitación en una región del Estado de Guanajuato, fue el de Jaimes *et al.* (2021), pero solo se concentró en el análisis de precipitación, sin considerar la temperatura y solo encontró pequeños cambios en la lluvia en dos de 18 estaciones meteorológicas.

METODOLOGÍA

Para ubicar y caracterizar la cuenca de trabajo, fue necesario usar información del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del Gobierno Mexicano. La cuenca del Río Verde-Atoyac, se encuentra ubicada en su mayoría, dentro del Estado de Oaxaca, entre las coordenadas $96^{\circ} 16' 37''$ y $98^{\circ} 05' 57''$ de Longitud Oeste y $17^{\circ} 37' 20.32''$ y $15^{\circ} 58' 46''$ de Latitud Norte (Figura 1). La cuenca tiene un área aproximada de 18,261 kilómetros cuadrados; pertenece a la región hidrológica número 20, denominada Costa Chica de Guerrero (INEGI, 2008). Dentro de los 243 municipios ubicados dentro de la cuenca (Zorrilla *et al.*, 2017), los más importantes ubicados en este lugar, destacan Oaxaca de Juárez, ciudad capital del estado y sus municipios aledaños, Ocotlán, Ejutla, Miahuatlán, Sola de Vega, Juchatengo, entre otros.

La altitud en la zona de estudio, varía de 0 a 3,606 msnm. En la mayor parte de la cuenca, se presenta el clima templado subhúmedo (42.08), en segundo lugar, se encuentra con 21.57%, el clima templado húmedo (INEGI, 2008a). La temperatura media anual, es de 20.2 °C; el mes más frío es enero, con una temperatura mensual promedio 18.9 °C, mientras que mayo, es el mes más caluroso, con un promedio mensual de 22.9 °C. La precipitación anual promedio es de 1,192 mm; las láminas diarias, en su mayoría son menores a 45 mm (SMN, 2023a). Se tienen registros de algunos eventos con más de 200 mm precipitados, pero son muy pocos; estos sucesos, se deben al paso de huracanes en la costa, como es el caso del 8 de octubre de 1997, cuando tocó tierra el huracán Paulina en el Puerto de Santa Cruz y después continuó su camino por parte del área de estudio, dejando registros de más de 200 mm precipitados.

La época de lluvias, se concentra en su mayoría, en los meses de mayo a octubre, cuando la temperatura máxima promedio, varía de 31.1 °C a 34 °C y el promedio de la mínima, de 14.2 °C a 15.6 °C; el resto del año, época seca, la temperatura mínima promedio varía de 10.5 °C a 14.1 °C y la máxima va desde los 32.1 °C a los 33.6 °C. En cuanto al uso de suelo y vegetación en la cuenca, predomina la agricultura de temporal anual con 18.65% y



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2008b) y SMN (2023a).
Figura 1. localización del área de estudio.

la vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (11.42%) (INEGI, 2018). El tipo de suelo con mayor presencia en el área, es el regosol eútrico, encontrado en 62.74% de la cuenca, seguido del litosol, encontrado en 15.15% de la zona (INEGI, 2007).

En este trabajo, básicamente se utilizan dos herramientas: (a) análisis del clima a través de al menos 30 años de información histórica, disponible en las estaciones meteorológicas y (b) Proyección climática para un escenario “lejano”, para el periodo 2075-2099 (ICAYCC-UNAM, 2023). De todas las estaciones del sistema meteorológico nacional que se encuentran dentro y en los alrededores de la cuenca de trabajo, para el presente trabajo, se eligieron las siguientes 29 estaciones del clima, que son las que pasaron los filtros realizados y en las que se encuentra una mayor cantidad de información (Cuadro 1).

Lo primero que se realizó, fue descargar los datos necesarios de la página del SMN (2023a). Los datos descargados, fueron los datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima registrados en cada una de las estaciones meteorológicas, ubicadas tanto dentro del área de estudio, como de sus alrededores (SMN, 2023a) y que al menos, contaran con 30 años de información, preferentemente que esos datos, correspondieran al periodo que va entre los años 1961 y 2019. En la página del Servicio Meteorológica Nacional, donde

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas.

Clave	Latitud	Longitud	Altitud	Prec T.	Tmed	Municipio
20009	16.637	-95.960	639	549.33	25.9	Nejapa de Madero
20010	16.612	-98.149	420	2,095.80	26.7	San Juan Cacahuatepec
20018	17.250	-98.300	2,432	1,988.38	15.0	Coicayan de las Flores
20022	16.957	-96.701	1,504	552.80	20.1	San Bartolo Coyotepec
20034	17.027	-96.800	1,673	744.85	19.7	Villa de Etla
20038	16.572	-97.667	596	1,642.83	26.0	Santiago Ixtayutla
20044	17.066	-96.878	1,745	788.38	18.8	San Felipe Tejalapam
20047	16.233	-97.300	1,408	1,489.48	19.6	Santa Catarina Juquila
20070	16.329	-96.594	1,560	604.66	19.8	Miahuatlán de Porfirio Díaz
20079	17.083	-96.710	1,588	767.12	21.3	Oaxaca de Juárez
20080	16.800	-96.667	1,522	791.84	19.8	Ocotlán de Morelos
20085	16.367	-96.883	1,344	805.14	21.6	San Vicente Coatlán
20094	17.117	-97.873	1,321	2,519.31	24.1	Putla Villa de Guerrero
20099	16.514	-96.978	1,412	862.81	20.9	Santa Cruz Zenzontepec
20103	17.573	-97.523	2,313	731.02	15.4	San Andrés Lagunas
20118	16.579	-96.737	1,448	678.86	21.2	San Miguel Ejutla
20120	16.091	-96.465	2,457	1,281.34	14.5	San Miguel Suxhixtepec
20121	17.496	-97.142	2,206	907.17	15.9	San Pedro Coxcaltepec
20122	16.343	-97.089	861	908.13	24.6	San Pedro Juchatengo
20126	16.537	-97.495	960	1,387.87	23.7	Santa Cruz Zenzontepec
20130	17.017	-97.800	1,888	1,898.74	20.2	Santa María Yucuhiti
20135	16.433	-97.217	1,182	1,375.37	22.0	Santiago Minas
20141	17.500	-98.150	1,667	949.73	20.7	Silacayoapam
20150	17.232	-97.002	2,278	821.12	16.8	Santiago Tenango
20153	16.600	-97.200	1,778	2,263.89	22.6	Santo Domingo Teojomulco
20178	17.033	-97.583	2,432	902.60	13.9	Chalcatongo de Hidalgo
20188	16.764	-97.988	355	1,731.16	26.4	Santa María Zacatepec
20191	16.550	-96.367	1,162	398.57	23.4	Santa María Zoquitlán
12061	16.684	-98.4	316	1,358.18	26.3	Ometepec, Guerrero

