



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO
CIENCIAS ATMOSFÉRICAS, ESPACIALES Y PLANETARIAS

CAMBIOS DE LA TEMPERATURA MÁXIMA Y LA TEMPERATURA MÍNIMA Y SU VINCULACIÓN CON EL
DESARROLLO URBANO DE LA CIUDAD DE XALAPA - ENRÍQUEZ, VERACRUZ.

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
LCA. MARYAM NAVA ASSAD

TUTORA
DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO, OCTUBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos:

El principal agradecimiento es a Dios que me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante.

A mi esposo por estar siempre conmigo y ser el motor que impulsar para lograr mis sueños y que siempre ha estado a mi lado.

A mis padres y hermanos que han sido mis mejores guías de vida y siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos.

A la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez gracias por dedicación, paciencia, consejos y formar parte importante en mi vida académica y profesional con sus aportes profesionales que lo caracterizan.

A mis sinodales por su orientación y comentarios para enriquecer este documento.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| ÍNDICE..... | 3 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 4 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 5 |
| Tablas y Figuras de los Anexos | 6 |
| ACRÓNIMOS..... | 8 |
| RESUMEN | 9 |
| Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 1.1.- JUSTIFICACIÓN | 15 |
| 1.2.- OBJETIVO..... | 16 |
| 1.3.- HIPÓTESIS..... | 17 |
| Capítulo 2.- ANTECEDENTES..... | 17 |
| 2.1.- DESARROLLO URBANO | 17 |
| 2.2.- CLIMA URBANO | 20 |
| Capítulo 3.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 24 |
| 3.1.- XALAPA - ENRÍQUEZ | 25 |
| Aspectos sociales y demográficos | 26 |
| Vegetación..... | 26 |
| Climatología..... | 27 |
| Hidrología | 30 |
| Actividades económicas | 30 |
| Capítulo 4.- METODOLOGÍA | 30 |
| 4.1.- DESARROLLO URBANO | 33 |
| Aumento de población | 34 |
| Expansión de la superficie de la ciudad..... | 35 |
| Urbanización..... | 37 |
| 4.2.- PROCESAMIENTO DE DATOS CLIMÁTICOS | 43 |
| Control de Calidad | 50 |
| Homogeneización | 60 |
| Cálculo de Índices de Cambio Climático | 64 |
| Ondas de Calor | 82 |
| Capítulo 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 86 |
| Capítulo 6.- PROPUESTAS DE MEDIDAS..... | 94 |
| Capítulo 7.- CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES | 98 |
| REFERENCIAS..... | 101 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| <i>Anexo I.- Control de Calidad</i> | 110 |
| Estación: Ánimas 30087 | 110 |
| Estación: Xalapa 30228..... | 115 |
| <i>Anexo II.- Homogeneización</i> | 120 |
| Estación: Las Ánimas 30087 | 120 |
| Estación: Xalapa 30228..... | 123 |
| <i>Anexo III.- Índices de Cambio Climático</i> | 126 |
| Estación: Las Ánimas 30087 | 126 |
| Estación: Xalapa 30228..... | 131 |
| <i>Anexo VI.- Ondas de Calor</i> | 135 |
| <i>Estación: Xalapa 30228</i> | 135 |
| Estación: Ánimas 30087 | 137 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Métodos para estimar el efecto urbano utilizando observaciones..... | 32 |
| Tabla 2. Datos de población para la ciudad de Xalapa - Enríquez de 1940 a 2020 e incrementos porcentuales con respecto al censo anterior. | 34 |
| Tabla 3. Reclasificación de las descripciones de las series de uso de suelo y vegetación de INEGI. . | 38 |
| Tabla 4. Superficie por tipo de suelo en las siete series de INEGI. | 39 |
| Tabla 5. Porcentaje de tipo de uso de suelo por serie de INEGI..... | 40 |
| Tabla 6. Matriz de cambio de uso de suelo de 1993 a 2018..... | 40 |
| Tabla 7. Estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio..... | 46 |
| Tabla 8. Gráficas de temperatura máxima y mínima de las estaciones presentes en el área de estudio..... | 47 |
| Tabla 9. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones por variables. | 49 |
| Tabla 10. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones por variables con periodos modificados. | 51 |
| Tabla 11. Archivo de los errores lógicos detectados. | 53 |
| Tabla 12. Outliers de la estación de Observatorio..... | 54 |
| Tabla 13. Saltos detectados en las series de datos de la temperatura mínima y su relación con factores que propician los brincos..... | 64 |
| Tabla 14. Formas de cálculo para los 27 índices de cambio climático..... | 65 |
| Tabla 15. Pendiente, desviación estándar y significancia de los índices de cambio climático para la estación Observatorio 30075. | 67 |
| Tabla 16. Total de ondas de calor de las tres estaciones..... | 84 |
| Tabla 17. Número de ondas de calor por año, duración de cada onda y mes de ocurrencia en la Estación Observatorio. | 85 |
| Tabla 18. Características de las estaciones climatológicas seleccionadas..... | 89 |
| Tabla 19. Índices evaluados para las tres estaciones..... | 90 |
| Tabla 20. Frecuencia de ondas de calor por año y días acumulados por estación | 93 |

| | |
|--|----|
| Tabla 21. Propuestas de medidas para incrementar la resiliencia y la capacidad adaptativa ante el incremento de la temperatura mínima y máxima de la ciudad de Xalapa - Enríquez | 95 |
| Tabla 22. Identificación de población vulnerable ante la ocurrencia de una onda de calor. | 96 |
| Tabla 23. Nivel de alertamiento de acuerdo con el percentil de la temperatura máxima y mínima | 97 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localidad urbana de Xalapa - Enríquez. | 26 |
| Figura 2. Climatología mensual de la temperatura máxima, mínima y precipitación de la estación Xalapa. Fuente: Elaboración propia con datos del SMN,2020. | 27 |
| Figura 3. Comportamiento de la temperatura mínima (arriba) y máxima (abajo) en el año Niño (1997-1998) contra la climatología 1951-2010. Fuente: Elaboración propia con datos del SMN. | 30 |
| Figura 4. Comparación entre el crecimiento poblacional (barras) y el incremento de la superficie (línea azul) en Xalapa - Enríquez, Ver., entre 1950 y 2010. | 35 |
| Figura 5. Crecimiento de la mancha urbana de la Localidad de Xalapa - Enríquez. | 37 |
| Figura 6. Transición de 1993 a 2018 en los tipos de suelo: suelo agrícola y de cultivo (SA), suelo forestal (SF) y suelo urbano (SU). | 41 |
| Figura 7. Metodología para el cálculo de los índices de cambio climático. | 42 |
| Figura 8. Visualización del portal del CICESE-CLICOM. | 43 |
| Figura 9. Portal del Servicio Meteorológico Nacional. | 44 |
| Figura 10. Distribución geográfica de las estaciones climatológicas en la localidad urbana de Xalapa - Enríquez y municipio de Xalapa. | 45 |
| Figura 11. Carpeta de la estación de Observatorio con las subcarpetas generadas por el control de calidad. | 52 |
| Figura 13. Gráficos de caja y bigotes de los valores de temperatura máxima (TX) y mínima (TN) para cada mes. | 55 |
| Figura 14. Gráficos de caja y bigotes de los valores de temperatura máxima (TX) y mínima (TN) para cada año. | 56 |
| Figura 15. Ejemplo de archivo de texto con los outliers identificados. | 56 |
| Figura 16. Histogramas de las cifras decimales en los datos de las series de tiempo de temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha). | 58 |
| Figura 17. Archivo de las fechas con la información de los valores que se repiten al menos tres veces de manera consecutiva en las series de tiempo. | 58 |
| Figura 18. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C. | 59 |
| Figura 19. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia. | 61 |
| Figura 20. Ajustes de la base de datos. | 62 |
| Figura 21. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima. | 63 |
| Figura 22. Índice Días de verano (SU25= Tmax>25) para la estación de Observatorio. | 68 |
| Figura 23. Índice noches tropicales (TR20= Tmin> 20°C) para la Estación de Observatorio. | 69 |
| Figura 24. Índice de frecuencia de días calurosos (TX90P= Tmax>90percentil) para la Estación de Observatorio. | 70 |
| Figura 25. Índice de frecuencia de días frescos (TX10P= Tmax<10percentil) para la Estación de Observatorio. | 71 |
| Figura 26. Índice de frecuencia de noches cálidas (TN90P= Tmin>90percentil) para la Estación de Observatorio. | 72 |

| | |
|---|----|
| Figura 27. Índice de frecuencia de noches frías (TN10P= Tmin<10percentil) para la Estación de Observatorio..... | 73 |
| Figura 28. Índice de temperatura máxima extrema (TXX) para la Estación de Observatorio..... | 74 |
| Figura 29. Índice de temperatura máxima más baja (TXN) para la Estación de Observatorio. | 75 |
| Figura 30. Índice de temperatura mínima más alta (TNX) para la Estación de Observatorio..... | 76 |
| Figura 31. Índice temperatura mínima extrema (TNN) para la Estación de Observatorio. | 77 |
| Figura 32. Índice de duración de los periodos cálidos (WSDI= por lo menos 6 días consecutivos: Txij > Txen90). | 78 |
| Figura 33. Índice de duración de los periodos fríos (CSDI= por lo menos 6 días consecutivos: Tnij < Tnen10)..... | 79 |
| Figura 34. Cambio en el clima puede conducir a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de los eventos extremos. Fuente: (IPCC, 2012). | 81 |
| Figura 35. Frecuencia de la ocurrencia de ondas de calor de 1982 a 2022 en la estación de Observatorio de Xalapa. Donde las columnas representan años de El Niño (rojo), La Niña (azul) y Neutro (grises). Fuente: Elaboración propia con datos del SMN. | 84 |
| Figura 36. Superposición de polígonos correspondientes a la mancha urbana de la localidad de Xalapa y la ubicación de las estaciones meteorológicas..... | 87 |
| Figura 37. Cambio de uso de suelo en la estación y sus alrededores..... | 88 |
| Figura 38. Comparación del comportamiento del índice de días de Verano (Tmax>25°C) en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio. | 91 |
| Figura 39. Comparación del comportamiento del índice de temperatura máxima extrema en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio. | 92 |
| Figura 40. Comparación del comportamiento del índice de frecuencia de días calurosos en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio. | 92 |

Tablas y Figuras de los Anexos

| | |
|--|-----|
| Tabla A.1. Saltos detectados en las series de datos de la estación Las Ánimas y su relación con factores que propician los puntos de cambio..... | 123 |
| Tabla A.2. Saltos detectados en las series de datos de la estación Xalapa y su relación con factores que propician los puntos de cambio..... | 125 |
| Tabla A. 3. Pendiente de los índices de cambio climático para la estación de Las Ánimas 30087. . | 126 |
| Tabla A. 4. Pendiente de los índices de cambio climático para la estación de Xalapa 30228. | 131 |
| Figura A.1.Serie de datos de Temperatura Máxima y Mínima para la Estación Las Ánimas 1954-1994. | 110 |
| Figura A.2.Gráfico de cajas y bigotes de la representación de los promedios anuales de la temperatura máxima (TX) y la mínima (TN). | 112 |
| Figura A.3.Gráfico de cajas y bigotes de la representación de la serie de tiempo de la temperatura máxima (TX), la mínima (TN). | 112 |
| Figura A.4.Histograma de valores decimales de la serie de tiempo. | 114 |
| Figura A.5. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C. | 114 |
| Figura A.6. Serie de datos de Temperatura Máxima y Mínima para la Estación Xalapa 1952-1981. | 116 |

| | |
|--|-----|
| Figura A.7. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de los promedios anuales de la temperatura máxima (TX) y la mínima (TN). | 117 |
| Figura A.8. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de la serie de tiempo de la temperatura máxima (TX), la mínima (TN). | 117 |
| Figura A.9. Histograma de valores decimales de la serie de tiempo. | 118 |
| Figura A.10. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C. | 119 |
| Figura A.11. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia. | 120 |
| Figura A.12. Ajustes de la base de datos | 120 |
| Figura A. 13. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia de la temperatura máxima. | 121 |
| Figura A. 14. Ajustes de la base de datos. | 121 |
| Figura A. 15. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima. | 121 |
| Figura A. 16. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura máxima. | 122 |
| Figura A. 17. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia. | 123 |
| Figura A. 18. Ajustes de la base de datos. | 124 |
| Figura A. 19. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia temperatura máxima. | 124 |
| Figura A. 20. Ajustes de la base de datos. | 124 |
| Figura A. 21. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima. | 124 |

ACRÓNIMOS

| | |
|----------|--|
| CENAPRED | Centro Nacional de Prevención de Desastres |
| CICESE | Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada |
| CLICOM | CLimate COMputing |
| CLIVAR | Proyecto de Variabilidad Climática, por sus siglas en inglés |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua |
| ENOS | El Niño Oscilación del Sur |
| ETCCDI | Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático, por sus siglas en inglés |
| IPCC | Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés |
| JCOMM | Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima, por sus siglas en inglés |
| OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| PIB | Producto Interno Bruto |
| QM | Quantile-Matching |
| SA | Suelo Agrícola y de Cultivo |
| SF | Suelo Forestal |
| SIH | Sistema de Información Hidrológica |
| SMN | Servicio Meteorológico Nacional |
| SU | Suelo Urbano |

RESUMEN

En los estudios de cambio climático, las ciudades se han convertido en actores clave; ya que emiten más de la mitad de los gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global, y en ellas vive la mayoría de la población humana. En las ciudades hay modificaciones climáticas locales, por los cambios en las características en el territorio, que entre otros factores que producen la llamada isla de calor. El aumento de la temperatura global se suma entonces a la propia dinámica de aumento de las temperaturas locales, lo que incrementa la vulnerabilidad de la población urbana.

La presente tesis parte de la hipótesis que el desarrollo urbano modifica el comportamiento de las variables climatológicas, principalmente las temperaturas extremas (máxima y mínima). Específicamente, se plantea que el aumento de la temperatura máxima y la temperatura mínima en la ciudad de Xalapa - Enríquez, Veracruz, está relacionado con la expansión de la ciudad, el incremento de su población y la urbanización.

El área de estudio seleccionada es la localidad urbana de Xalapa - Enríquez, la capital del estado de Veracruz, que comenzó su transformación a un ámbito urbano desde 1830, cuando adquirió la categoría de ciudad. Este desarrollo urbano claramente está asociado con la pérdida y fragmentación de vegetación y el incremento de la población.

Para saber si el clima ha cambiado en la ciudad, se parte de considerar las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio que cumplieron con los criterios necesarios para evaluar los índices de detección de cambio climático seleccionados, y el análisis de la ocurrencia de ondas de calor.

Dichos análisis dieron las bases para poder emplear la metodología de diferencia entre pre-urbano y urbano, que consiste en captar la transformación en el tiempo de un paisaje. Lo anterior se implementó al vincular la fecha en la que la estación meteorológica comenzó a formar parte de la mancha urbana, y el cambio en el comportamiento de los índices de cambio climático y la frecuencia en la ocurrencia de ondas de calor. Estos métodos pueden ser útiles para otras regiones en México y ser aplicables en otras latitudes.

Para la ciudad de Xalapa – Enríquez se ha encontrado que en el período de estudio la temperatura máxima y mínima tienden a aumentar, lo cual nos habla de un clima más cálido y en el caso de algunos índices después del cambio de uso de suelo de la estación de pre-urbano a urbano la tendencia es más acelerada. Se obtuvo que

la ocurrencia de las ondas de calor depende de las características del entorno, la altitud y el uso de suelo donde se ubica la estación meteorológica. También se muestra que no existe una relación tan directa con la variabilidad climática asociada al fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), como ocurre en otras regiones. Esta tendencia se puede relacionar con desarrollo urbano sin planeación al no identificar zonas de conservación de vegetación que sirvan para regular los cambios en la temperatura. Otro factor a considerar es que el crecimiento de la mancha urbana que se ha presentado de 1985 a 2018 ha sido acelerado y el 32% del área se ha transformado de suelo forestal a urbano y el 2% de agrícola a urbano, lo cual se asocia a un proceso de deforestación

Ante un creciente proceso de urbanización y bajo condiciones de cambio climático se espera que las temperaturas mínima y máxima se sigan incrementando, posiblemente de manera más acelerada a lo observado. Esto conllevaría a una mayor frecuencia de ondas de calor, con implicaciones adversas en la población, los ecosistemas e infraestructura de la ciudad. Así, en este trabajo se analizan una serie de posibles medidas que pueden ser implementadas desde ahora. Estas acciones incluyen desde ajustes a los instrumentos de planeación urbana, hasta la preservación, modificación y creación de áreas verdes, así como el fortalecimiento de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de golpes y ondas de calor.

La contribución de esta tesis es contar con un análisis completo a partir de metodologías robustas desarrolladas por instituciones líderes en el tema (como el Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED), por ejemplo) que se complementan para construir el diagnóstico del comportamiento de la temperatura mínima y máxima en la ciudad de Xalapa – Enríquez. A partir de ello, este trabajo también contribuye en proponer medidas y acciones, las cuales parten del análisis de área de oportunidad de los instrumentos de planeación y de política climática con los que cuenta el área de estudio para atender la problemática climática identificada.

Estas acciones buscan ser orientadoras para los tomadores de decisiones y actores clave en la formulación de política pública y que podrían ser incluidas en su agenda sectorial, que ayuden a incrementar la capacidad adaptativa y disminuir la sensibilidad de la ciudad ante el incremento de la temperatura, local y global.

Capítulo 1.- INTRODUCCIÓN

El sexto informe del IPCC indica que las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de las actividades humanas son responsables de un calentamiento global de aproximadamente 1.1°C desde 1850-1900, y se prevé que la temperatura mundial promediada durante los próximos 20 años alcanzará o superará un calentamiento de 1.5°C respecto a la era industrial (IPCC, 2022; OMM, 2022).

Para enfrentar esta situación se creó el Acuerdo de París que tiene como objetivo limitar el calentamiento mundial por debajo de 2°C, preferiblemente a 1.5°C, en comparación con los niveles preindustriales (1850-1900). Es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante de 196 países firmantes y miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Fue adoptado el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. El Acuerdo hace que todos los países se unan en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos (CMNUCC, 2016).