Fuente: SMN, (2023a).

se encuentran los datos diarios de precipitación y temperatura, solo están publicados datos hasta el 2019 (2023a). Se revisó que los datos de las estaciones climatológicas, no presentarían datos anormales ni más de 10% de datos faltantes, aunque el programa, puede trabajar con series que tengan al menos 70% de información (Zhang *et al.*, 2018).

Después, se procesan los valores diarios en el software RCLimDex, con un previo control de calidad básico, con el cual, se pretende identificar datos anormales, los cuales, se salen del rango normal de datos que obtiene el programa, por ejemplo, algún día, en que la temperatura máxima sea menor al promedio para las temperaturas mínimas o viceversa.

En seguida, se aplica el control de calidad extra, para encontrar valores diarios muy altos o muy bajos, mismos que se presume que fueron registrados de manera incorrecta, al momento de capturar las lecturas diarias de precipitación y temperatura, por ejemplo, un día en que la temperatura mínima aparezca como 21 °C, pero que en realidad haya sido de 12 °C. para corregir esa información, se tiene

que investigar si se encuentran registros de que en realidad, se hayan presentado días con temperaturas muy altas, o de lo contrario, muy bajas; y en el caso de la precipitación, corroborar que hayan ocurrido días con láminas de lluvia tan altas, esto debido a que la zona oaxaqueña de estudio, que en su parte, baja desemboca al Océano Pacífico, se ve afectada frecuentemente por el paso de los huracanes y las tormentas tropicales. De no existir información que corrobore la veracidad de los datos registrados, se puede consultar qué valores aparecen para ese mismo día y esa misma variable, en las estaciones cercanas a la que se está trabajando, de manera que compruebe la veracidad de los registros o que haga concluir que hubo algún error al capturar los valores.

El siguiente paso, es la homogenización de los datos, esto consiste en verificar la tendencia que llevan los valores, encontrar saltos en la información diaria o alguna otra discontinuidad; se tiene que verificar a qué se debe la falta de homogeneidad de los datos, si es porque se hizo un cambio de ubicación de la estación meteorológica, o se renovó el equipo que toma los datos, etc. Para encontrar los mencionados saltos, se corre la información como lo sugiere en el software RHtests, ingresándola con el mismo formato en que se utiliza el programa RCLimDex, siguiendo el procedimiento que indican Wang y Feng (2013), y una vez que se obtengan los valores homogenizados, se procede al cálculo de los 27 índices de cambio climático básicos de ETCCDMI, que aparecen en el Cuadro 2, con ayuda del primer software como lo explican Zhang *et al.* (2018).

Cuadro 2. Lista de Los Índices climáticos básicos del Clima de Expertos de Cambio Climático, Detección y Monitoreo (ETCCDMI).

Índice	Descripción del nombre	Definición	Unidad
SU25	Días de verano	Número de días en un año en que TX > 25 °C	Días
ID0	Días con hielo	Número de días en un año en que TX < 0 °C	Días
TR20	Noches tropicales	Número de días en un año en que TN > 20 °C	Días
FD0	Días con helada	Número de días en un año en que TN < 0 °C	Días
GSL	Duración de la estación de crecimiento	Número de días en un año entre la primera racha de, como mínimo, seis días con TG > 5 °C y la primera racha después del 1° de julio con, como mínimo, seis días con TG < 5 °C	Días
TXx	Temperatura máxima extrema	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria	°C
TXn	Temperatura máxima más baja	Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria	°C
TNx	Temperatura mínima más alta	Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria	°C
TNn	Temperatura mínima extrema	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria	°C
Tx10p	Frecuencia de días frescos	Porcentaje de días en que TX < percentil 10	Días
Tx90p	Frecuencia de días calurosos	Porcentaje de días en que TX > percentil 90	Días
Tn10p	Frecuencia de noches frías	Porcentaje de días en que TN < percentil 10	Días

Cuadro 2. Continuación.

Índice	Descripción del nombre	Definición	Unidad
Tn90p	Frecuencia de noches cálidas	Porcentaje de días en que TN > percentil 90	Días
WSDI	Duración de los periodos cálidos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con TX > percentil 90	Días
CSDI	Duración de los periodos fríos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con TN < percentil 90	Días
DTR	Rango diurno de temperatura	Media anual de la diferencia entre TX y TN	°C
Rx1day	Precipitación máxima en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria	Mm
Rx5day	Precipitación máxima en cinco días	Máxima anual de la PPT registrada en cinco días consecutivos	Mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación total anual dividida entre el número de días con PPT ≥ 1 mm	mm/día
R10	Días con lluvia mayor a 10 mm	Número anual de días en que PPT ≥ 10 mm	Días
R20	Días con lluvia mayor a 20 mm	Número anual de días en que PPT ≥ 20 mm	Días
R25	Días con lluvia mayor a 25 mm	Número anual de días en que PPT ≥ 25 mm	Días
CDD	Días secos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con PPT < 1 mm	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con PPT ≥ 1 mm	Días
R95p	Días muy húmedos	Precipitación total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95	Mm
R99p	Días extremadamente húmedos	PPT total anual (en días en que PPT ≥ 1 mm) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99	Mm
PRCPTOT	Precipitación total	PPT total anual en días en que PPT ≥ 1 mm	Mm

En las que, TN significa temperatura mínima, TX representa la temperatura máxima, TG es la temperatura media, RR precipitación diaria y PPT la precipitación total anual; el cálculo de percentiles, se realiza tomando como periodo de referencia el periodo de 1961-1990.

Fuente: Zhang *et al.* (2018), Figueroa-Gallegos, (2017).

Cada uno de los 27 índices, es graficado y se observa si hay tendencias de incremento o decremento, en qué medida y si esas modificaciones, indican alguna presencia de cambio climático en la ubicación de la estación meteorológica.

Con la finalidad de completar la visión temporal de las tendencias climáticas en Oaxaca, se realizan las proyecciones climáticas para un escenario lejano (2075-2099), con ayuda del atlas climático del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC-UNAM, 2023). En este trabajo, se eligieron los modelos CNRMCM5, GFDL-CM3 y HADGEM2-ES, con la que se obtuvo un pronóstico de la temperatura máxima, mínima

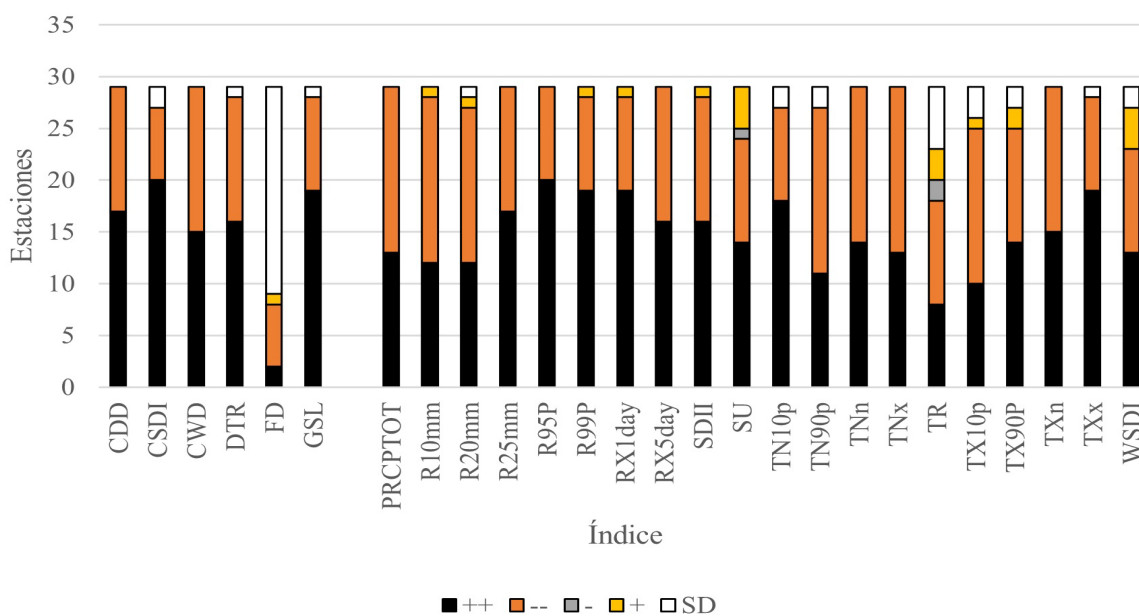
y precipitación en la región. Con esta última información, se hace un pronóstico del riesgo que puede correr la flora, la fauna y la población humana del lugar para entonces. La metodología completa anteriormente descrita, se llevó a cabo en todas y cada una de las estaciones meteorológicas estudiadas.

RESULTADOS

En las series de datos con las que se trabajó, no se encontraron registros de precipitación negativa, tampoco valores de temperaturas máximas menores a las mínimas.

En los datos registrados de precipitación, en cuanto a los decimales, se abusa del uso del cero y en menor medida, del cinco, aunque sí se toman en cuenta, en menor medida, el 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9. En cuanto al registro de la temperatura máxima y la temperatura mínima, se abusa excesivamente del uso del cero, en menor medida, del 0.5 y no se toma en cuenta para nada, el resto de los decimales en ambas variables medidas.

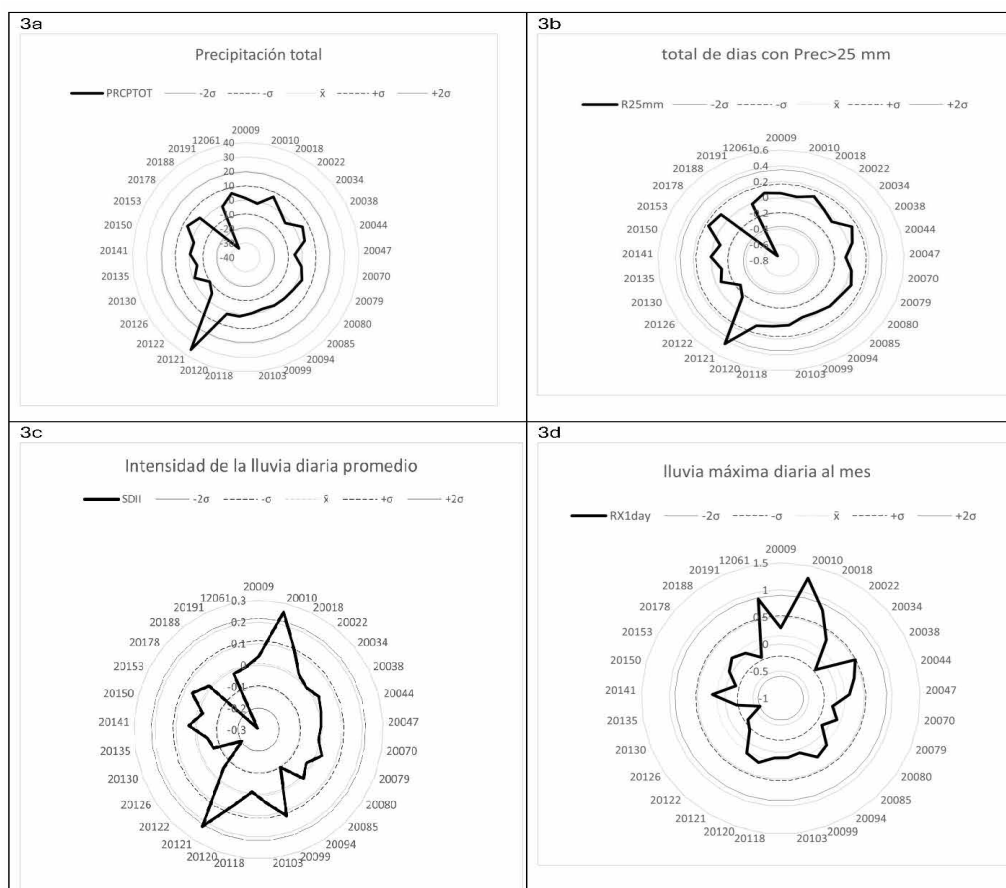
En la Figura 2, se presentan para cada índice de cambio climático, la cantidad de estaciones que, con un nivel de confianza del 95%, presentan una tendencia positiva no significativa (+), las que tienen una tendencia positiva significativa (++) , las que muestran tendencia negativa no significativa (-) y en las que se observa una tendencia negativa significativa (--), también, hay estaciones en las que por la cantidad de datos con los que se cuenta, no se pudo encontrar la línea de tendencia (SD), de la misma forma como lo realizado por Jaimes *et al.* (2021) y Figueroa-Gallegos (2017).