Sin embargo, es claro que no en todas las regiones se ha presentado un calentamiento de la misma magnitud, existiendo la posibilidad de que los cambios observados no sean significativos, o que incluso existan decrementos. A nivel mundial se identificó que, para la superficie continental, el año 2021 fue el quinto más cálido y el séptimo para los océanos. Es decir, el promedio global de temperatura registrado durante 2021 significó una temperatura por encima de 1.1°C respecto a los promedios preindustriales. Los tres primeros lugares de la clasificación son 2016 como el más cálido, seguido de 2019 y 2020; tomando en cuenta que el evento intenso de El Niño durante 2016 contribuyó a un calentamiento global sin precedentes (CONAGUA, 2021).

Los cambios en el sistema climático a través del tiempo pueden deberse ya sea a variaciones en la dinámica interna del sistema, o bien a la presencia de forzamientos externos. La dinámica interna es el resultado de los procesos de interacción entre los diversos componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, biósfera y la superficie terrestre); los forzamientos externos, por otra parte, pueden ser de origen natural (variaciones en la actividad solar o en la actividad volcánica) o de origen humano (aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo, entre otros) (Gulev *et al.*, 2021; Hamdi *et al.*, 2020 y Conde, 2003).

La distinción entre los entornos urbanos y rurales circundantes radica en sus diferentes tipos de superficie. En términos cualitativos, las zonas rurales cuentan

con un paisaje natural o agrícola que se caracteriza por la vegetación y un suelo suelto, generalmente esponjoso y permeable. El área urbana, en contraste, tiene una superficie impermeable altamente compactada. Estas superficies contrastantes tienen diferentes capacidades caloríficas y de conductividad de calor. La manifestación climática más obvia de la urbanización es la tendencia hacia temperaturas del aire más altas (Landsberg, 1981; Delgado-Ramos, 2014 y Hamdi *et al.*, 2020).

Las ciudades se han convertido en actores clave en los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático debido al papel relevante que tiene para la sociedad y la economía. En ellas habitan 4,200 millones de personas (Dodman *et al.*, 2022), que constituyen poco más del 50% de la población humana, y se estima que otros 2,500 millones de personas vivirán en áreas urbanas para el año 2050. La mayor parte de ese crecimiento urbano se dará en países en vías de desarrollo, donde las emisiones per cápita son actualmente bajas, pero es posible que aumenten con la construcción habitacional, nueva infraestructura y posiblemente con los cambios en los ingresos y estilos de vida (Lwasa *et al.*, 2022).

Los esfuerzos principales por mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global de origen antropogénico se realizan en las ciudades, ya que emiten más de la mitad de esos, aunque sólo ocupan entre el 1% y 3% de la superficie planetaria (Guo-Yu, 2015 y Oke *et al.*, 2017). Así, aun cuando en las últimas décadas se ha acelerado el calentamiento en las ciudades, ese aumento de temperatura es insignificante con respecto al calentamiento global, sin embargo es significativo a nivel local (Hamdi *et al.*, 2020 y IPCC-WGI, 2021).

En las ciudades ocurre el llamado “efecto urbano”, ya que éstas suelen ser más cálidas que su entorno, aunque en algunos casos puede ocurrir lo contrario (Tejeda-Martínez *et al.*, 2016). Este efecto se conoce como isla de calor urbana (Guo-Yu, 2015; Oke *et al.*, 2017 y Hamdi *et al.*, 2020). El efecto inmediato de esta isla de calor es el aumento frecuente de las temperaturas extremas (máxima y mínima) locales, aunque también se han observado alteraciones en el ciclo del agua (que incluye el aumento de las lluvias torrenciales), y cambios en el patrón de vientos y de humedad atmosférica (IPCC, 2021).

Estos cambios a nivel local se generan al reducir las superficies de vegetación (cambio de uso de suelo) y de cuerpos de agua, por el uso de materiales de construcción para edificios y casas de diferente altura, calles y otras vías de comunicación que definen la arquitectura urbana (Jáuregui, 2009; Guo-Yu, 2015 y Doblaz-Reyes *et al.*, 2021). El estudio del clima urbano y el planteamiento de acciones para disminuir la tendencia de aumento de la temperatura local (que puede

exacerbarse con el cambio climático global) constituyen uno de los temas centrales en las acciones de adaptación, que idealmente deberían aportar co-beneficios a las de mitigación y viceversa.

Para el caso de México, más del 80% de la población habita en zonas urbanas (Grupo Banco Mundial, 2019). Por ello, existe un interés especial en el país en analizar el impacto de la urbanización en las condiciones climáticas para ciudades con diferente grado de desarrollo (ver capítulo 5) (Guo-Yu, 2015; García-Cueto *et al.*, 2019). Específicamente, una consecuencia directa de la creación o expansión de las ciudades o metrópolis es la alteración del balance de energía que existe naturalmente. Al transformar la cobertura vegetal a urbana, la nueva superficie caracterizada por calles, construcciones, tránsito vehicular, industrias, entre otros, llega a modificar el clima e hidrología de la región, creando un nuevo microclima debido a la urbanización.

La transferencia de radiación es alterada respecto al comportamiento normal, lo que conlleva a que en las ciudades haya un estancamiento de calor, ya que éste queda atrapado por las grandes edificaciones impidiendo una circulación adecuada (Oke, 2002; Guo-Yu, 2015; Oke *et al.*, 2017 y Hamdi *et al.*, 2020). En síntesis, en las ciudades hay factores que atrapan el calor y carecen de factores que la enfrían, como la vegetación y los cuerpos de agua (IPCC-WG1, 2021a).

Las afectaciones térmicas locales repercuten en la población, al contribuir con una aportación extra de calor a las condiciones, tanto sanitarias como de confort. Esta influencia urbana puede tener un efecto positivo en la época invernal y negativo en los meses más calurosos. Entre más extensa y densa sea la cubierta urbana, mayor será el efecto del ambiente térmico en la salud de los habitantes (Luyando, 2016).

El desarrollo urbano es función de la expansión de la superficie de una ciudad, el aumento de su población y la urbanización desmedida, como se ha presentado en México. Se atribuye a grandes problemas en la parte de planificación de las zonas urbanas y puede tener impactos en la formulación de políticas públicas.

Desde esta perspectiva, surge la siguiente pregunta central para esta tesis: ¿Cómo ha impactado el desarrollo urbano en el comportamiento de las variables de temperatura máxima y mínima en la ciudad de Xalapa - Enríquez, en el estado de Veracruz, en las últimas décadas? En su último reporte, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sugiere que, en las condiciones actuales y en el contexto de cambio climático “se debe prestar más atención a las ciudades pequeñas y medianas en rápido

crecimiento y sus necesidades de adaptación desde la perspectiva de la reducción de la vulnerabilidad y la pobreza” (Birkmann *et al.*, 2022).

Por lo anterior, esta tesis se presenta un análisis de las series climáticas de la ciudad de Xalapa - Enríquez, Veracruz, que muestran el impacto del desarrollo urbano en el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas. Lo anterior por medio del análisis de tendencias de los índices de cambio climáticos seleccionados del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), así como el análisis de la ocurrencia de ondas de calor y de la comparación del comportamiento de los dos puntos anteriores durante los periodos pre-urbano y urbano en las estaciones meteorológicas seleccionadas. Parte de la hipótesis: el desarrollo urbano modifica el comportamiento de las variables climatológicas, principalmente las temperaturas máximas y mínimas haciendo que tiendan a ser más cálidas.

A continuación, se describe de forma sintética cuál es el contenido de cada uno de los capítulos. En el capítulo 2 se muestra los antecedentes para los dos temas fundamentales que son el desarrollo y el clima urbano, mostrando los trabajos que se han desarrollado en el área de estudio. El capítulo 3 da una descripción del área de estudio resaltando los principales aspectos ambientales y sociales.

En el capítulo 4 se plantea la metodología para el cálculo del impacto de la urbanización basada en la comparación de la diferencia del periodo pre-urbano y urbano de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Se realiza por medio del cálculo de los índices de cambio climático y las transiciones del cambio de uso de suelo, entre otros, mostrando a detalle las particularidades para el procesamiento de los datos climáticos y de desarrollo urbano.

El capítulo 5 muestra los resultados y discusión de la vinculación del desarrollo urbano y el cambio en el comportamiento de la temperatura máxima y mínima de la ciudad de Xalapa – Enríquez, a través de los índices de cambio climático y frecuencia de ondas de calor para las estaciones Las Ánimas y Observatorio que cumplen con las características de tener datos del periodo Pre-urbano y Urbano. En el capítulo 6 se presentan algunas propuestas de medidas y las bases para el desarrollo de un sistema de alerta temprana. Finalmente, el capítulo 7 presenta las conclusiones del estudio y algunas recomendaciones para trabajo futuro.

1.1.- JUSTIFICACIÓN

El aumento de la temperatura o la disminución de la humedad en las ciudades pueden originarse debido a la ausencia o escasez de áreas verdes, ya que el suelo de concreto, los edificios, el flujo vehicular y/o las actividades industriales, impiden una adecuada ventilación y calientan el entorno, lo que provoca aumentos significativos en la temperatura del lugar (Oke, 2002; Guo-Yu, 2015 y Hamdi *et al.*, 2020). Yang *et al.*, (2020) encontraron que la cuarta parte de las publicaciones de las últimas seis décadas, reportan ambientes urbanos más secos que los alrededores rurales, mientras que otra cuarta parte reporta lo contrario, y la mitad de los trabajos encuentran que los déficits y excesos de humedad urbana se alternan en el tiempo.

El sexto informe del IPCC resalta el caso de las ciudades (Dodman *et al.*, 2022), ya que algunos aspectos del cambio climático pueden verse amplificados, en particular la temperatura (ya que las zonas urbanas suelen ser más cálidas que sus alrededores, lo que se denomina isla de calor) y las inundaciones debidas a episodios de precipitaciones intensas y al aumento del nivel del mar en las ciudades costeras (IPCC, 2022).

La tendencia al calentamiento en América Latina y el Caribe continuó en 2021. La tasa media de aumento de las temperaturas fue de aproximadamente 0.2°C por década entre 1991 y 2021, en comparación con 0.1°C por década registrados entre 1961 y 1990 (OMM, 2022). La temperatura media a nivel nacional durante el año 2021 fue de 22.2°C, 1.2°C por arriba del promedio climatológico 1981-2010, y se ubicó como el cuarto año más cálido del registro histórico desde 1953 en México (CONAGUA, 2021).

Las ciudades concentran población, bienes y actividades de alto valor económico y financiero. Estos elementos permiten que las ciudades cuenten con capacidades de respuesta ante fenómenos climáticos, pero esta circunstancia, y el hecho de un crecimiento acelerado y sin una debida planeación las coloca en una condición de vulnerabilidad ante el acontecimiento de fenómenos naturales extremos (Luyando, 2016). En 2018 se proyectó un crecimiento urbano global de la población de 5,167 millones para 2030 y 6,680 millones para 2050, por lo tanto, se espera que las megaciudades se incrementen, lo cual presentará particulares desafíos asociados a los impactos climáticos (Dodman, *et al.*, 2022). En México, más de 80% de la población habita en zonas urbanas (Grupo Banco Mundial, 2019).

Sin lugar a duda, el deterioro ambiental y el crecimiento de la población son los dos principales retos a los que se enfrentan las zonas metropolitanas de México. Entender la interacción entre ambas problemáticas resulta esencial para formular

políticas que se combinen de manera atinada (Aguilar y Escamilla, 2009). Las áreas urbanas y su infraestructura son susceptibles a riesgos derivados de interacciones entre los eventos extremos y el aumento de la urbanización. Las pérdidas se vuelven sistémicas cuando afectan sistemas completos y puede saltar de un sistema a otro (por ejemplo, una sequía que afecta la producción rural de alimentos lo cual contribuyendo a la inseguridad alimentaria urbana) (Dodman, *et al.*, 2022).

Lo anterior resalta la importancia de realizar estudios de clima urbano para la identificación de los cambios observados en las diferentes regiones de México y poder diseñar e implementar medidas para incrementar la resiliencia y capacidad adaptativa de la población, ecosistemas e infraestructura de las ciudades ante condiciones cambiantes de las variables meteorológicas asociadas a procesos locales de urbanización y globales debidos al cambio climático.

Veracruz ocupa el cuarto lugar a nivel nacional por el número de habitantes en la República Mexicana (INEGI, 2020a) y el 62% de su población se encuentra distribuida en las zonas urbanas; el estado cuenta con 345 áreas urbanas contra 19,500 localidades rurales (INEGI, 2020b). La población en el estado de Veracruz no ha dejado de crecer desde 1900 a la fecha. Reporta una aportación al Producto Interno Bruto (PIB) Nacional de 4.5%. La ciudad de Veracruz ocupa el primer puesto como la localidad urbana con mayor población, seguida de la capital del estado Xalapa - Enríquez, con un total de 443,063 habitantes en el año 2020. La capital del estado es una ciudad media que se ubica en la zona centro del estado de Veracruz (Figura 1). Por lo tanto, siguiendo la sugerencia del IPCC (Birkmann *et al.*, 2022), las ciudades medianas, crecen rápidamente, en la que es posible adelantar acciones de adaptación que reduzcan su vulnerabilidad ante cambios climáticos futuros.

1.2.- OBJETIVO

Objetivo general: Demostrar que las tendencias observadas en las series climáticas de las temperaturas máximas y mínimas en la ciudad de Xalapa - Enríquez están asociadas a la transición pre-urbana a urbana (considerando factores como el incremento de la población, la expansión urbana y el cambio de uso de suelo), y analizar la recurrencia de ondas de calor en la región.

Objetivos particulares:

- Emplear los índices del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés) para analizar las tendencias observadas en las temperaturas máximas y mínimas de la región de estudio.

- Analizar la influencia del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (variabilidad climática), en la recurrencia de las ondas de calor en la ciudad de Xalapa – Enríquez.
- Proponer medidas que incrementen la capacidad adaptativa y la resiliencia de la ciudad ante un clima más cálido.
- Sentar las bases para el desarrollo de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de ondas de calor en la ciudad.

1.3.- HIPÓTESIS

Este trabajo parte de la hipótesis que el desarrollo urbano modifica el comportamiento de las variables climatológicas, principalmente las temperaturas máxima y mínima. Para el caso de la ciudad de Xalapa - Enríquez, ese comportamiento está asociado a la urbanización, la expansión de la superficie de la ciudad y el aumento de su población.

Capítulo 2.- ANTECEDENTES

En esta sección se mencionan los diferentes estudios que se han realizado en México o en la zona de estudio, que sirven como base para los temas centrales que se abordan en esta tesis.

2.1.- DESARROLLO URBANO

El crecimiento urbano es la expansión de la superficie de una ciudad y el aumento de su población, mientras que el desarrollo urbano comprende el crecimiento urbano y la urbanización de la ciudad (CONAPO, 2012). En la Ley de desarrollo urbano, ordenamiento territorial y vivienda para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave se define al desarrollo urbano como la “ocupación o transformación del territorio para la realización de actividades urbanas [...] así como otras tendientes a la conservación o modificación del uso o aprovechamiento del suelo” (DOF, 2017).

Se han encontrado diversos esfuerzos donde se analiza el desarrollo urbano por medio de diferentes perspectivas, a continuación, se mencionan los estudios identificados en orden cronológico:

- “ESTUDIO DE VULNERABILIDAD ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN XALAPA Y TLALNELHUAYOCAN, VERACRUZ” (CityAdapt, 2019):

La ciudad de Xalapa ha sufrido una rápida urbanización y expansión no planificada, creciendo hacia terrenos que en muchos casos no son aptos para asentamientos humanos, lo que ha generado una disminución o deterioro de los

ecosistemas urbanos y periurbanos (humedales, áreas verdes y bosques) que proveen diversos servicios ecosistémicos.

Este proceso expansivo de la mancha urbana ha presionado la ocupación de las áreas rurales circundantes, generando problemas asociados con la segregación espacial entre la población de mayores ingresos y las zonas con limitaciones o carencia de servicios e infraestructura básica –asiento de la pobreza en barrios y colonias predominantemente periféricas. Además de deficiencias en la movilidad urbana, seguridad pública, abastecimiento de agua y riesgos originados por la incidencia de fenómenos naturales y antrópicos, entre otros, reduciendo significativamente la calidad de vida de sus habitantes.

- “CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DE LA CIUDAD DE XALAPA - ENRÍQUEZ, VERACRUZ Y ZONAS CIRCUNDANTES ENTRE 1950 Y 2010” (Lemoine Rodríguez, 2012):

Se enfocó en conocer los cambios que sufrió la cobertura vegetal de la ciudad de Xalapa - Enríquez durante el periodo 1950-2010. Se identificó la dinámica espacio-temporal de la ciudad en función de: (1) la expansión de su mancha urbana y la inclusión/exclusión de áreas verdes dentro de esta; (2) los cambios de uso de suelo en su área circundante y (3) la identidad ecológica, referente a la presencia y densidad de especies arbóreas dominantes en áreas verdes urbanas $>0.05 \text{ km}^2$.

La tesis menciona que el crecimiento menos acelerado de la mancha urbana ocurrió en el periodo 1950-1980, aumentando 14 km^2 , y el de mayor rapidez (17.2 km^2) ocurrió en el periodo 1980-1990. En las décadas posteriores el crecimiento fue menor: 13 km^2 en el periodo 1990-2000 y 11.27 km^2 en el periodo 2000-2010. En el periodo de 1950-1990, la ciudad creció en direcciones norte, este y oeste, siendo la dirección norte la que registró el mayor incremento. En el periodo 1990-2010 la ciudad creció principalmente en dirección sureste y en menor proporción hacia el noroeste. La ciudad ha experimentado constantes cambios en su cobertura vegetal. En el periodo 1950-1980 la superficie de áreas verdes disminuyó considerablemente, ya que gran parte de su cobertura interna fue asignada para uso urbano, mientras que en su área circundante no existió la conservación de las áreas de vegetación que se incorporaban a la ciudad con su crecimiento.

- “TENDENCIA EN EL CAMBIO DE USO DE SUELO INDUCIDO POR LOS IMPACTOS AMBIENTALES DEL PROYECTO DEL LIBRAMIENTO DE XALAPA, TRAMO JILOTEPEC – BANDERILLA, VER” (González Aztatzi, 2010)

En esta tesis se realizó un análisis de cambios de usos de suelo usando cartografía de 1991 y 2004, mostrando como resultados la modificación de áreas boscosas a urbanas o agrícolas, la regeneración de áreas agrícolas a bosque y de zonas agrícolas a uso de suelo urbano, los resultados se plasman en la siguiente tabla:

| Matriz de cambios de superficies modificadas en el uso de suelo (ha) en área de estudio del periodo 1991 -2004 | | | |
|--|----------------|----------|--------|
| 2004 1991 | Áreas boscosas | Agrícola | Urbano |
| Áreas boscosas | 1374 | 315 | 51 |
| Agrícola | 121 | 570 | 37 |
| Urbano | | | 218 |

- “PATRONES DE CAMBIO DE COBERTURAS Y USOS DEL SUELO EN LA REGIÓN COSTA NORTE DE NAYARIT” (1973-2000) (Robles, *et al.*, 2010):

En este trabajo se clasificaron imágenes satelitales Landsat de los años 1973, 1990 y 2000 y posteriormente se realizó una comparación post-clasificatoria, con información digital complementaria, para analizar los cambios ocurridos en la cobertura vegetal y los usos del suelo de la región costa del norte de Nayarit. El análisis de las matrices de detección de cambio (1973- 1990, 1990-2000 y 1973-2000) indica que el porcentaje general de cambio en el área en estudio fue próximo al 25% entre periodos y del 30% para el periodo completo (1973- 2000).

- “PATRONES ESPACIALES DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL ÁREA CAFETALERA DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA” (Evangelista, *et al.*, 2010):

El análisis de cambio se realizó mediante una clasificación de dos imágenes de satélite Landsat, y se evaluó el cambio espacial entre 1988 y 2003 mediante una matriz de detección de cambios. En ella se encontró que en el 58.4% del área no hubo cambios y en el 41.6% sí los hubo. Los principales tipos de cambio fueron de pastizal (cultivado e inducido) o agricultura anual a cafetales con sombra, de vegetación secundaria intermedia de bosque tropical o bosque

mesófilo de montaña a cultivo permanente de cítricos; asimismo, el proceso de cambio de cobertura y uso del suelo está relacionado con la problemática del café.

- “PERIURBANIZACIÓN Y SUSTENTABILIDAD EN GRANDES CIUDADES” (Aguilar y Escamilla, 2009):

En este trabajo se consideran como indicadores ambientales los parámetros que permiten monitorear y evaluar el estado en que se encuentran los recursos naturales. El objetivo de este estudio es establecer las tendencias del crecimiento urbano y el deterioro ambiental en el Suelo de Conservación del Distrito Federal a partir de la evaluación de tres indicadores ambientales biofísicos: 1) patrones de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo, 2) un índice de calidad del suelo, y 3) los niveles de amenaza a la presencia de procesos gravitacionales (derrumbes).

2.2.- CLIMA URBANO

El estudio de los procesos físicos, químicos y biológicos que producen cambios en el estado de la atmósfera urbana se conoce como meteorología urbana y el estudio de los estados estadísticos principales del tiempo urbano se denomina climatología urbana (Oke, *et al.*, 2017). Dentro del tema de clima urbano se han realizado diferentes esfuerzos publicados que se resumen por orden cronológico de su aparición:

- “DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ESPACIAL DE LA ISLA URBANA DE CALOR EN LA ZONA PERIFERIA DE LA CIUDAD DE XALAPA EN EL MUNICIPIO DE EMILIANO ZAPATA, VERACRUZ” (Lino Solano, 2019)

Uno de los efectos más evidentes de la urbanización es el fenómeno conocido como Isla Urbana de Calor, caracterizado por la presencia de un ambiente térmico más cálido en zonas urbanas densamente construidas. Se ha detectado que para la ciudad de Xalapa la isla de calor respeta los parámetros y lineamientos teóricos, existiendo mayor temperatura en la zona urbana céntrica. En las localidades de La Pradera y Jacarandas, los asentamientos urbanos han provocado cambios en el clima local debido al cambio de uso de suelo que reduce los recursos naturales y los convierte en zonas con mayor área asfáltica y de vivienda, modificando el clima y aumentando la temperatura con respecto a la zona en los alrededores que posee más vegetación.

- “EFECTOS DE LAS TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES EXTREMAS EN EL BIOCLIMA HUMANO DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR CAMBIO CLIMÁTICO LOCAL Y GLOBAL” (Luyando, 2016):

Muestra un análisis de la relación entre el clima y la urbanización de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y cuáles pueden ser sus posibles efectos en la población, asociados a las modificaciones de las condiciones climáticas de precipitación y temperatura actuales y proyectadas. A continuación, se mencionan los hallazgos más importantes: identificación de los principales hidrometeoros; mayor ocurrencia de desastres en las últimas décadas asociados, principalmente a las condiciones de pobreza, que conducen a la población a asentarse en sitios inconvenientes e inseguros; incremento en la ocurrencia de días cálidos, entre otros.

- “CAMBIO DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN TEMPERATURAS MÁXIMAS EN LA ZONA METROPOLITANA DE XALAPA” (Luevano, 2015):

Tiene como objetivo conocer las características de las ondas de calor desde la década de 1980 a la actualidad, mediante un análisis comparativo de la intensidad de ondas por décadas a lo largo de todo el periodo de estudio para Xalapa, además de un análisis para los municipios de Coatepec, Emiliano Zapata y Jilotepec para el periodo 2000 – 2009.

En la ciudad de Xalapa se observa un evidente aumento en el número de ondas en el periodo 1982 – 2011, sin embargo, esto no se ve tan claro en la intensidad y persistencia máxima. La tabla 5.2 muestra los umbrales de temperatura máxima para definir una onda de calor para cada municipio, así como el número y persistencia máxima de ondas presentadas en el periodo 2000 a 2009.

Tabla 5.2. Análisis de ondas de las cuatro estaciones para el periodo 2000 – 2009.

| Municipio | Umbral de temperatura máxima | No. de ondas | Índice de intensidad | Índice de intensidad | Persistencia máxima (días) |
|------------------|------------------------------|--------------|----------------------|----------------------|----------------------------|
| | | | Valor máximo | Valor mínimo | |
| Coatepec | ≥ 33°C | 59 | 0.90 | 0.45 | 12 |
| Emiliano Zapata* | ≥ 37°C | 26 | 1.00 | 0.49 | 34 |
| Jilotepec | ≥ 31°C | 86 | 0.90 | 0.41 | 13 |
| Xalapa | ≥ 30.4°C | 99 | 0.86 | 0.36 | 11 |

*Emiliano Zapata descartado

- “AUMENTO DE LA TEMPERATURA POR LA PÉRDIDA DE COBERTURA VEGETAL EN LA CIUDAD DE XALAPA, VER: ESTUDIO DE CASO FRACCIONAMIENTO LOMAS DE SANTA FE (HOMEX)” (Gómez Tosca, 2014):

Se encontró que entre los factores que más han incidido en la presencia de las islas de calor, está la reducción de las áreas verdes en las ciudades principalmente por el desarrollo habitacional desmedido. La capacidad de la vegetación de proveer bienes y los servicios ambientales en las ciudades entre ellos: la captura de carbono, la regulación de la temperatura, provisión de agua en calidad y cantidad, generación de oxígeno, amortiguamiento de impacto de fenómenos naturales. La pérdida de la vegetación es particularmente notable debido a que la expansión urbana altera el ambiente biofísico y una de las principales consecuencias es el aumento de la temperatura superficial.

- “ONDAS DE CALOR EN SEIS ZONAS URBANAS DEL ESTADO DE VERACRUZ” (Díaz Lazaro, 2011):

Se presenta un estudio sobre temperaturas extremas altas (ondas de calor) en seis zonas urbanas del estado de Veracruz: Tuxpan, Veracruz, Coatzacoalcos, Poza Rica, Orizaba y Xalapa, para el periodo 1982-2009. En esta tesis se propuso un criterio para definir una onda de calor y se analizó su tendencia en seis zonas urbanas del estado de Veracruz. Se encontró que en Xalapa una onda de calor ocurre cuando en al menos un día la temperatura máxima y mínima coinciden o sobrepasan el percentil 95 de las series de temperaturas máximas y mínimas diarias, cuyos valores son 30.2°C y 16.4°C, respectivamente.

- “ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD EN EL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO” (Torres, *et al.*, 2010):

Presenta un análisis de la señal del cambio climático y la variabilidad climática, mediante los índices del ETCCDI para el Estado de Veracruz. Se obtuvo evidencia de condiciones más cálidas en años recientes, con el aumento de días cálidos y la disminución de días fríos, mientras que en precipitación no hay cambios significativos en las series anuales o sobre eventos extremos a lo largo del estado.

- “ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA; CUATRO DÉCADAS DE CLIMATOLOGÍA URBANA EN MÉXICO” (Tejeda-Martínez y Jauregui-Ostos, 2004):

Xalapa se ubica en las estibaciones de la Sierra Madre Oriental, por lo que su altitud va de 1300 a los 1500m. En el centro geométrico tiene un cerro (1500 msnm) con vegetación abundante (25 hectáreas, aproximadamente). Ha tenido tres momentos de estudio de clima urbano: a inicio de los ochenta, cuando tenía aproximadamente 150 mil habitantes; a finales de esa década, cuando alcanzó los 200 mil, y a mediados de los noventas, con aproximadamente 300 mil. Los tres estudios detectaron una isla de calor urbana coincidente con la zona comercial de la ciudad (llamado centro histórico) mediante el análisis de registro de termómetros colocados sobre la azotea de edificios. La intensidad promedio de esa isla en 1998 fue de 1.5°C.

- “UNIDADES AMBIENTALES URBANAS: BASES METODOLÓGICAS PARA LA COMPRENSIÓN INTEGRADA DEL ESPACIO URBANO” (Cervantes Pérez, *et al.* 2001)

Este trabajo explora la climatología urbana de Xalapa en dos aspectos: las alteraciones climáticas por urbanización y la distribución espacial y temporal del bioclima.

Se partió del análisis de los datos climáticos del Observatorio de Xalapa y la estación de Las Vigas los cuales han cambiado de lugar durante el periodo de análisis, por lo anterior se dividió el periodo de estudio en 3 periodos y como resultado general se puede concluir que la temperatura en la ciudad de Xalapa tiene una tendencia al aumento.

- “ALTERACIONES CLIMÁTICAS POR LA URBANIZACIÓN EN XALAPA, VER” (Tejeda-Martínez y Acevedo-Rosas, 1990):

Con el propósito de encontrar alteraciones climáticas relacionadas con la urbanización de Xalapa se tomaron mediciones simultáneas de lluvia y temperatura en diferentes puntos de la ciudad durante ocho meses. En los resultados se obtuvo que hay presencia de isla térmica, aunque la distribución de la precipitación no está directamente relacionada con la urbanización si no con los patrones sinópticos y a la topografía local. Los datos fueron tomados de junio a agosto de 1988 y de enero a mayo 1989, con esto se buscó tener representatividad de los meses lluviosos (junio a agosto); de los calurosos poco lluviosos (abril y mayo) y de los fríos poco lluviosos (enero y febrero). Se encuentra que las temperaturas bajas son las más susceptibles a ser alteradas por las modificaciones del balance energético asociados a la urbanización.

Los trabajos reportados en este apartado abonan de alguna manera particular ya sea en su metodología o en el análisis y caracterización del área de estudio que se

desarrolla en esta tesis. La presente tesis contribuye a un análisis complementario del desarrollo urbano y el clima para la localidad urbana de Xalapa - Enríquez, partiendo del análisis de una base de datos actualizada y con control de calidad para la localidad y que muestra similitud con el estudio: Índices de cambio climático de la variabilidad en el estado de Veracruz, México (Torres, *et al.*, 2010).

Adicionalmente se muestran estudios que abordan alguno de los otros factores relevantes para esta tesis como el cambio de uso de suelo, crecimiento de la mancha urbana y el incremento de la población y cómo modifican las variables de temperatura, así como la recurrencia de las ondas de calor.

La aportación de esta tesis es analizar los diferentes factores de desarrollo urbano y climático que se presentan en la zona de estudio, lo anterior sienta la base para presentar una propuesta de medidas para incrementar la resiliencia y la capacidad adaptativa de la localidad urbana ante el incremento de la temperatura máxima y mínima y la presencia de ondas de calor, buscando contribuir a orientar la toma de decisiones de los responsables de la política climática.

Capítulo 3.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Dentro de la República Mexicana, el estado de Veracruz tiene un territorio total que cubre 71,735 km², cuenta con una población total de 8,062,579 habitantes (52% mujeres y 48% hombres) (INEGI, 2020c), ocupa el 4^{to} lugar a nivel nacional por el número de habitantes (INEGI, 2020a). La población se encuentra distribuida en el 62% urbana y 38% rural (INEGI, 2020a).

Veracruz se localiza en la franja intertropical y cuenta con una gran diversidad de climas debido a que su territorio posee grandes diferencias altitudinales: desde el nivel del mar hasta la altura máxima del país (5,700 msnm, que corresponde al volcán Pico de Orizaba). Por su ubicación geográfica cuenta con características tropicales. La influencia de sus serranías modifica sobre todo el centro-oeste, dando como resultado que los climas se distribuyan fundamentalmente paralelos a la costa de la siguiente manera: cálido húmedo (en la costa), cálido subhúmedo (planicie costera), templados húmedos (parte este de la vertiente del Golfo -a barlovento-) y templados subhúmedos (parte oeste de la vertiente -a sotavento-) y frío (sólo en los picos de las montañas) (Tejeda, *et al.*, 1989).

Los climas cálidos húmedos cubren aproximadamente el 80% del territorio veracruzano y comprenden las llanuras costeras del Golfo norte y sur, hasta una altitud aproximada de 1,000 m. La temperatura media anual en estas regiones es de 22°C, mientras que la más baja es de 18°C en el mes más frío (enero). Las zonas

ubicadas a una altitud de entre 1,600 y 2,800 msnm poseen climas templados. Estos climas se encuentran en el área más occidental del estado y se caracterizan por una temperatura media anual que oscila entre 12 y 18°C, con lluvia esencialmente en verano, que en ocasiones son abundantes. Por otro lado, el obstáculo que forman las elevaciones del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental, no permiten la llegada de aire húmedo con igual intensidad en la zona de Perote y al oeste de la huasteca, y el clima que resulta es semiseco templado con lluvias en verano, donde la temperatura media anual es de 14°C (Tejeda-Martínez y Acevedo-Rosas, 1990).

El estado de Veracruz se localiza en la zona que dominan los vientos alisios del hemisferio norte, los cuales tienen su origen en el centro de alta presión de las Bermudas-azores. Pero no todo el estado y en todo el año el viento dominante es del noreste o del este, debido principalmente al relieve y al desplazamiento de la celda antes mencionada en las diferentes épocas del año (Aguas, *et al.*, 1992).

Está conformado por 212 municipios y por 373 localidades urbanas dentro del estado, para esta tesis se seleccionó la capital del estado dada su importancia. La localidad urbana de Xalapa - Enríquez es la capital del estado y ocupa el segundo puesto en el estado de Veracruz como la localidad con más población, y se encuentra ubicada en la zona centro del estado.

3.1.- XALAPA - ENRÍQUEZ

La ciudad de Xalapa - Enríquez es la capital del estado de Veracruz, situada en las faldas del cerro de Macuiltépetl y en la parte oriental del Cofre de Perote, en la zona de transición entre la Sierra Madre Oriental y la planicie costera del Golfo de México. Se encuentra ubicada en el municipio de Xalapa con una latitud de 19°32'24"N y una longitud de 96°55'39"O colindando con los municipios de: Banderilla, Coatepec, Emiliano Zapata, San Andrés Tlalnahuayocan, Naolinco y Jilotepec. Se encuentra en el Eje Neovolcánico Transversal, sobre un sistema de topofomas de lomerío de basalto (97%) y sierra volcánica con estrato volcanes o estrato volcanes aislados (3%). La ciudad tiene una altitud de 1,120-1,720 msnm, siendo su punto más alto el Cerro de Macuiltépetl (Lemoine Rodríguez, 2012) (Figura 1).

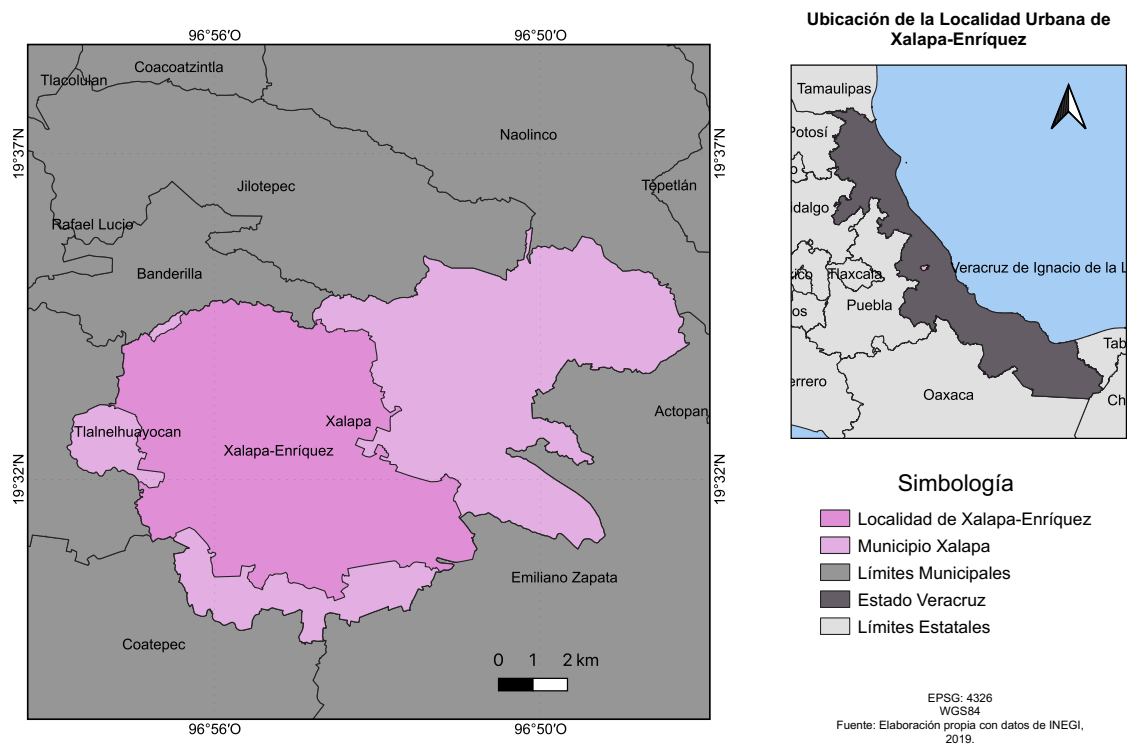


Figura 1. Localidad urbana de Xalapa - Enríquez.

Aspectos sociales y demográficos

La ciudad de Xalapa - Enríquez ocupa el 0.17% de la superficie total del estado. Cuenta con más de treinta centros de educación superior, con centros de creación artísticos, científicos y culturales entre los más importantes del país. Tiene una población de 443,063 habitantes, cuenta con 114,173 viviendas particulares (INEGI, 2020a). El grado de marginación en la ciudad es muy bajo y el rezago social es muy bajo (CONAPO, 2021).