Fuente: elaboración propia con información obtenida de RCLimDex.
Figura 2. Tendencia de los índices de cambio climático en las 29 estaciones.

Se puede observar que, en su mayoría, todos los índices presentan una tendencia de incremento significativa, sobre todo, las temperaturas máximas en la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo, la cantidad de noches frías, la diferencia media mensual entre temperatura máxima y la temperatura mínima, además, de la cantidad de días con láminas mayores a 25 mm (Figura 3), Por el contrario, se presenta tendencia significativa descendente, principalmente en la precipitación total anual y en las temperaturas mínimas, por lo que se tienen climas más extremos.

La Figura 3, es una gráfica radial que muestra las tendencias de algunos índices climáticos relativos a la precipitación. Los números alrededor de ese círculo, corresponden a la clave de la estación climatológica. La línea sólida, muestra la pendiente o tasa de cambio por año del índice mostrado. La misma gráfica, muestra intervalos de confianza de medida (a) una desviación estándar (σ) y (b) dos desviaciones estándar (2σ); ambos límites, sumados o restados a esa pendiente, para construir los límites superiores e inferiores. Por ejemplo, la Figura 3a muestra que la precipitación total anual en la estación 20,121 San



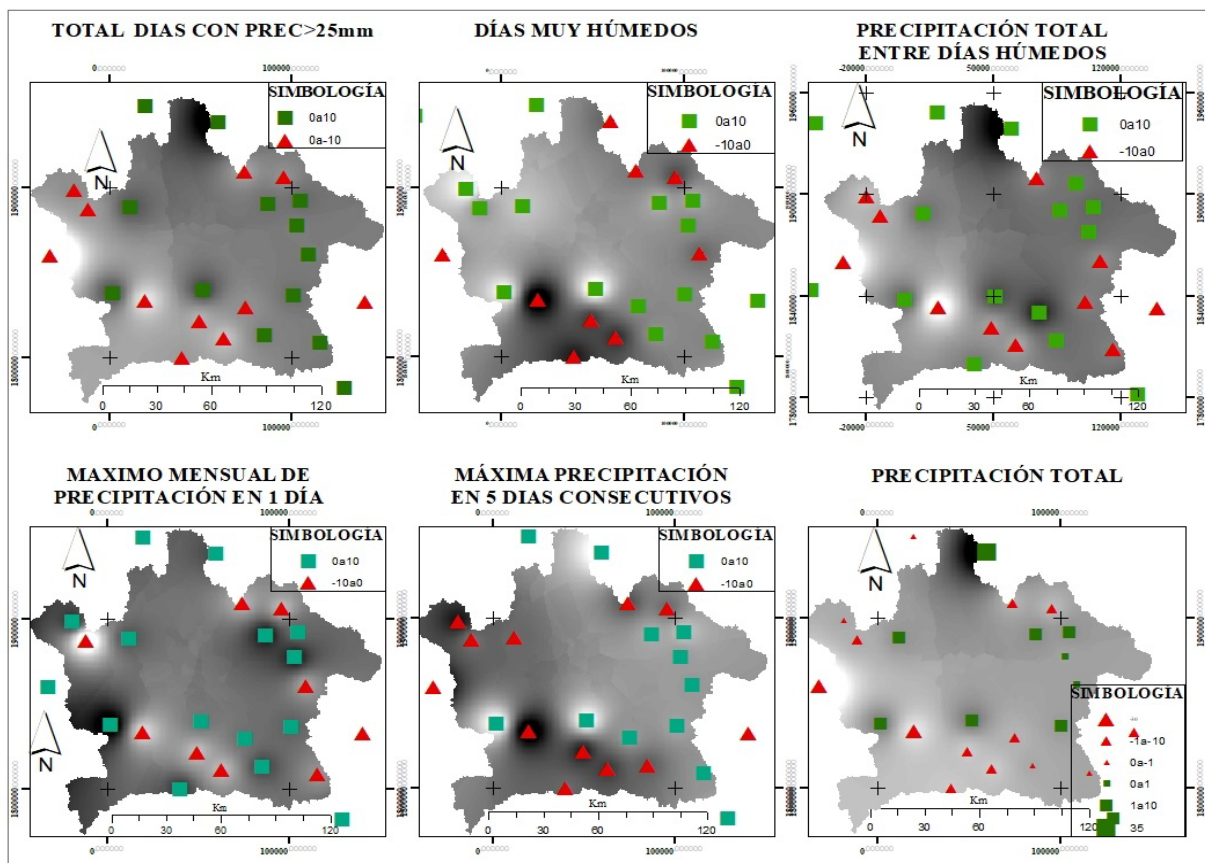
Fuente: elaboración propia en base a los datos del SMN (2023a).

Figura 3. Valores promedio de los índices PRCPTOT, R25mm, R95P, R99P y RX1day para cada estación climatológica analizada.

Pedro Coxcaltepec, muestra una tendencia de crecimiento de aproximadamente 35 mm/año (localizada a 2,206 msnm, cerca de Nochistlan, Oaxaca, zona semiforestal) y la estación 20,188 Santa María Zacatepec, muestra una tendencia a decrecer 32 mm/año (zona poblada 355 msnm). De manera similar, puede interpretarse la Figura 3c, que muestra las tasas de cambio de la intensidad diaria de la lluvia, mientras que la mayoría de las estaciones, tienen una tendencia al aumento de la intensidad de la lluvia, existen unas cuantas que su intensidad decrece.

Tanto en la Figura 3 como en la Figura 4, se puede ver una tendencia positiva en los índices de cambio climático relacionados con la precipitación, esto significa que, promediando las 29 estaciones analizadas, cada año, incrementa en una cantidad mínima la precipitación anual promedio, misma situación que dedujeron Kachok y Ivanova (2019), para la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, Baja California Sur.

Se observa que cada vez, se presentan láminas de lluvia diarias mayores, debido a que cada año, hay mayor cantidad de huracanes y tormentas tropicales; este comportamiento de la

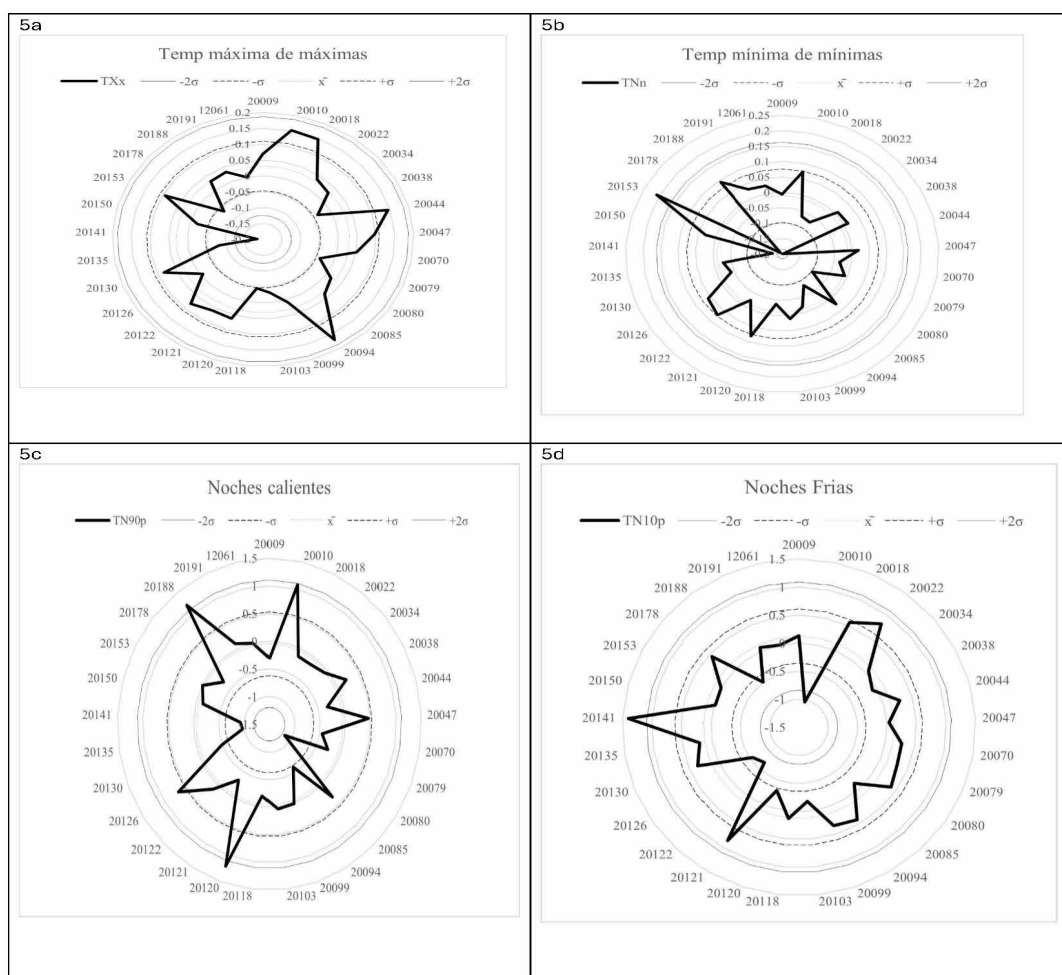


Fuente: elaboración propia en base a los datos del SMN (2023a).

Figura 4. Tendencia de los índices de cambio climático para la precipitación en las estaciones.