Vegetación

La vegetación original del área que actualmente ocupa la ciudad consistía en fragmentos de bosque mesófilo de montaña, encino, pino, tropical caducifolio y bosque de galería, siendo el bosque mesófilo de montaña el tipo de vegetación representativo de la región. Dicha vegetación original ha sido reemplazada paulatinamente por el proceso de urbanización, resultando en fragmentos aislados, con un mayor predominio de comunidades vegetales secundarias. Una vez que inicia un proceso de fragmentación, desencadena una serie de modificaciones en los procesos ecológicos y por consecuencia impacta las poblaciones y comunidades de flora y fauna, los suelos y el agua, que responden al cambio de la nueva

estructura de los fragmentos. La vegetación urbana actual está distribuida en sus áreas verdes, constituidas por jardines privados, camellones, parques urbanos, parques ecológicos, áreas verdes reglamentarias y manchones de bosque (Luévano, 2015).

Climatología

El clima es húmedo, sus normales climatológicas considerando el periodo 1951-1980 son una temperatura máxima media anual de 24.7°C, mínima media anual de 13.7°C y media anual de 19.2°C. Las lluvias son abundantes en verano y principios de otoño, siendo más ligeras en lo que resta del año, y lloviznas con niebla “chipi-chipi” en invierno, esto debido a la afluencia de los vientos del norte, que provocan grandes descensos de temperatura, el valor de la precipitación media anual es de 1,435mm (SMN, 2020).

La Figura 2 muestra el ciclo anual de la temperatura máxima y mínima en una de las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio, a manera de ejemplo. Se observa que el comportamiento de las dos variables es similar durante el año, siendo los meses más fríos enero, febrero, noviembre y diciembre, mientras que el mes más cálido es mayo.

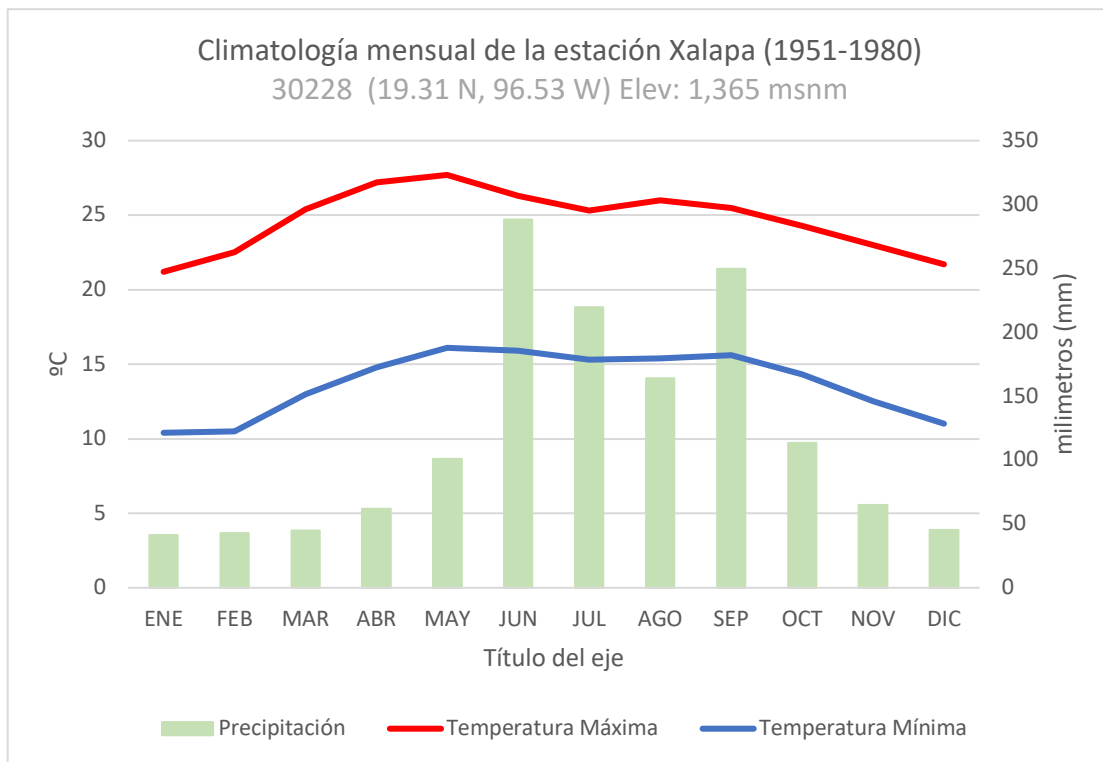


Figura 2. Climatología mensual de la temperatura máxima, mínima y precipitación de la estación Xalapa. Fuente: Elaboración propia con datos del SMN, 2020.

En cuanto a precipitación (Figura 2) se puede observar que en la estación se presenta un comportamiento bimodal de la precipitación, asociado al fenómeno de la canícula, el cual se relaciona a una disminución de la precipitación acumulada entre los meses de julio y agosto en algunas regiones de México, dado que la precipitación en esos meses es menor que en los meses de junio y septiembre. Para el caso de Xalapa - Enríquez se ha observado que se presenta durante en los meses de julio y agosto (Perdigón-Morales *et al.*, 2019; Romero-Centeno *et al.*, 2007, y Magaña *et al.*, 2003).

En Xalapa el viento casi todo el año tiene una dirección del Este dominado principalmente por los vientos alisios, mientras que en invierno tiene una dirección del norte asociado principalmente a los eventos de Norte que se presentan en el estado de Veracruz.

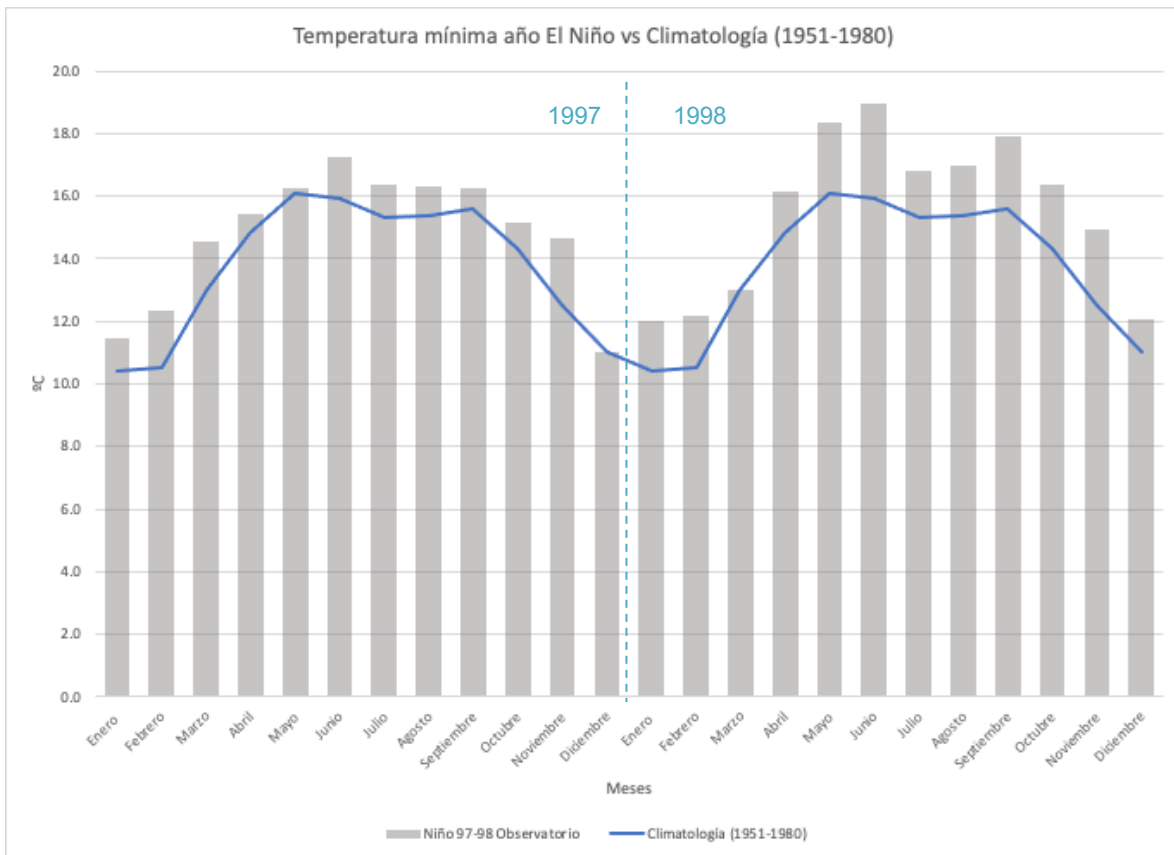
Algunas de las condiciones sinópticas que inciden a lo largo del año en la región son las siguientes (Tejeda *et al.*, 1989):

- Octubre a mayo: desprendimiento de masa de aire polar que penetran por el norte o noroeste del Golfo cuyo efecto no es muy profundo, extendiéndose en la vertical hasta los 700mb, pero provocando una disminución sensible en la temperatura superficial (conocido localmente como Norte).
- Verano: disminución en la frecuencia de intrusión de aire polar, se presenta la incidencia de fenómenos tropicales, principalmente ondas tropicales, vientos alisios y tormentas tropicales, lo anterior provocando un marcado aumento de temperatura y lluvias por la influencia de humedad en algunas zonas.
- Entre el verano y el otoño: los ciclones tropicales provenientes del Golfo de México y del mar Caribe inciden en la costa. Estos penetran al territorio de Tamaulipas, Veracruz o Tabasco, provocando cambios en el régimen de lluvias.

A veces, las condiciones climáticas a gran escala son las influencias dominantes y en otras prevalecen las condiciones locales, aunque ambas están siempre presentes. Como regla general se puede afirmar que, durante un fuerte patrón de flujo sinóptico, caracterizado por vientos bruscos, nubes y, a veces, precipitación, las influencias locales se eliminan en gran medida. Sin embargo, cuando los vientos son débiles y el cielo está despejado, con luz solar durante el día y condiciones sin nubes durante la noche, los efectos locales controlan la capa más baja de la atmósfera. Las diferencias que se desarrollan entre un área de urbanización y el

paisaje rural dependen en gran medida de las condiciones sinópticas (Landsberg, 1981).

Existen diferentes trabajos realizados donde se vincula el comportamiento de las variables meteorológicas como la temperatura y precipitación con la ocurrencia del fenómeno de El Niño (fase cálida de ENOS) (Cavazos y Rivas, 2004). Al analizar la influencia que han tenido los años con el fenómeno de El Niño considerados como muy fuertes (1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016, NOAA, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) no se muestra que tengan una señal clara sobre el comportamiento de la temperatura máxima de la ciudad, mientras que la temperatura mínima es más sensible a la señal. En la Figura 3, se muestra un ejemplo gráfico del comportamiento de un año El Niño muy fuerte con respecto a la climatología (OMM, 2014).



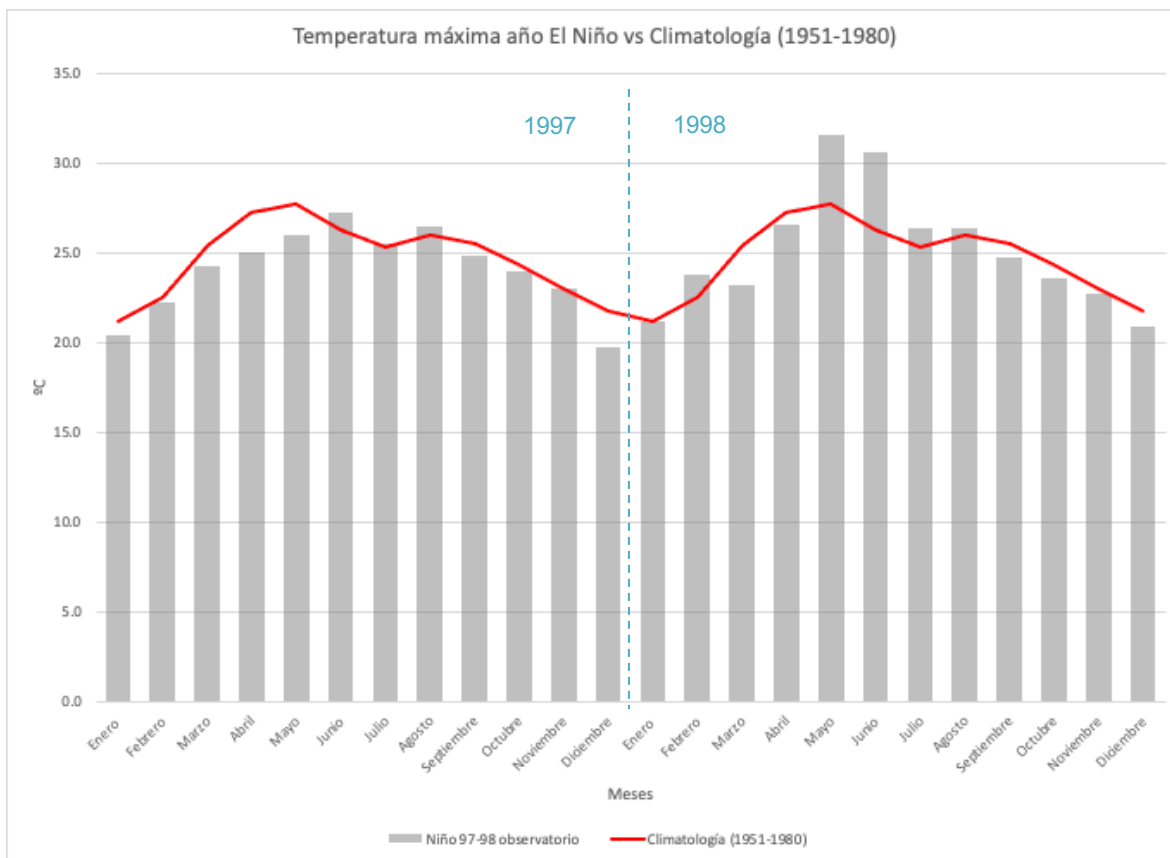


Figura 3. Comportamiento de la temperatura mínima (arriba) y máxima (abajo) en el año Niño (1997-1998) contra la climatología 1951-2010. Fuente: Elaboración propia con datos del SMN.

Hidrología

Dentro de la Ciudad de Xalapa se encuentran los ríos: Sedeño, Carneros, y la laguna del Castillo. También existen arroyos como el de Chiltoyac y las Ánimas, y dentro del perímetro urbano se localizan los manantiales de los Tecajetes y Xallitic.

Actividades económicas

De acuerdo con los datos del Censo Económico de México en 2019, los sectores económicos que concentraron más unidades económicas en Xalapa fueron: comercial (37%), otros servicios excepto actividades gubernamentales (18%) y servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas (14%), industria manufacturera (9%), entre otros (SE, 2020).

Capítulo 4.- METODOLOGÍA

Una ciudad es una agrupación de personas que se asientan en un sitio en donde se manifiestan en conjunto el sistema social, económico y demográfico. Este concepto hace referencia principalmente al componente físico-territorial. La evolución urbana ocurre cuando se modifica el entorno social, económico y natural,

esto es un crecimiento demográfico acelerado que conlleva a cambios significativos en la concentración espacial de personas, así como de los procesos de producción y el intercambio de bienes y servicios y el medio natural se apropia, se transforma y se adapta para el desarrollo de la población (CONAPO, 2012).

La distinción entre los entornos urbanos y rurales en términos climáticos resulta del papel que juega la evapotranspiración, es decir, que en el medio rural la radiación solar se consume primordialmente en evaporar agua, mientras que en el medio urbano la energía se emplea más en calentar las edificaciones al existir menos superficies húmedas. En otras palabras, el efecto local en los entornos urbanos se puede observar en la combinación de radiación solar de onda corta incidente y la baja humedad del suelo, resulta en una ganancia de energía durante el día, pero una baja capacidad calorífica en la superficie conlleva a un rápido enfriamiento del suelo o vegetación durante la noche, esto produce diferencias térmicas urbano-rurales (Mc Carthy & Sanderson, 2011 y Guo-Yu, 2015).

La ciudad misma está conformada por un conjunto de estructuras y materiales que contrastan con los entornos rurales; esto da lugar a fenómenos climáticos distintos, como la "isla de calor urbana" y la "columna de contaminantes urbanos", ambos contribuyen a la definición de un clima urbano. Los impactos del clima urbano se extienden más allá de las fronteras físicas de una ciudad, hacia áreas aguas abajo, además del debido al transporte de propiedades atmosféricas (temperatura, humedad y contaminación del aire) por el viento (Guo-Yu, 2015 y Oke, *et al.*, 2017). En realidad, hay un constante flujo y transformación de materia y energía entre las ciudades y su entorno, por lo que algunos autores utilizan el término "metabolismo urbano" (Delgado-Ramos, 2014).

Oke, *et al.*, (2017) definen al clima urbano y a los "efectos urbanos sobre el clima" utilizando una versión modificada del marco conceptual de Lowry, donde los valores medidos de una variable meteorológica V_M (como la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento, etc.) en una estación consisten en la suma lineal de tres factores:

$$V_M = V_B + V_L + V_H$$

donde V_B es el valor histórico "base" de la variable asociado a las condiciones climáticas sinópticas de la región, V_L es la alteración de V_B debido a su ubicación, es decir, a los efectos del clima local, como relieve o cuerpos de agua cercanos, etc., y V_H es la alteración de V_B debido a los efectos de las actividades humanas, incluida la urbanización. La contribución de cada término al comportamiento de la variable meteorológica depende de:

- 1) la ubicación de la estación meteorológica que está fija;
- 2) el conjunto de condiciones sinópticas del clima durante un período de tiempo;
- 3) el carácter variable y cambiante de las influencias humanas.

A continuación, se muestran algunos métodos para calcular la estimación del efecto urbano.