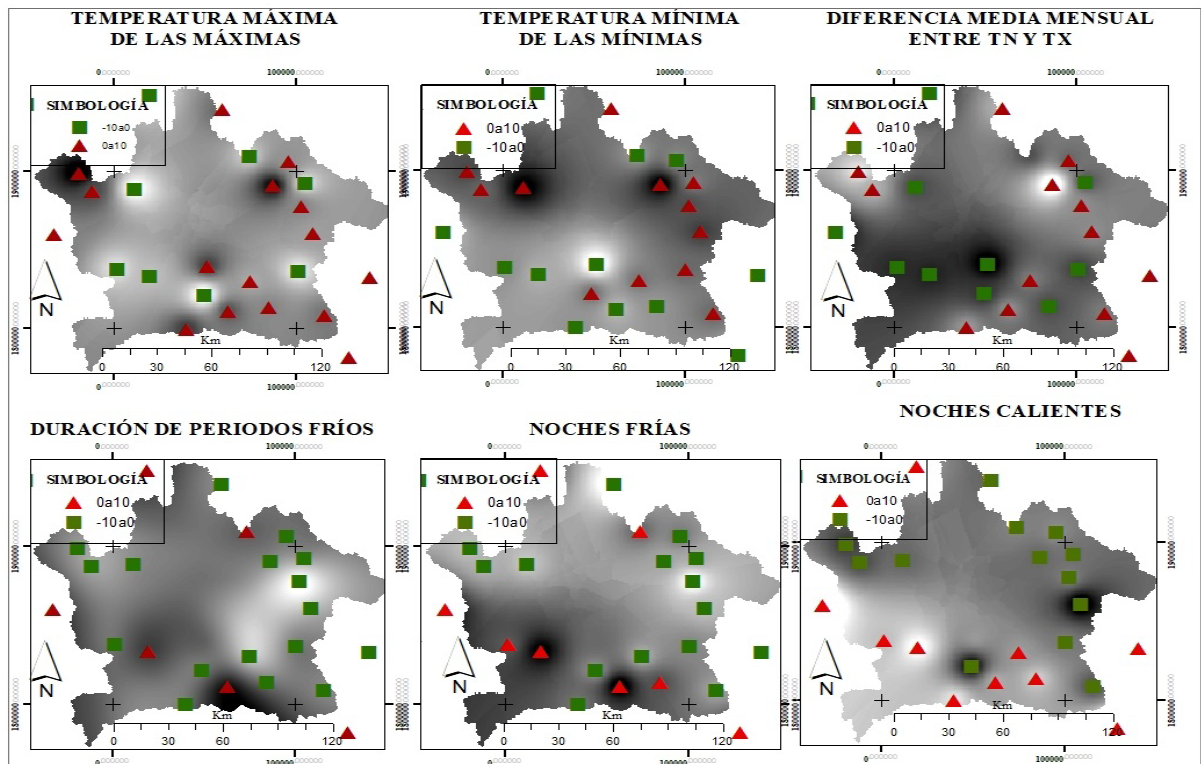
lluvia, trae como consecuencia, que también se reduzca el periodo de lluvias, teniendo una precipitación anual, igual o mayor a la de años anteriores, pero ahora, en menor cantidad de días y con láminas diarias de lluvia mayores, afectando también, el índice simple de intensidad diaria de la lluvia.

En cuanto a la temperatura, Figuras 5 y 6, los índices de cambio climático que sobresalen con una tendencia positiva o negativa, se detecta que la temperatura máxima entre las máximas (T_{Xx}), tiene una tasa de crecimiento positiva, lo que significa que cada año, se presentan temperaturas máximas cada vez mayores, por el contrario, respecto a las temperaturas mínimas (T_{Nn}), cada año se registran días más fríos respecto al año anterior, por lo que se concluye que, las temperaturas extremas, son cada vez más extremas. La Figura 5a, muestra que varias estaciones, presentan una tendencia a que su temperatura máxima, incremente. En algunas estaciones, la tasa anual de incremento, será hasta de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. En



Fuente: elaboración propia en base a los datos del SMN (2023a).

Figura 5. Valores promedio de los índices relacionados con la temperatura para cada estación climatológica analizada.



Fuente: elaboración propia en base a los datos del SMN (2023a).
Figura 6. Índices de cambio climático relacionados con la temperatura.

cambio, en la Figura 5b, se observan las tasas de cambio para las temperaturas mínimas. Esta tendencia, en los valores extremos de las temperaturas, da paso a que el índice $Tn10P$, encargado de representar la cantidad de noches frías en un año (Figura 5d), también vaya incrementando respecto al dato anterior y en contraste, el índice $Tn90P$, representante de las noches cálidas en un año (Figura 5c), presente una pendiente negativa, lo que indica que las temperaturas mínimas, que generalmente se presentan durante la noche, han ido disminuyendo.

En cuanto a los índices $Tx10P$, encargado de analizar los días fríos, presenta una pendiente negativa, indicando que la temperatura durante el día, es mayor cada año respecto al anterior; y $Tx90P$, encargado de contabilizar los días calurosos, muestra una pendiente positiva, indicando que cada año, se irán recibiendo temperaturas máximas más altas. Todo lo anterior, también concuerda con la pendiente positiva del índice DTR, o rango diurno de temperatura, encargado de mostrar la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima, debido a que la temperatura mínima, será cada vez menor y la temperatura máxima, cada vez mayor, mostrando diferencias más grandes, algo similar a lo mostrado por De la Mora-Orozco *et al.* (2016), para el Estado de Chiapas.

Para la proyección climática, se utilizaron los datos de la página de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas> de la UNAM, para los modelos CNRMCM5 francés, GF-

DL-CM3 estadounidense y HADGEM2-ES del Reino Unido. Se obtuvo dato por dato, en cada una de las imágenes del servmapas para cada mes, tanto para precipitación, temperatura mínima y máxima.

En el Cuadro 3, se puede ver que en los tres modelos que se analizaron (Francés, Estados Unidos Americanos y Reino Unido), se presenta una ligera disminución en la cantidad de lluvia mensual, principalmente, en el modelo del Reino Unido, comparado con el promedio de precipitación mensual actual (el que se utilizó de las estaciones de la zona de estudio), lo que finalmente, repercute en una muy leve disminución en el promedio de lluvia anual esperado para el futuro lejano (2075-2099), en comparación con los milímetros anuales promedio actualmente. Solamente, se presenta un dato anormal pronosticado con el modelo del Reino Unido para el mes de noviembre, con una lámina mucho mayor a la que pronostican los otros dos, mayor a la lámina promedio actual, incluso, a la que el mismo modelo muestra para el mes de octubre. En el mismo Cuadro 3, la penúltima hilera “Prm fut”, es el promedio de los tres modelos futuros pronosticados, y la última hilera “Dif fut”, representa la diferencia entre el valor mensual actual y el promedio futuro pronosticado. Así que en lo que respecta a la lluvia para el escenario lejano, hay en promedio una reducción de 4% con respecto a lo actual promedio.

En el Cuadro 4, se muestra una comparación entre la temperatura máxima mensual actual y la que pronostican cada uno de los tres modelos explicados anteriormente. Se puede ver, un incremento en la temperatura que predicen los modelos; en mayor cantidad el estadounidense

Cuadro 3. Pronóstico de precipitación anual en un escenario lejano 2075-2099.

Precipitación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual	7	13	20	38	114	239	205	234	250	127	22.4	8.6
Francés	5	17	16	39	146	214	173	214	243	117	19	7
EUA	5	20	15	28	99	245	178	204	231	142	44	17
Reino Unido	8	18	14	25	104	222	177	184	194	71	132	29
Prm fut	6	18	15	30.	116	227	176	200	223	110	65.	18
Dif fut	0.96	-4.2	4.97	7.53	-2.2	12.89	29.6	34	27.36	17	-42.6	-9.2

Fuente: elaboración propia con datos de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

Cuadro 4. Pronóstico de la temperatura máxima en un escenario lejano 2075-2099.

T°C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual	20	20.9	21.8	22.2	21.4	19.8	20	19.4	19	19.6	20.4	20.3
Francés	20.6	21.6	22.1	23.2	22.7	19.8	20.7	20	20.3	22.1	22.7	22.9
EUA	23.2	24.8	26	26.6	26.3	25.2	24	25.3	24.7	25.3	23.9	24.4
Reino Unido	24.1	24.7	26.3	26.8	26.7	24.7	24.8	26.6	25.5	25.7	23.9	24.4
Prm fut	22.6	23.7	24.8	25.5	25.2	23.2	23.2	24	23.5	24.4	23.5	23.9
Dif fut	2.6	2.8	3	3.3	3.8	3.5	3.2	4.5	4.5	4.8	3.1	3.58

Fuente: elaboración propia con datos de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

y el del Reino Unido, por casi 4 °C cada mes, y en menor medida, el modelo francés, que presenta un incremento de alrededor de 3 °C. En general, para el escenario lejano, habrá incrementos de temperatura máxima de hasta 4.8 °C para el mes de octubre y un mínimo incremento de 2.6 °C para enero.

En el Cuadro 5, se muestra una comparación entre la temperatura mínima mensual actual y la que pronostican cada uno de los tres modelos estudiados anteriormente. Se puede ver un incremento en la temperatura que pronostican los modelos, en mayor cantidad el estadounidense y el del Reino Unido, por casi 4 °C cada mes y en menor medida, el modelo francés, que presenta un incremento en alrededor de 3 °C. En general, las temperaturas mínimas, tendrán un incremento entre 3.9 °C para enero y de 5.2 °C para octubre.

DISCUSIÓN

Al analizar los datos meteorológicos, se observó una tendencia de incremento a futuro en las temperaturas tanto máxima (de hasta casi 4° C); como mínima (de alrededor de 3 °C), mientras que actualmente, se presentan cada vez más días con temperaturas altas, menor cantidad de días con temperaturas bajas, mayor presencia de periodos fríos y estos, cada vez con mayor duración, una diferencia cada vez mayor entre la temperatura máxima y la mínima, mayor cantidad de noches frías, menor presencia de noches cálidas, mayor presencia de periodos con días calurosos y cada vez de mayor duración, tal como lo que dedujeron Velasco-Hernández *et al.* (2015) para Ciudad Serdán en Puebla.

En cuanto a la precipitación, se observó que, en promedio, no existe una tendencia significativa de incremento, tal como lo que dedujeron Zarazúa-Villaseñor *et al.* (2014) para el golfo sur en México, porque en algunas estaciones, se tiene tendencia positiva, pero en el resto, la tendencia es negativa. Con el resto de los índices, se observa un incremento en el número de días en un año, en que la precipitación es mayor a 25 mm (Figura 3b), también aumenta la cantidad de días secos consecutivos, mayor número de días húmedos consecutivos, días cada vez más húmedos, mayor lamina precipitada en un día, mayor lámina precipitada en cinco días consecutivos, disminución en los días lluviosos, disminución en la cantidad de días con láminas bajas y mayor presencia de lluvias torrenciales.

Cuadro 5. Pronóstico de la temperatura mínima en un escenario lejano 2075-2099.

T °C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Actual	7.3	7.5	8.0	8.8	9.4	9.2	9.2	9.1	9.2	8.9	8.5	7.8
Francés	10	10.4	11.3	12.4	13.1	13.3	12	12.8	12.9	12.8	11.8	10.4
EUA	11.2	11.4	12.3	13.3	15.5	15	14.5	13.4	14.1	15	13.4	12.9
Reino Unido	12.3	12.5	12.5	13.6	14.5	14.4	14.6	15	15.5	14.5	13.8	13.1
Prm fut	11.2	11.4	12.0	13.1	14.4	14.2	13.7	13.7	14.2	14.1	13.0	12.1
Dif fut	3.9	4.0	4.0	4.3	4.9	5.1	4.5	4.6	5.0	5.2	4.5	4.4

Fuente: elaboración propia con datos de <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas>.

CONCLUSIONES

En el Estado de Oaxaca, se detectó una falta de datos que imposibilitaba el análisis del cambio climático en algunas regiones. Finalmente, fue esta cuenca, también del Estado de Oaxaca, la que presentó las series históricas de datos del clima más completas.

Se pudo observar que, de los 27 índices analizados en las 24 estaciones meteorológicas, presentan una tendencia de incremento significativa en los siguientes índices: incremento de las temperaturas máximas, incremento entre la diferencia entre temperatura mínima y máxima en un mes, un incremento de días con lluvia diaria mayor a 25 mm y un incremento de índice simple de intensidad diaria de lluvia. También se encontró un incremento considerable de los días secos consecutivos. En resumen, hay lluvias más intensas y periodos de sequía más largos.