Tabla 1. Métodos para estimar el efecto urbano utilizando observaciones.

| Método | Cálculo | Suposiciones | Obstáculos |
|---|---|---|--|
| Diferencia entre Urbano y Pre-urbano | $V_H = V_{M(U)} - V_{M(N)}$ <p>Diferencia entre observaciones de la misma estación con ambiente natural (N) y después de la urbanización (U)</p> | Contribuciones del macroclima (V_B) y contexto topográfico (V_L) no varían durante el periodo ni antes ni después de la urbanización | Las estaciones que captan la transformación de un paisaje de natural a urbano son muy raras. El clima base puede cambiar debido al cambio climático global o regional a largo plazo |
| Diferencia entre Urbano y Rural | $V_H \approx (V_{M(U)} - V_{M(R)})$ <p>Diferencia entre observaciones de dos estaciones adyacentes localizadas en áreas rural (R) y urbana (U)</p> | Contribuciones de V_B y V_L son lo mismo en cada sitio para las condiciones climáticas y el periodo examinado | Las mediciones en un área rural (R) no son equivalentes a los valores pre-urbanos; el carácter del área rural no es estático, por lo que la contribución para V_H cambia; la estación puede tener influencia de los efectos urbanos. |
| Diferencia o razón en contra del viento y a favor del viento | $V_H \approx (V_{M(R)up} - V_{M(A)down}) / (V_{M(R)up} / V_{M(A)down})$ <p>Razón entre observaciones de dos estaciones localizadas una en área rural en contra del viento (R_{up}) y una a favor del viento (A_{down}) en una zona urbana</p> | Contribuciones de V_B y V_L son lo mismo en cada sitio para las condiciones climáticas (especialmente la dirección del viento) y el periodo examinado | Es difícil encontrar estaciones que cumplan con los requisitos debido a que el área urbana afectada se desconoce al inicio del estudio y su forma y extensión oscilan con el clima, especialmente con la dirección del viento. |
| Diferencia entre días de la semana y fin de semana | $V_H \approx (V_{M(U)wday} - V_{M(U)wend})$ <p>Diferencia entre las observaciones de la misma estación subdividiendo los días de la semana (w_{day}) y los fines de semanas y vacaciones (w_{end})</p> | Contribución de V_B y V_L son similares para el conjunto de datos de días de la semana y fines de semana. Además, la magnitud y el patrón de las actividades humanas no cambian significativamente durante el periodo examinado | Fines de semana o vacaciones no equivalen a valores pre-urbanos porque las actividades humanas no están ausentes; los efectos de la urbanización (tejido, cubierta y estructura) están presentes en ambos conjuntos de valores. |

Fuente: (Oke *et al.*, 2017).

En esta tesis se va a utilizar el método de **Diferencia entre Urbano y Pre-urbano** para la ciudad de Xalapa - Enríquez, con ello se buscará identificar los cambios en las tendencias de la temperatura máxima y mínima en las series de tiempo de las estaciones que cumplan con un proceso de control de calidad y homogeneidad. Ya que solo si uno tiene observaciones de un sitio antes de la urbanización, preferiblemente por un período de tiempo considerable, se puede hacer una

comparación válida “antes y después” (Landsberg, 1981).

Para cumplir con el objetivo de esta tesis se analizarán dos componentes primordiales el proceso de urbanización y análisis climático, a continuación, se describen los pasos para cada uno y el análisis en conjunto para la aplicación del método diferencia entre urbano y pre-urbano.

- 1) Componente desarrollo urbano
 - a) *Aumento de población*: se muestra el crecimiento de la población de acuerdo con los censos desde 1940 y su vinculación con el crecimiento de la mancha urbana.
 - b) *Expansión de la superficie de la ciudad*: presenta la distribución del crecimiento de la mancha urbana por década desde 1950.
 - c) *Urbanización*: transiciones entre el cambio de uso de suelo y pérdida de vegetación relativo al área actual de Xalapa - Enríquez.
- 2) Componente procesamiento de datos climáticos
 - a) *Selección de datos*: identificación de estaciones meteorológicas dentro del área de estudio y que tengan 30 años de registro con 80% de datos disponibles.
 - b) *Control de calidad*: identifica y depurar dentro de los datos observados valores poco comunes que pueden ser un evento extremo o este asociado a un error.
 - c) *Homogeneización*: garantiza que las variaciones contenidas en las observaciones correspondan únicamente a los procesos climáticos y no a otros factores “artificiales”.
 - d) *Cálculo de índices de cambio climático*: identificar las modificaciones en el tiempo de las tendencias de índices de cambio climático asociados tanto a temperatura máxima como mínima.
 - e) *Estimación de ondas de calor*: definición de una onda de calor para la ciudad de Xalapa y se evaluará la ocurrencia de éstas.
- 3) Vinculación de los componentes (capítulo 5): Partiendo de estos análisis previos se vincularán con la fecha en la que se presentó el cambio de uso de suelo en la estación.

4.1.- DESARROLLO URBANO

Para demostrar la hipótesis de esta tesis, se debe incluir la parte del desarrollo urbano, el cual comprende los siguientes factores: el aumento de su población, expansión de la superficie de la ciudad y la urbanización de la ciudad. A continuación, se desarrolla cada uno de los factores incluidos.

Aumento de población

El incremento de la población está vinculado a una mayor demanda de servicios, así como a modificar el uso de suelo para ampliar el área de los asentamientos humanos. Por lo anterior, se llevó a cabo el análisis del crecimiento poblacional en la Ciudad de Xalapa – Enríquez considerando el periodo de los datos climáticos que va de 1953 al 2022.

Este análisis se basó en la información de los Censos Poblacionales del INEGI desde 1940 al 2020. Se observa que hay una tendencia clara al incremento lo cual se muestra en la última columna por medio de barras verdes, donde se observa el incremento de la población con respecto al censo anterior (Tabla 2).

Tabla 2. Datos de población para la ciudad de Xalapa - Enríquez de 1940 a 2020 e incrementos porcentuales con respecto al censo anterior.

| Ciudad | Año | Población | Incremento porcentual |
|-----------------|------|-----------|-----------------------|
| Xalapa-Enríquez | 1940 | 39,530 | |
| | 1950 | 51,169 | 29% |
| | 1960 | 66,269 | 30% |
| | 1970 | 122,377 | 85% |
| | 1980 | 204,594 | 67% |
| | 1990 | 279,451 | 37% |
| | 2000 | 373,076 | 34% |
| | 2010 | 424,755 | 14% |
| | 2020 | 488,531 | 15% |

Fuente: elaboración propia con datos de (Foro - Mexico.com, 2019) y (SEDESOL, 2015).

Las décadas en las que hubo un mayor crecimiento respecto a la década anterior son 1970 y 1980 donde el incremento fue mayor al 60%. Este crecimiento en la población puede estar vinculado a que la ciudad comenzó a crecer de manera acelerada y desordenada, permitiendo la ubicación de asentamientos informales que con el tiempo llegaron a formalizarse (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

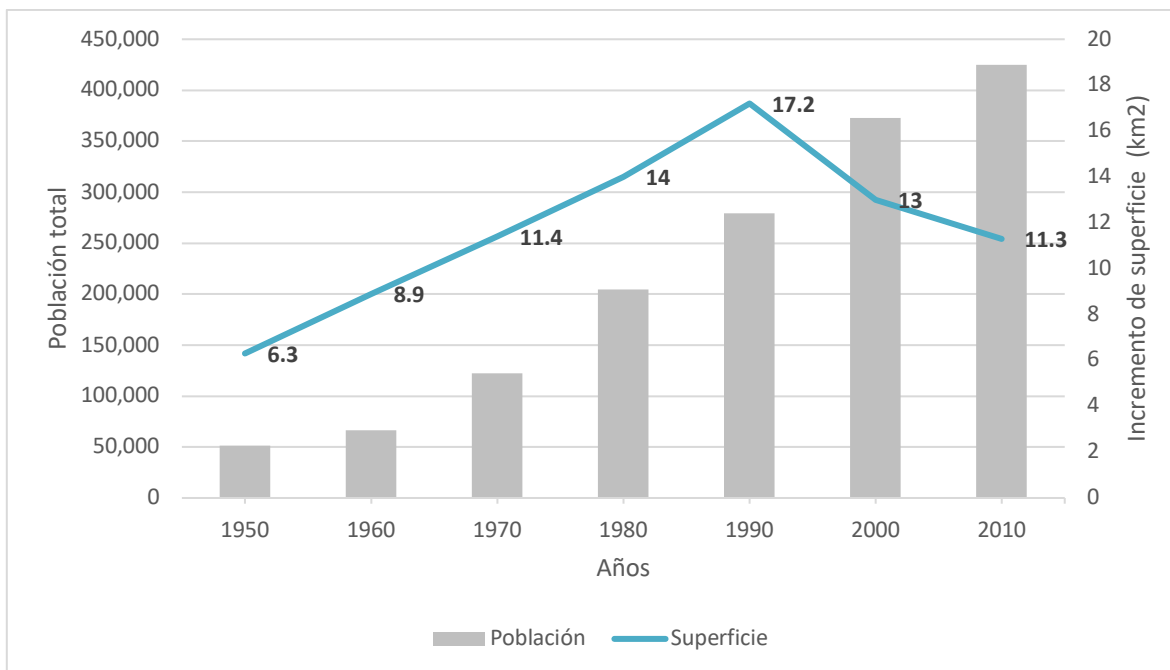


Figura 4. Comparación entre el crecimiento poblacional (barras) y el incremento de la superficie (línea azul) en Xalapa - Enríquez, Ver., entre 1950 y 2010.

Fuente: (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

Al vincular el crecimiento de la población con respecto al crecimiento de la mancha urbana, se observa que la población muestra una tendencia creciente, mientras que la tasa de crecimiento de la superficie de la mancha urbana se reduce frente a la tasa observada en la década de los 90's (Figura 4). El área urbana que se reporta para 1950 es de aproximadamente 10 km² de acuerdo con Lemoine Rodríguez (2012).

Otro aspecto fundamental para considerar es la densidad de la población, la cual es la relación entre un espacio determinado y el número de personas que lo habitan. Se obtiene dividiendo el número de personas que viven en un lugar específico entre el número de kilómetros cuadrados que mide ese territorio, a nivel nacional la densidad de población es de 61 hab/km² (INEGI, 2020a). En el caso de Xalapa el 1% del territorio presenta una densidad alta (más de 250 hab/km²), mientras que el 82% tiene una densidad media baja (entre 80 y 200 hab/km²) y el resto baja densidad (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

Expansión de la superficie de la ciudad

La urbanización en el mundo es cada vez mayor. Las Naciones Unidas estimaron para México un grado de urbanización de 68% en 1980 y una proyección de 84% para 2020 (Sobrino, 2022).

La ciudad de Xalapa – Enríquez no fue la excepción. Al ser la capital del estado de Veracruz la migración del campo a la ciudad jugó un papel muy importante en su urbanización, donde el modelo de crecimiento urbano hasta la década de los 70's fue de forma moderada hacia el norte siguiendo una estructura de anillos alrededor del centro histórico. Entre los años 70's y mitad de los 80's, la tendencia de crecimiento cambia a ser de manera acelerada por la agregación de fraccionamientos sin planificación previa (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

Este crecimiento presentado en la ciudad se puede asociar con la creciente migración rural que se presentó entre 1980 y 2000. Los asentamientos irregulares se extienden en la periferia norte mayoritariamente y también al este y oeste de la ciudad en terrenos ejidales de uso agrícola y en zonas de riesgo no aptas para el desarrollo urbano. Adicionalmente en la década de los 80's la mancha urbana de la ciudad de Xalapa se fusiona con los asentamientos de los municipios de Banderilla y Tlalnahuayocan (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

Lo anterior conlleva la formación de la Zona Metropolitana de Xalapa, la cual es una agrupación en una sola unidad de municipios completos que comparten una ciudad central y están altamente interrelacionados funcionalmente. También se consideran a los centros urbanos mayores a un millón de habitantes, aunque no hayan rebasado su límite municipal y a los centros urbanos de las zonas metropolitanas transfronterizas mayores a 250 mil habitantes (SEMARNAT, 2019).

Para calcular la expansión de la superficie urbana de Xalapa se retoma el análisis generado por Lemoine Rodríguez (2012), donde las zonas urbanas se delimitan por medio de orto-fotografías e imágenes de satélite pancromáticas (espectro electromagnético visible) disponibles en formato digital. La escala de estos datos osciló entre 1:10,000 y 1:80,000, y su resolución espacial entre 1 y 5 m. Se observa que la mancha urbana en el periodo 1950-1980, aumentó 14 km², entre 1980-1990 ocurrió con mayor rapidez (17.2 km²). En las décadas posteriores el crecimiento fue menor que en el periodo 1980-1990: 13 km² en el periodo 1990-2000 y 11.27 km² en el periodo 2000-2010 (Lemoine Rodríguez, 2012) (Figura 5).

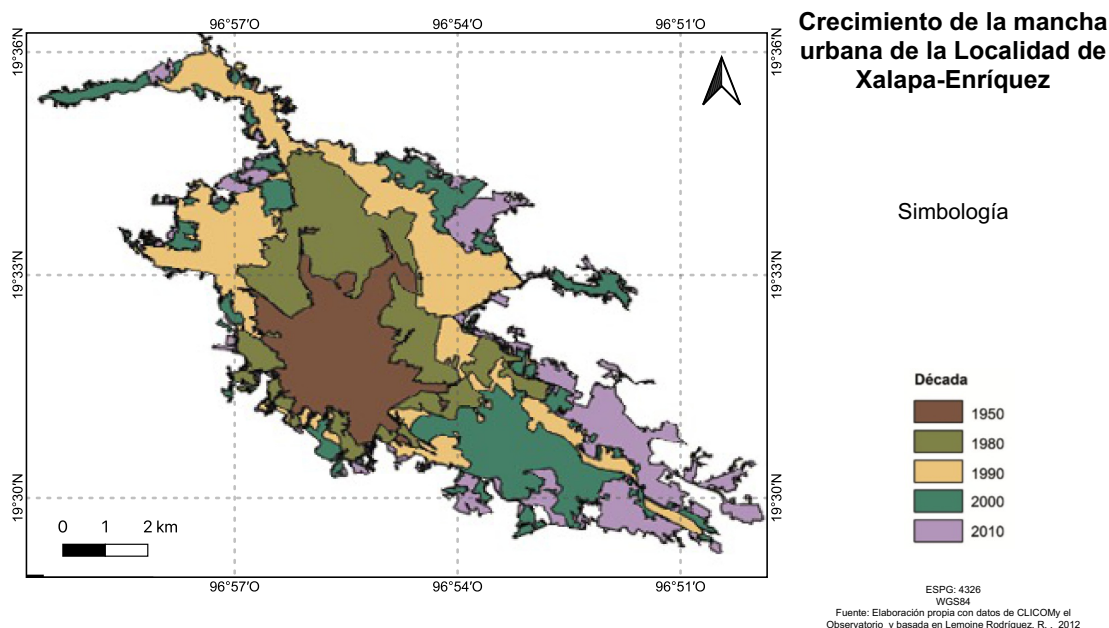


Figura 5. Crecimiento de la mancha urbana de la Localidad de Xalapa - Enríquez.

Urbanización

Para caracterizar la urbanización se incorpora la información de cambio de uso de suelo y pérdida de vegetación, ya que son los principales factores que diferencian entre un área urbana y una rural. El uso de suelo ha sido definido como "las acciones, actividades e intervenciones que las personas realizan sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla" (FAO y PNUMA, 1999).

En los lugares donde no ha habido modificación o ha sido ligera, el suelo sigue cubierto por la vegetación natural y se le considera como primaria. En contraste, si ha ocurrido alguna perturbación considerable y se ha removido parcial o totalmente la cubierta vegetal primaria, la vegetación que se recupera en esos sitios se conoce como secundaria y puede ser estructural y funcionalmente muy diferente a la original. El caso extremo de transformación es cuando se elimina por completo la cubierta vegetal para dedicar el terreno a actividades agrícolas, pecuarias o zonas urbanas; éstas se conocen como coberturas antrópicas (SEMARNAT, 2005).

La cartografía de uso de suelo y vegetación del INEGI contiene información obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite y complementada con trabajo de campo. Muestra la distribución del uso del suelo agrícola, de la vegetación natural e inducida del país, además indica el uso pecuario y forestal y otros usos que se presentan en el territorio relacionados con la cubierta vegetal. El uso del suelo agrícola se representa de acuerdo con la disponibilidad del agua para los diferentes tipos de cultivos durante su ciclo agrícola. La vegetación

se representa de acuerdo con lo establecido en los Lineamientos para el uso y actualización del Catálogo de Tipos de Vegetación Natural e Inducida de México con fines estadísticos y geográficos.

A la fecha cuenta con siete series con una resolución 1:250,000 y el periodo que abarcan es el siguiente para cada serie:

- Serie I 1978-1990 (año de referencia 1985)
- Serie II 1994-1999 (año de referencia 1993)
- Serie III 2002-2005 (año de referencia 2002)
- Serie IV 2006-2010 (año de referencia 2007)
- Serie V 2011-2013 (año de referencia 2011)
- Serie VI 2014-2017 (año de referencia 2014)
- Serie VII 2018-2021 (año de referencia 2017)

Para este análisis del cambio de la cobertura y uso del suelo se analizan las transiciones entre la vegetación y usos del suelo en el tiempo. Se partió de utilizar seis de las siete series de cartografía de uso de suelo y vegetación del INEGI, debido a que la categorización de la serie uno no es comparable con el resto de las series, ya que presentaba información más general.

Lo primero es homologar las diferentes descripciones que tienen las siete series de INEGI para poder difuminar los detalles que se presentan en esto y facilitar la representatividad de la información. Como clasificación general se usaron tres diferentes tipos de suelo (suelo agrícola o de cultivo, forestal y urbano) que englobaban todo lo planteado en las descripciones de las series y han sido utilizados anteriormente para estudios de este tipo en Xalapa (Lemoine Rodríguez, 2012; Robles *et al.*, 2010; Evangelista, *et al.*, 2010, y H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

La Tabla 3 muestra el número de clases con el que se trabajará.

Tabla 3. Reclasificación de las descripciones de las series de uso de suelo y vegetación de INEGI.

| Descripciones de las siete series de INEGI | Clasificación general | Número de clases |
|--|-----------------------------|------------------|
| Agricultura de temporal permanente | Suelo agrícola o de cultivo | 1 |
| Agricultura de temporal semipermanente | Suelo agrícola o de cultivo | |
| Agricultura de temporal semipermanente y permanente | Suelo agrícola o de cultivo | |
| Pastizal cultivado | Suelo agrícola o de cultivo | |
| Pastizal cultivado permanente | Suelo agrícola o de cultivo | |
| Agricultura de temporal plantación agrícola permanente | Suelo agrícola o de cultivo | |
| Agricultura de temporal | Suelo agrícola o de cultivo | |

| | | |
|---|----------------|---|
| Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña | Suelo forestal | |
| Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña | Suelo forestal | 2 |
| Bosque cultivado plantación forestal permanente | Suelo forestal | |
| Bosque de oyamel | Suelo forestal | |
| Asentamientos humanos | Suelo urbano | |
| Zona urbana | Suelo urbano | 3 |
| Urbano construido | Suelo urbano | |

Fuente: Elaboración propia con información de (CONABIO, 2022), (Lemoine Rodríguez, 2012) y (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

En el caso de los asentamientos humanos no siempre corresponden a áreas urbanas ya que pueden ser asentamientos irregulares, pero estos si presentan modificaciones en el entorno natural por lo anterior de los tres tipos de suelo que se maneja es el más afín. Al aplicar la reclasificación se calculó la superficie para la clasificación general de tipo de suelo en las siete series (Tabla 3).

Es importante recordar que la primera serie tiene características de agrupación diferentes al resto, como se puede observar no presenta suelo forestal. A partir de la segunda serie el suelo forestal y agrícola presenta su mayor área y permanece casi constante en la tercera, en las series subsecuentes va disminuyendo, transformando esas hectáreas al suelo urbano (Tabla 4).

Tabla 4. Superficie por tipo de suelo en las siete series de INEGI.

| | Superficie (ha) | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1985 | 1993 | 2002 | 2007 | 2011 | 2014 | 2018 |
| Suelo agrícola o de cultivo | 5038.394 | 2727.218 | 2727.266 | 1293.235 | 1147.015 | 766.317 | 733.136 |
| Suelo forestal | --- | 379.843 | 379.864 | 356.771 | 324.653 | 235.516 | 266.828 |
| Suelo urbano | 955.152 | 2886.486 | 2886.416 | 4343.540 | 4521.879 | 4991.713 | 4993.583 |
| Total | 5993.546 | 5993.547 | 5993.546 | 5993.546 | 5993.547 | 5993.546 | 5993.546 |

Fuente: Elaboración propia con información de (CONABIO, 2022).

Otra forma de analizar los cambios es por medio de porcentaje asociado al tipo de suelo (Tabla 5). Se observa que 1993 y 2002 permanece casi igual la distribución de los usos de suelo, además que el suelo agrícola y el suelo urbano casi tenía el mismo porcentaje. El mayor cambio se presentó del 2002 al 2007 donde el suelo urbano incrementó y disminuyó el suelo agrícola.

Tabla 5. Porcentaje de tipo de uso de suelo por serie de INEGI.

| | Porcentajes | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1985 | 1993 | 2002 | 2007 | 2011 | 2014 | 2018 |
| Suelo agrícola o de cultivo | 84.06 | 45.50 | 45.50 | 21.58 | 19.14 | 12.79 | 12.23 |
| Suelo forestal | 0.00 | 6.34 | 6.34 | 5.95 | 5.42 | 3.93 | 4.45 |
| Suelo urbano | 15.94 | 48.16 | 48.16 | 72.47 | 75.45 | 83.28 | 83.32 |

Fuente: elaboración propia con información de (CONABIO, 2022).

La matriz de cambio de uso de suelo (Tabla 6) de la serie dos (1993) a la serie siete (2018) muestra transiciones de un tipo de suelo a otro que se pueden asociar a deforestación o recuperación de vegetación. En la diagonal principal se muestra la permanencia por tipo de uso de suelo. En el caso de suelo agrícola o de cultivo la mayor área se presenta en la permanencia del tipo de suelo, seguido de la transición a suelo urbano (lo que conlleva a la deforestación), por otro lado, el suelo forestal el mayor cambio ha sido hacia el suelo urbano. Para el suelo urbano la mayor área se presenta en la permanencia del tipo de suelo.

Tabla 6. Matriz de cambio de uso de suelo de 1993 a 2018.

| S2/S7 | Suelo agrícola o de cultivo | Suelo forestal | Suelo urbano |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|
| Suelo agrícola o de cultivo | 206.872 | 3.229 | 169.743 |
| Suelo forestal | 47.907 | 722.018 | 1957.293 |
| Suelo urbano | 12.049 | 7.889 | 2866.547 |

Fuente: Elaboración propia con información de (CONABIO, 2022).

El color amarillo de la Tabla 6 se vincula con el efecto de deforestación y el color verde representa las áreas de recuperación de vegetación en las transiciones de la serie dos a la siete, se puede observar que son mayores las áreas de deforestación que las de recuperación. En la Figura 6 se muestra estas transiciones de forma gráfica y se observa que las áreas agrícolas se encuentran principalmente al suroeste, en cuanto al suelo forestal se encuentra principalmente al oeste y sureste de la ciudad.

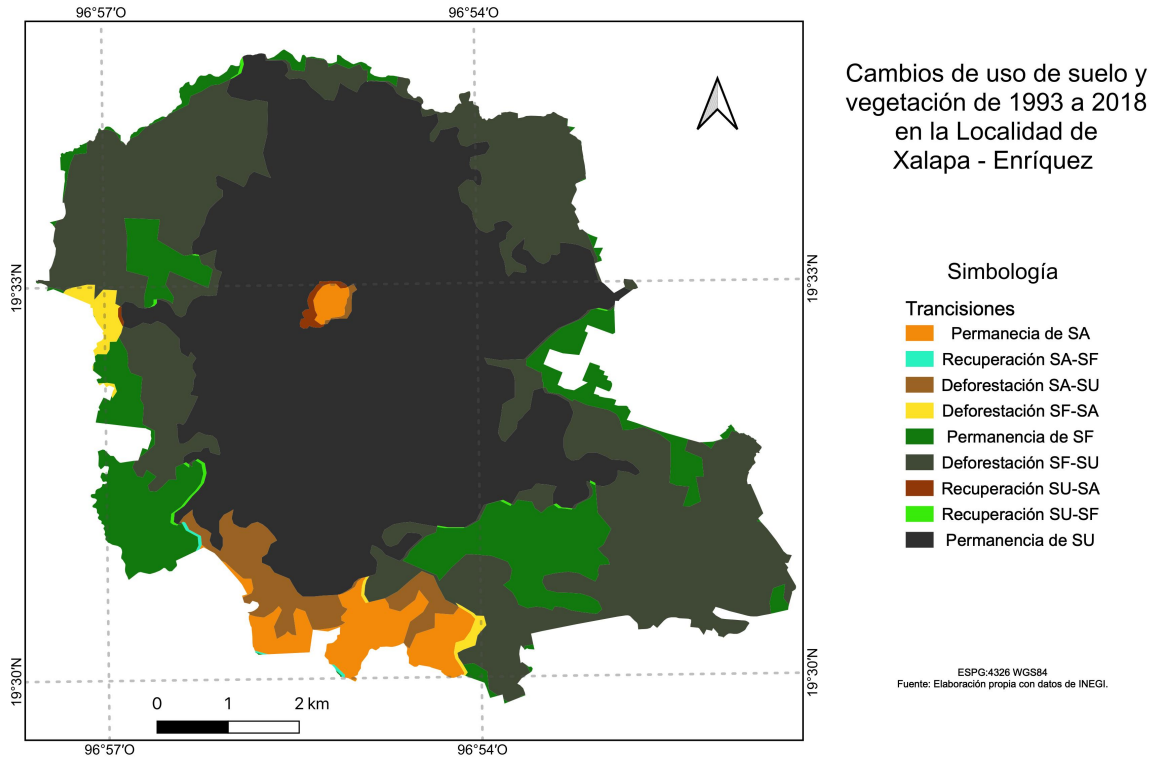


Figura 6. Transición de 1993 a 2018 en los tipos de suelo: suelo agrícola y de cultivo (SA), suelo forestal (SF) y suelo urbano (SU).

Fuente: Elaboración propia con datos de (CONABIO, 2022)

La permanencia del suelo forestal en la localidad urbana se vincula al Área Natural Protegida (ANP) “Archipiélago de Bosques y Selvas de la Región Capital del Estado de Veracruz” decretada en 2015. Esta ANP tiene como propósito la conservación de los remanentes de vegetación de bosque mesófilo de montaña y selva baja caducifolia bajo un manejo sustentable de los ecosistemas, sus elementos y los servicios ambientales que de ellos deriven. Aunado a ello, busca preservar en los centros de población los elementos naturales indispensables al equilibrio ecológico y al bienestar y seguridad general de la sociedad.

Para comprobar la hipótesis planteada en esta tesis es de vital importancia contar con el análisis del clima observado. Este se relaciona con cambios del comportamiento de la precipitación, temperatura, y de eventos climáticos extremos. El análisis climático se enfoca en los datos históricos registrados de las variables meteorológicas, considerando un control de calidad, homogeneización, así como análisis de tendencia para temperatura, precipitación y eventos extremos (SEMARNAT - INECC, 2015).

Hablar de detección de cambios en el clima implica demostrar, generalmente en términos estadísticos, que el clima ha cambiado con algún nivel de significancia en un intervalo de tiempo determinado (IPCC, 2007).

El ETCCDI, formado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Proyecto de Variabilidad Climática (CLIVAR, por sus siglas en inglés) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM, por sus siglas en inglés), tiene el mandato de abordar la necesidad de la medición objetiva y la caracterización de la variabilidad y el cambio del clima. Dentro de sus actividades principales resalta el seguir desarrollando y publicando índices aceptados internacionalmente de la variabilidad y el cambio del clima global y sus metodologías (Vázquez Aguirre, 2010).

Para obtener estos índices se propone seguir la metodología presentada a continuación, para asegurar que los datos sean representativos, y los cambios estén relacionados directamente con el cambio en el clima. La Figura 7 muestra los pasos generales para el cálculo y análisis de los índices de cambio climático, cada uno de los pasos que se mencionan se explicarán en los siguientes apartados.

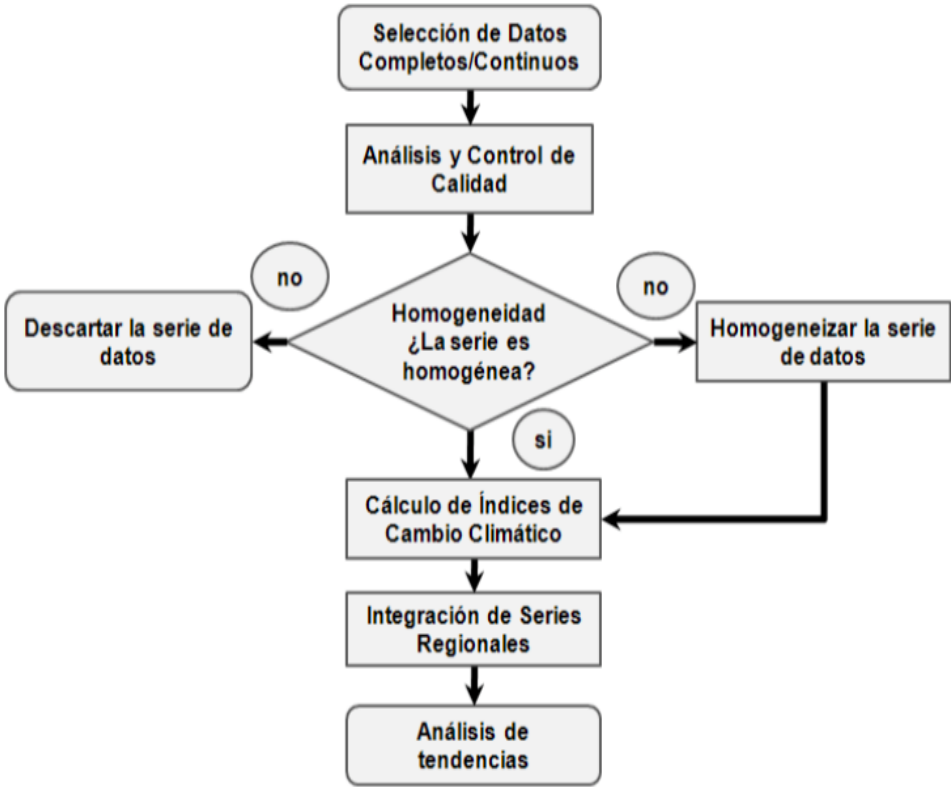


Figura 7. Metodología para el cálculo de los índices de cambio climático.

Fuente: (Vázquez Aguirre, 2010)

4.2.- PROCESAMIENTO DE DATOS CLIMÁTICOS

El cálculo de los índices se inicia con la selección de datos. Para ello lo primero es definir ¿qué son los datos climáticos? Son los registros de las condiciones meteorológicas observadas, medidas en estaciones y observatorios meteorológicos por un periodo de cuando menos 30 años. En México existen diferentes fuentes para obtener datos climatológicos. A continuación, se describen las bases de datos disponibles:

1. **CLICOM:** significa CLimate COMputing, el cual es un sistema de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas. Este sistema utiliza una base de datos de estaciones climáticas de México administrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Cada una de las estaciones del país contiene diferentes periodos de información (Figura 8). El propósito de esta página es dar a conocer una herramienta web que desarrollo CICESE para procesar y visualizar los datos diarios del CLICOM en su formato original de estaciones puntuales.

CICESE **CONACYT**

Inicio Descarga de Datos Unidades Calor Ayuda Contacto

BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA CLICOM)

Esta página utiliza una base de datos de estaciones climáticas superficiales de México administrada por el Lic. Alejandro González Serratos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COmputing project. Las observaciones son diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2012.

El propósito de esta página es dar a conocer una herramienta web que desarrollamos en CICESE para procesar y visualizar los datos diarios del CLICOM en su formato original de estaciones puntuales (CLICOM Estaciones) y en un formato de malla ([CLICOM en Malla](#)).

Nuestra herramienta CLICOM Estaciones permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor) y descargarlas, así como los datos de las gráficas en texto. Como se muestra en la Sección de Ayuda, la interface de visualización de las gráficas se hace seleccionando primero un estado del país y luego una estación climática directamente del mapa, o bien se hace una búsqueda de una estación por su nombre. También se pueden seleccionar las estaciones con más y menos de 25 años de datos.

Esta herramienta además de ser de utilidad para diferentes áreas de la ciencia, puede ser de interés para el sector agrícola, o quienes trabajan en temas relacionados a la agricultura, porque se calculan y grafican las unidades de calor ("D"); por el momento sólo se muestran las correspondientes al periodo de crecimiento de la uva (Abr-Oct), pero tenemos planes de hacerlo para otros productos agrícolas. Las unidades de calor no es una variable de la base CLICOM porque no es una variable observada; nosotros la calculamos para cada estación climatológica utilizando las fórmulas y metodología que aparecen en la sección "Unidades de Calor".

También tenemos planes de incluir otras variables que pueden utilizarse en estudios de impacto de eventos extremos, por ejemplo frecuencia y compuestos de días con eventos extremos de temperatura (para estudios de heladas y ondas de calor) y de precipitación, así como los umbrales de estos eventos.

El desarrollo de esta página es parcialmente financiada por el CICESE, PEACC-BC, INECC y REDESClim.

Ingresar A los Datos
CLICOM En Malla
CLICOM Ciclonas
CORDEX-CAM

Figura 8. Visualización del portal del CICESE-CLICOM.

Fuente: (CICESE, 2013).

2. **Base de datos del SMN:** En el sitio web del SMN, se puede consultar la información climatológica nacional que va de 1900 hasta la fecha donde se dispone de información actualizada por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), se reportan alrededor de 5,500 estaciones climatológicas y para los casos que

cuenten con registros mayores de 10 años, se realiza el cálculo de normales climatológicas, valores extremos y estadísticas mensuales (Figura 9) (SMN, 2020).

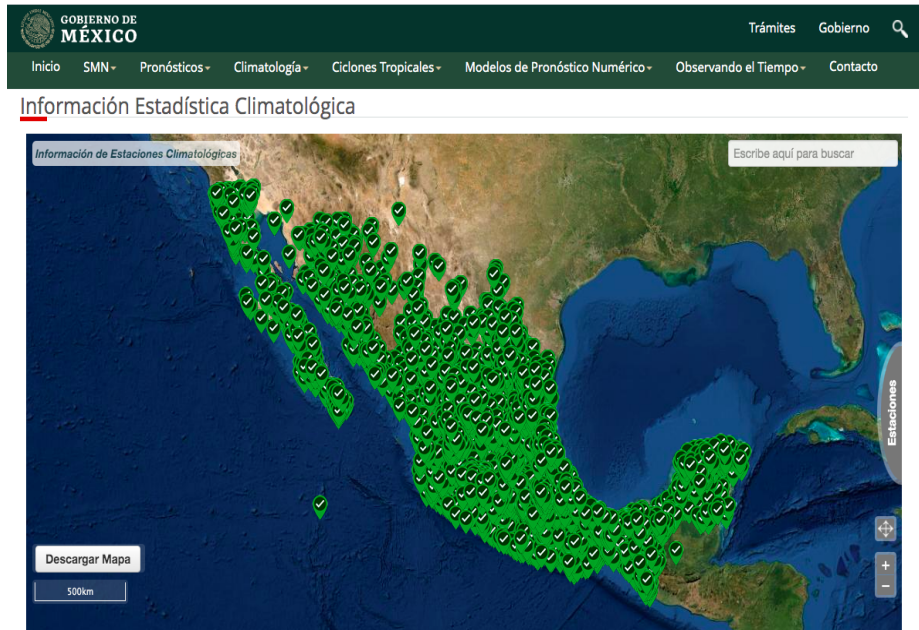


Figura 9. Portal del Servicio Meteorológico Nacional.

3. **Sistema de Información Hidrológica (SIH):** es un sistema que permite el manejo de datos climáticos e hidrológicos de la Subdirección General Técnica de la CONAGUA, contiene datos recientes e históricos de estaciones convencionales y automáticas climatológicas e hidrométricas de la red de CONAGUA y de otras dependencias del Gobierno Federal. La actualización de los archivos se realiza semanalmente (CONAGUA, 2020).

De las fuentes de datos que se describieron anteriormente, se identificaron las estaciones que se encuentran en el municipio de Xalapa, las características de éstas se muestran en la Tabla 7 y su distribución en la Figura 10.