En la proyección escenario lejano (2075-2099), se observó que se espera una nueva distribución mensual de la lluvia a través del año, un aumento en la temperatura máxima y un aumento en la temperatura mínima, es decir, un clima más extremo. Por lo tanto, considerando el análisis de los datos históricos de 29 estaciones y sus proyecciones respectivas a lejano plazo, se concluye que, sí existen tendencias en el clima en la cuenca del río Atoyac en Oaxaca.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo otorgado para llevar a cabo este trabajo.

REFERENCIAS

- Bárcena A, Prado A, Samaniego J, Pérez R. 2015. El cambio climático: evidencia y escenarios futuros. *In*: La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, 1a Ed. ONU: Santiago de Chile. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ca0445d3-e3f3-4f40-a5ff-057a9a34f016/content>. pp: 15-21.
- Campos, FD. 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico, capítulo 4 Precipitación: págs. 12-18. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.
- Climate Engine Organization. 2023. App Climate Engine. <https://app.climateengine.org/login>. Fecha de consulta marzo 2023.
- De la Fuente-Meraz A, Olivera-Villarreal S. 2018. El Cambio Climático en México. *In*: Impactos socioeconómicos del cambio climático en México, 1ª Ed.; UAM, CDMX, México. . http://dccc.cua.uam.mx/libros/investigacion/cambio_climatico_impactos_socioeconomicos.pdf. 19 P.
- De la Mora-Orozco C, Ruiz-Corral J, Flores-López H, Zarazúa-Villaseñor P, Ramírez-Ojeda G, Medina-García G, Chávez-Durán A. 2016. Índices de cambio climático en el estado de Chiapas, México, en el periodo 1960-2009. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (13). 2523-2534. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe13/2007-0934-remexca-7-spe13-2523-en.pdf>.
- Díaz-Cordero G. 2012. El cambio climático. *Ciencia y sociedad*, XXXVII: 227-240. <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>.
- Ellis A, Romero-Montero J, Hernández-Gómez I, Anta-Fonseca S, López-Paniagua J. 2017. Deforestación y sus determinantes. *In*: Determinantes de la deforestación en el estado de Oaxaca. Alianza México para la reducción de emisiones por deforestación y degradación: Ciudad de México: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), The Nature Conservancy (TNC). <https://sis.cnf.gob.mx/wp-content/plugins/conafor-files/2018/nacional/catalogo/biblioteca/192.pdf>. pp: 9-28.
- Figuroa-Gallegos J. 2017. Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII(6). 137-143. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-10>
- González D, Vermonden A, Gress F. 2021. Municipios Vulnerables al cambio climático con base en los resultados del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. INECC. 60 p.

- INECC. 2019. Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Edición (libro electrónico). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Disponible en: https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf.
- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático UNAM. 2023. Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. <https://atlasclimatico.unam.mx/cmip5/visualizador>.
- INEGI. 2007. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250 000 Serie II Continuo Nacional Oaxaca. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235291>.
- INEGI. 2008a. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- INEGI. 2008b. Red hidrográfica edición 2.0. Cuenca R. Atoyac. Región H. Costa Chica - Río Verde. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825006894>.
- INEGI. 2018. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Working Group Contribution to the Sixth Assessment Report for the IPCC.
- Jaimes J, Ibáñez L, Arévalo G, Vázquez M, Monterroso A. 2021. Tendencias en la precipitación diaria de la cuenca alta Laja-Peñuelitas, Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7). <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2919>.
- Kachok R, Ivanova A. 2019. Índices de cambio climático en la reserva de la biósfera el Vizcaíno, Baja California Sur, México (1960-2012). *Revista Brasileña de Climatología*, 24, 67-93. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.51845>.
- Mendoza-Aguilar B. 2019. Homogeneización de datos climáticos y análisis de eventos extremos de precipitación en la zona del monzón de América del Norte. Tesis para obtener el título de Maestría en Ciencias en Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), Ensenada, Baja California, México, 2019 https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2783/1/Tesis_Brenda_Yutziny_Mendoza_Aguilar_21feb2019.pdf.
- SMN. 2023a. Información Estadística Climatológica. Recuperado el 31 de 10 de 2023, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.
- SMN, 2023b. Ciclones tropicales en el océano Pacífico y en el Océano Atlántico en México. Recuperado el 2 de noviembre de 2023 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>.
- UNITED NATIONS. 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. 25 p.
- Vázquez-Aguirre J.L. 2010. Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. INEC. México. 88 p.
- Vázquez-Aguirre J, Brunet MD, Jones P. 2008. Cambios observados en los extremos climáticos de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz, México a partir de datos diarios. *Asociación Española de Climatología*, 447-456. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/8657>.
- Velasco-Hernández M, Morales-Acoltzi T, Estrella-Chulim N, Díaz-Ramos R, Juárez-Sánchez J, Hernández-Vázquez M, Bernal-Morales R. 2015. Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7). 1587-1599. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n7/v6n7a13.pdf>.
- Wang X, Feng Y. 2013. ETCCDI Climate Change Indices. Obtenido de <https://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>.
- Zarazúa-Villaseñor P, Ruiz-Corral J, Ramírez-Ojeda G, Medina-García G, Rodríguez-Moreno V, de la Mora-Orozco C, Durán-Puga N. 2014. Índices de extremos térmicos en las Llanuras Costeras del Golfo Sur en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (10). 1843-1857. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5nspe10/2007-0934-remexca-5-spe10-1843-en.pdf>.
- 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>.
- Zorrilla M, De la Lanza G, González I, Martínez A, Hernández S. 2017. Área de estudio. *In: Enfoque integrado ambiental de la determinación del caudal ecológico y su asociación con la conservación de cuencas hidrográficas: ejemplo de caso río Verde Atoyac, en el Estado de Oaxaca*, 1ª Ed. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México.