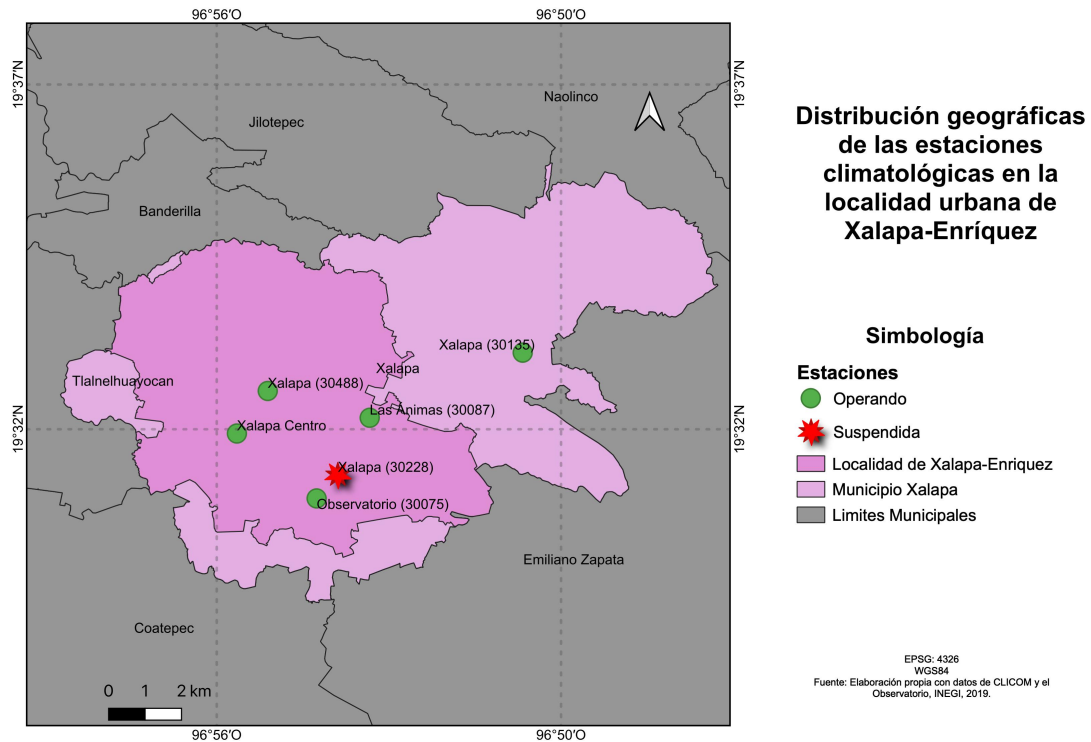


Figura 10. Distribución geográfica de las estaciones climatológicas en la localidad urbana de Xalapa - Enríquez y municipio de Xalapa.

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, el Observatorio de Xalapa e INEGI 2019.

Para aplicar la metodología seleccionada es necesario comprobar que las estaciones climáticas estén dentro de los límites más recientes de la localidad urbana de Xalapa - Enríquez, para analizar el comportamiento de la temperatura mínima y máxima con la urbanización de la zona. En la Figura 10 podemos observar que la estación Xalapa 30135, no se encuentra dentro de la localidad urbana, por lo tanto, esta estación no cumple con las características necesarias para la aplicación del método de **Diferencia entre Urbano y Pre-urbano** seleccionado para esta tesis.

Tabla 7. Estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio.

| Estación | Ubicación | Altura | Periodo | Variables | Estatus | Organismo | Fuente |
|--------------------------------|----------------------------|--------|--------------------------|------------------------------------|------------|-----------|--------------|
| Las Ánimas 30087 | 19.533N - 96.917W | 1281 | 01/06/1953 31/12/2012 | Temperatura máxima y mínima. | Operando | CONAGUA | SMN |
| Xalapa 30228 | 19.518056N - 96.898333W | 1365 | 01/10/1952 31/07/1981 | | Suspendida | CONAGUA | CLICOM |
| Observatorio 30075 | 19.51194N - 96.90388W | 1360 | 01/01/1982 25/05/2022 | | Operando | CONAGUA | Observatorio |
| Xalapa 30488 | 19.54000N - 96.91666W | 1460 | 01/01/2011 31/12/2015 | | Operando | CONAGUA | CLICOM |
| Xalapa Centro XCEVC | 19.528889N - 96.924722W | 1390 | 20/11/2001 08/11/2016 | | Operando | CONAGUA | SIH |
| Xalapa XCFVC 30135 | 19.550000N - 96.850000W | 1138 | 01/07/2005 31/12/2018 | | Operando | CFE | SMN |

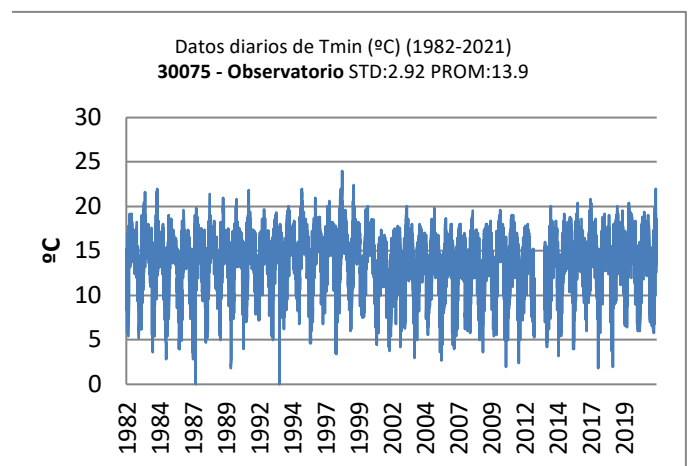
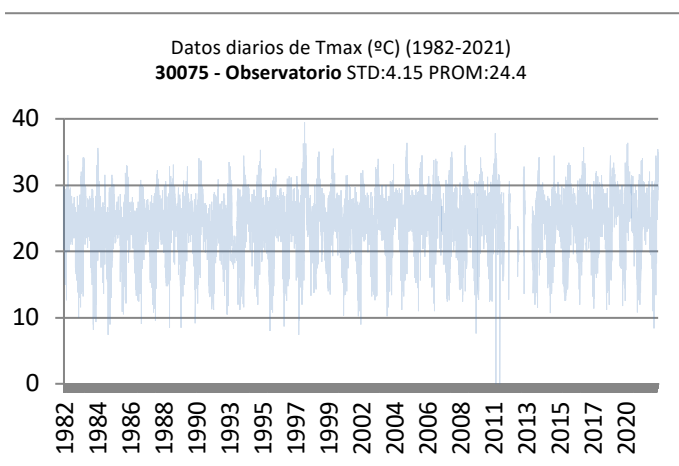
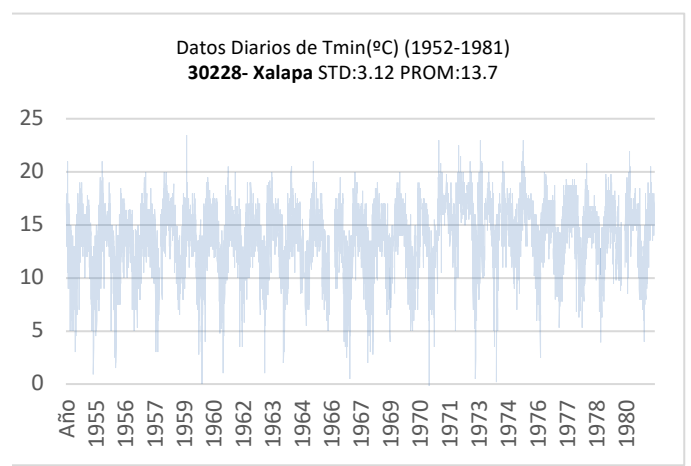
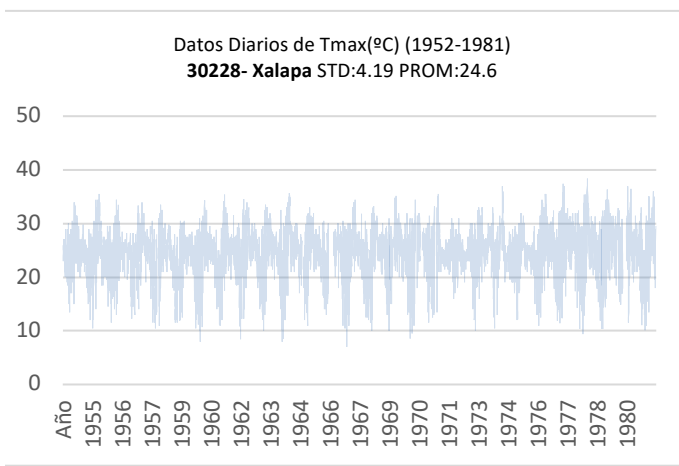
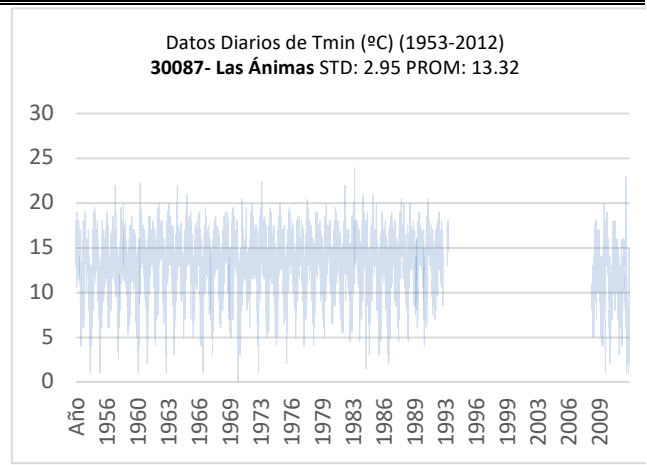
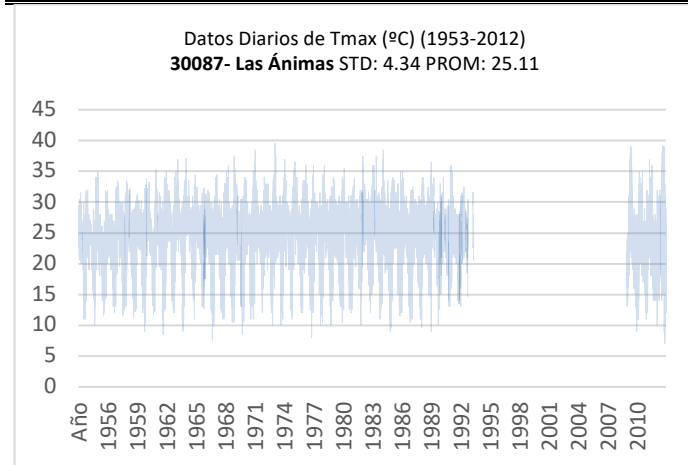
Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, SMN, SIH y el Observatorio de Xalapa.

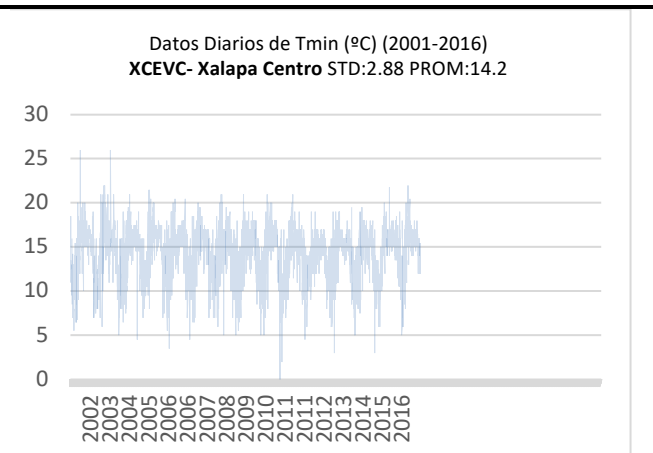
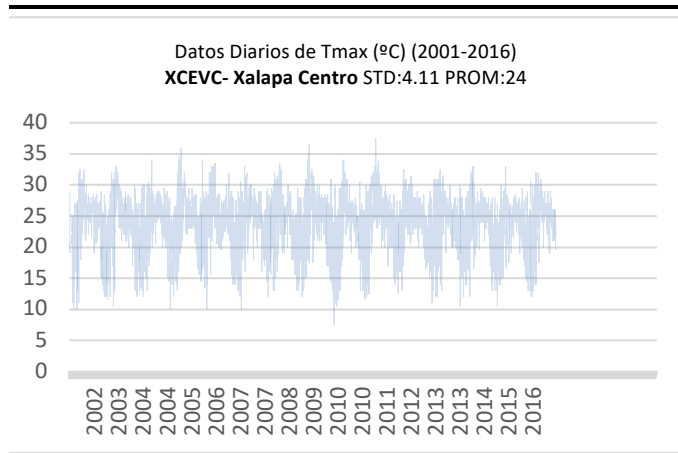
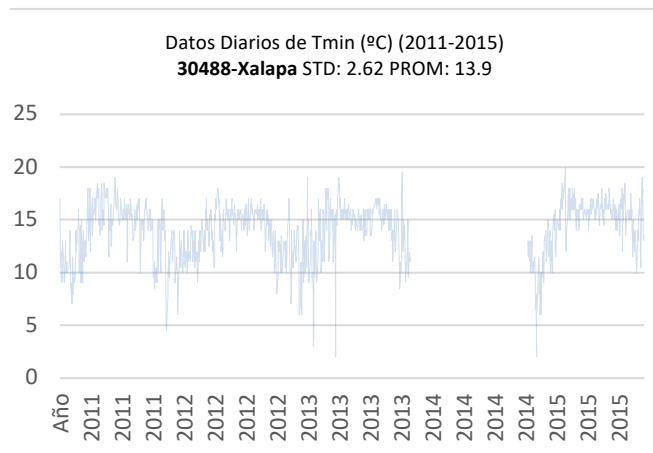
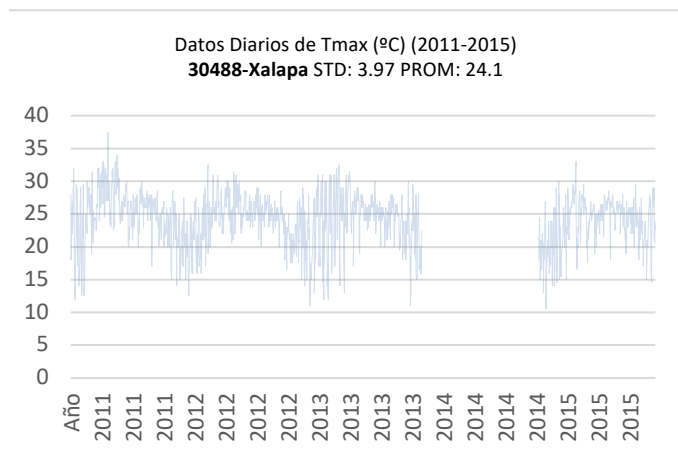
Además del requisito planteado anteriormente, para realizar el cálculo de los índices es necesario utilizar series de datos diarios históricos con mínimo de 30 años de datos de las variables de interés, y que estas tengan como mínimo un 80% de datos disponibles. Se parte de analizar un gráfico de las series de datos de las estaciones, para saber si cumplen con las características mencionadas anteriormente (Tabla 8) y ver de forma sencilla cuál es el comportamiento y cobertura de los datos.

Tabla 8. Gráficas de temperatura máxima y mínima de las estaciones presentes en el área de estudio.

Tmax

Tmin





En la Tabla 8 se puede observar que, para el caso de la temperatura máxima y mínima, son consistentes los huecos, es decir, que de forma general se presentan los mismos datos faltantes. En la estación “Las Ánimas” se puede observar que presenta huecos de aproximadamente 15 años en las dos variables.

La estación “Observatorio Meteorológico de la Ciudad”, desde su instalación ha tenido dos ubicaciones, de 1952 a 1981 está identificada con el nombre “Xalapa 30228” y se encontraba ubicado en el centro de la ciudad. En el periodo de 1982 a la actualidad se identifica con el nombre “Observatorio 30075” y cambió su ubicación a la periferia de la ciudad a inicios del periodo, actualmente forma parte de la mancha urbana. El primer periodo cuenta con registros constantes, y el segundo periodo presenta falta de datos de aproximadamente dos años en el periodo de 2012-2013 para las dos variables.

La estación “Xalapa 30488”, muestra que tiene un periodo de datos corto y que dentro de este se tiene un año de datos faltantes para las dos variables. En el caso de la estación “Xalapa Centro” no se observa un gran número de datos faltantes,

pero el periodo de datos es de 15 años. Por lo tanto, estas dos últimas estaciones no cumplen con las características requeridas.

Es importante mencionar que se realizó el ejercicio de utilizar datos de reanálisis, lo anterior buscando contar con bases de datos más largas, pero al momento de comparar las bases de reanálisis con los datos observados los valores eran diferentes y tendían a suavizar los datos extremos los cuales son fundamentales para responder la pregunta de investigación de esta tesis. Adicionalmente se observó que los datos que arrojaba el reanálisis para las estaciones era el mismo valor, por lo tanto, no caracteriza el microclima de cada estación.

Por lo anterior se decidió utilizar los datos observados, para los cuales el próximo paso es verificar el porcentaje total de datos faltantes de las estaciones dependiendo de las variables climatológicas, así como el número de años de cada estación (Tabla 9). El proceso de control de calidad de datos se realizó con las series de datos completas para rescatar los periodos más largos y después de eso decidir si era necesario cortar la serie o dejarla con la extensión que tiene, esto depende del objetivo del análisis que se va a realizar.

Tabla 9. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones por variables.

| Estación | Altura (msnm) | Porcentaje de datos faltantes | | Periodo | Años |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------|-------|--------------------------|------------------|
| | | Tmax | Tmin | | |
| Las Ánimas 30087 | 1281 | 27.6% | 27.5% | 01/06/1953 31/12/2012 | 58 años 6 meses |
| Xalapa 30228 | 1365 | 7.14% | 7.14% | 01/10/1952 31/07/1981 | 28 años 10 meses |
| Observatorio 30075 | 1360 | 4.5% | 2.5% | 01/01/1982 25/05/2022 | 40 años 5 meses |

Fuente: Elaboración propia con datos del Observatorio de Xalapa, CLICOM, <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>

En la estación de Las Ánimas se tiene un porcentaje de datos faltantes del 27%, lo cual se contrapone con lo mencionado en el apartado anterior (se requiere que haya como mínimo un 80% de datos disponibles y un mínimo de 30 años de registro). Sin embargo, dado que el registro de datos es mayor a los 30 años, teniendo un total de 59 años, de este periodo se puede seleccionar el conjunto de datos continuos de 1954 a 1994 para hacer el análisis de la información (Tabla 8). La única observación

de esta base de datos es que el análisis no presentará los cambios recientes en el clima, ya que el dato más actual es de 1994, pero da insumos para el cumplimiento del objetivo de la tesis, ya que el crecimiento urbano en la ciudad inició desde 1950.

El Observatorio de Xalapa ha tenido dos ubicaciones, su primera ubicación (estación Xalapa 30228) tiene un periodo de datos menor a los 30 años (28 años y 10 meses) requeridos por el software para el control de calidad y homogenización, así como el cálculo de los índices de cambio climático. Por lo anterior se optó por incluir en la base de datos un periodo de 1 año y dos meses del código -99.9 que indica datos faltantes, lo anterior para poder usar el software y aún con esta incorporación se seguirá teniendo menos del 20% de datos faltantes. Es decir, quedando el periodo del primero de enero de 1952 al 31 de diciembre de 1982 y presentando el 10.7% de datos faltantes, se cumplen los requerimientos. La segunda ubicación de la estación es identificada como "Observatorio". Tiene periodos largos y con un porcentaje de datos faltantes menor al 5% en las dos variables, y es la estación que presenta datos más recientes.

Como resultado de este primer análisis, las estaciones seleccionadas por cumplir los requisitos en cuestión de cantidad de datos son las siguientes:

1. Las Ánimas 30087
2. Xalapa 30228
3. Observatorio Xalapa 30075

A continuación, se ejecutó un proceso de control de calidad y homogeneidad por medio de un programa en lenguaje R.

Control de Calidad

Se ocupa de un problema adicional al de los datos faltantes: es decir identificar los valores atípicos que, por exceso o por déficit, quedando fuera del rango de variación habitual de la variable que se analiza. Los valores poco comunes, etiquetados como sujetos de verificación, pueden ser errores en la serie de datos de origen humano, errores realizados durante la digitalización de los datos, como cuando se ha digitado 350 en vez de 35.0; errores sistemáticos por mala calibración o reemplazo de los instrumentos de medición; debidos a algún cambio de ubicación de la estación de observación; o cambio del personal que realiza las observaciones, etcétera, aunque en algunos casos pueden ser registros reales de situaciones poco probables, es decir, de eventos extremos (Vázquez Aguirre, 2010).

Pasos para el control de calidad

Después de la primera selección de datos se realizan pruebas estadísticas más formales por medio del software RClimDex_extraqc, el cual tiene dos controles de calidad. Es importante resaltar que uno de los requisitos principales para el software es contar con periodos de tiempo de al menos 30 años en datos diarios, por lo anterior se hizo ajuste en los tiempos presentados en la Tabla 9 con las consideraciones que se hacen en la sección anterior para las estaciones seleccionadas, los cuales se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de datos faltantes en las estaciones por variables con periodos modificados.

| Estación | Porcentaje de datos faltantes | | Periodo | Años |
|-----------------------|-------------------------------|-------|--------------------------|-----------------|
| | Tmax | Tmin | | |
| Las Ánimas 30087 | 5.4% | 5.2% | 01/01/1954 31/12/1994 | 41 años |
| Xalapa 30228 | 10.7% | 10.7% | 01/01/1952 31/12/1981 | 30 años |
| Observatorio 30075 | 4.5% | 2.5% | 01/01/1982 25/05/2022 | 40 años 5 meses |

Fuente: Elaboración propia con datos del Observatorio de Xalapa, CLICOM, <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>

Para este apartado se utilizarán a modo de ejemplo los datos de la estación Observatorio, ya que cumple con las características requeridas.

Control de Calidad Básico:

- Identifica valores de $T_{max} \leq T_{min}$
- Identifica valores de precipitación negativa
- Identifica outliers [media-ndvs, media+ndvs]

Todos los cálculos de este control de calidad se realizan día por día, es decir, para cada uno de los días se calcula la media y la desviación estándar (dvs), en este caso se utilizaron cuatro desviaciones estándar que es el valor recomendado para la temperatura (Vázquez Aguirre, 2010).

Control de calidad extra:

- Detección de outliers [media \pm 4dvs]
- Redondeo

- Duplicados
- Errores en Tmax y Tmin
- Valores repetidos
- Diferencias diarias excesivas
- Valores demasiado grandes

Al ejecutar el software se generan las siguientes carpetas (Figura 11) para la estación del Observatorio de Xalapa, con los resultados del control de calidad básico y extra.



Figura 11. Carpeta de la estación de Observatorio con las subcarpetas generadas por el control de calidad.

En la Figura 11 se observan cinco carpetas, “indices” (vacía), “log” (muestra gráficas y archivos donde se encuentran los *outliers* y los posibles datos no razonables), “plots” (vacía), “trend” (vacía) y “extraqc” que muestra la información del control de calidad extra. Las carpetas vacías son las correspondientes a los resultados de los índices de cambio climático.

De los resultados obtenidos primero se llevará a cabo la revisión gráfica de los datos (carpeta Log). Los puntos rojos y espacios que se muestran en la Figura 12 son los datos faltantes que tiene la base de datos de las variables. Se puede observar que tanto la temperatura máxima como la mínima presentan ciclos anuales marcados, algunos datos faltantes que como muestra la Tabla 10, son mayores en la temperatura máxima que en la mínima.

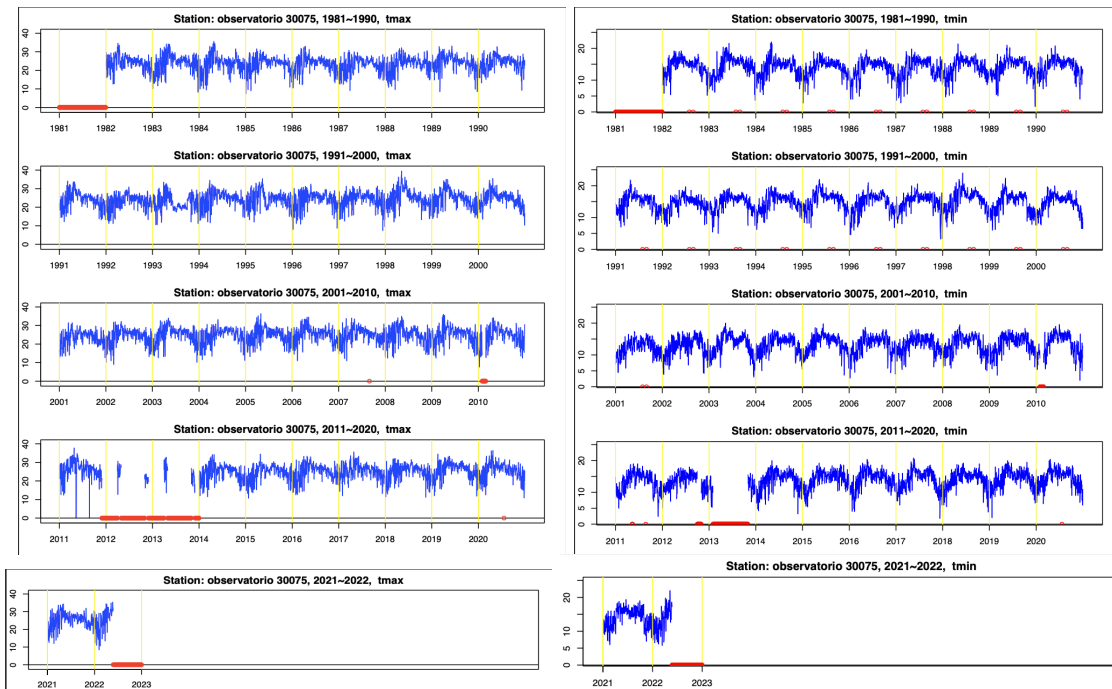


Figura 12. Gráficas de la Temperatura Máxima y Mínima de la estación del Observatorio de Xalapa.

- **Identificar valores de $T_{max} \leq T_{min}$**

- Archivo Observatorio 30075 tempQC.csv

Tabla 11. Archivo de los errores lógicos detectados.

| year | month | day | prcp | tmax | tmin | tmax-tmin |
|------|-------|-----|------|------|------|-----------|
| 1984 | 9 | 4 | 50.4 | 13.6 | 16.6 | -3 |
| 1998 | 10 | 13 | 1.9 | 13.3 | 16.4 | -3.1 |
| 2012 | 4 | 3 | 6.6 | 12.7 | 13.8 | -1.1 |

En la Tabla 11 se encuentra el listado de los errores lógicos, como en los casos en que la T_{max} es menor que la T_{min} . Estos casos se verificaron con datos climáticos de la misma estación, pero de otra fuente como el SMN y se observa que es el mismo registro, por lo tanto, los datos registrados son incorrectos y es necesario modificar en las bases de datos con -99.9 (como datos faltantes).

- **Identificar outliers [$media \pm 4dvs$]**

- Archivo Observatorio 30075 tepstdQC.csv: contiene los valores *outliers* de temperatura que están fuera de las ± 4 desviaciones estándar, las cuales están

identificadas como --low (-4 desviaciones estándar) y como --up (+4 desviaciones estándar).

Tabla 12. *Outliers de la estación de Observatorio.*

| year | month | day | tmaxlow | tmax | tmaxup | tminlow | tmin | tminup | dtrlow | dtr | dtrup | | |
|------|-------|-----|---------|------|--------|---------|------|--------|--------|-----|-------|-------------------------------|---------------------------|
| 1993 | 10 | 31 | 12.21 | 12 | 34.41 | 3.51 | 8.4 | 23.69 | -0.03 | 3.6 | 19.46 | Esta igual en la base del SMN | Redondeo al valor próximo |
| 2002 | 7 | 17 | 18.12 | 24 | 33.71 | 9.66 | 9.5 | 20.62 | 1.34 | 15 | 20.17 | Esta igual en la base del SMN | Redondeo al valor próximo |
| 2002 | 7 | 24 | 16.95 | 25 | 34.5 | 8.41 | 6.8 | 22.2 | -1.37 | 18 | 22.17 | Esta igual en la base del SMN | Sustitución por -99.9 |

En el ejemplo de la Tabla 12, al analizar el primer caso, el valor que requiere verificación es el de Tmax, ya que el registro del 31 de octubre de 1993 (12°C) está por debajo del umbral de -4 desviaciones estándar (tmaxlow), pero solamente por 0.21, por lo tanto, lo que se presenta es un redondeo y se considera que el dato es correcto. El segundo caso es similar pero ahora con la variable de Tmin.

El tercer ejemplo está por debajo de las -4 desviaciones estándar (tminlow), por más de 1.5°C, dicho dato se verificó en otras fuentes oficiales y es el mismo, por ello se optó por ponerlo como -99.9.

Para solventar los datos erróneos o sospechosos que hemos identificado por medio del control de calidad básico se tienen las siguientes opciones:

1. Comparar con las observaciones adyacentes de la propia estación.
2. Comparar con los registros de las estaciones cercanas.
3. Validar, corregir o bien sustituir por código de valor faltante.

Atendidos dichos valores, se guarda una nueva base de datos (se sugiere poner algún indicativo que ya tiene un primer control de calidad), después se procede a cargar la base de datos modificada y correr el control de calidad básico y se observa que ya no aparecen los outliers detectados inicialmente, después se procede a correr el control de calidad extra.

● **Carpeta extraqc:**

A partir de los archivos generados en el control de calidad extra, se analiza la

detección de outliers, redondeo, duplicados, errores en Tmax y Tmin, valores repetidos, diferencias diarias excesivas, y valores demasiado grandes. A continuación, se explica cada uno.

- **Detección de outliers:** se realiza por medio de dos archivos gráficos y uno de texto, que muestran el comportamiento por medio del análisis de gráficas del tipo cajas y bigotes, este tipo de gráficos describen características tanto de dispersión como de simetría de los datos.

[-Observatorio 30075 \(1CC\) _boxes.pdf](#)

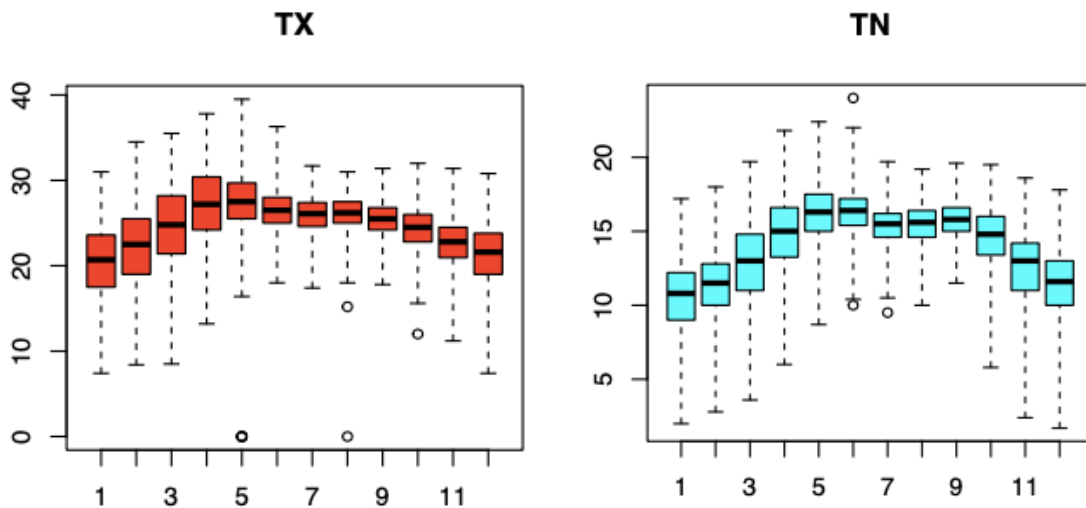


Figura 12. Gráficos de caja y bigotes de los valores de temperatura máxima (TX) y mínima (TN) para cada mes.

Las Figura 12 y Figura 13 están basadas en la excedencia del rango intercuartílico anual (mensual y anual, respectivamente). El eje “y” contiene los valores de temperatura y en el eje “x” se muestran los meses del año (Figura 12) o los años (Figura 13) de la serie de tiempo respectivamente. Aparecen identificados con círculos aquellos valores que superan el tercer cuartil + 3 veces el rango intercuartílico o los que no alcanzan el primer cuartil – 3 veces el rango intercuartílico. También se puede observar que hay variaciones en el tamaño de la caja, esto se relaciona con la dispersión de las temperaturas durante un mes o un año.

– [Observatorio 30075 \(1CC\) boxseries.pdf](#)

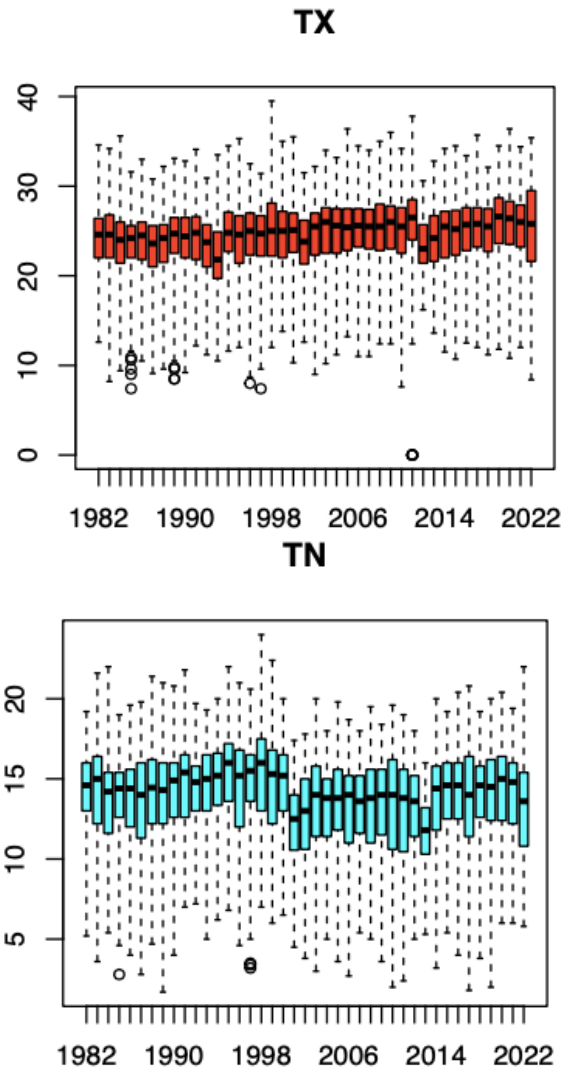


Figura 13. Gráficos de caja y bigotes de los valores de temperatura máxima (TX) y mínima (TN) para cada año.

– [Observatorio 30075 \(1CC\) outliers.pdf](#)

Figura 14. Ejemplo de archivo de texto con los outliers identificados.

```
tx up
tx low
2011 5 11 7.3 0 NA NA
2011 5 12 0 0 NA NA
2011 5 13 37.7 0 NA NA
2011 5 14 19.1 0 NA NA
1984 8 25 5.5 15.2 14.6 0.6
2011 8 25 0 0 NA NA
1993 10 31 4.4 12 8.4 3.6
tn up
1998 6 6 NA 33.5 24 9.5
tn low
2012 6 27 0 NA 10 NA
2002 7 17 3.2 24 9.5 14.5
```

En la Figura 14 se muestra la información arrojada para la temperatura mínima y máxima. La revisión se lleva a cabo renglón por renglón de este archivo, para saber si el dato es originado por algún evento extremo, o si es un dato erróneo y se debe sustituir el dato por -99.9 . Estos datos son diferentes a los establecidos en el primer control de calidad (Tabla 12) ya que se consideraban 4 desviaciones estándar lo cual engloba el 99.7% de los datos de acuerdo con lo planteado por Vázquez Aguirre, (2010), mientras que este análisis muestra los datos que superan el tercer cuartil $+3$ veces el rango intercuartílico o los que no alcanzan el primer cuartil -3 veces el rango intercuartílico

La mayoría de los datos reportados son datos faltantes, o son datos que se reportaron en el primer control de calidad y se observó que se redondeó el valor (Tabla 12).

- **Duplicados:** se muestran los datos que presentan la misma fecha en la serie de datos. Es decir, si alguna combinación de fechas (año/mes/día) aparece más de una vez.
- Observatorio 30075 (1CC) duplicates.txt: este archivo está vacío para el caso de esta estación.
- **Redondeo:** con esta prueba se ve si se repite excesivamente el valor de un decimal en las mediciones.
 - **Errores en Tmax y Tmin:** este archivo muestra los errores lógicos como la $T_{max} \leq T_{min}$.
- Observatorio 30075 (1CC) tmaxmin.txt: este archivo está vacío ya que se solventaron los errores que se habían identificado, como se muestra en el análisis de control de calidad básico.
- **Valores demasiado grandes:** muestra los valores de precipitación mayores a 200 mm o temperaturas mayores a 50°C .
- Observatorio 30075 (1CC) toolarge.txt esta estación no cuenta con registros de esta magnitud.
- Observatorio 30075 (1CC) rounding.pdf

La Figura 15 muestra que los decimales que se presentan con mayor frecuencia en la serie de tiempo son cero y de 0.5, esto es lo que ocurre normalmente ya que la

escala mínima del termómetro es de 0.5°C para el caso de la temperatura. Adicionalmente podemos observar que existe una prevalencia del grado entero y de los decimales pares, aunque no de forma exagerada.

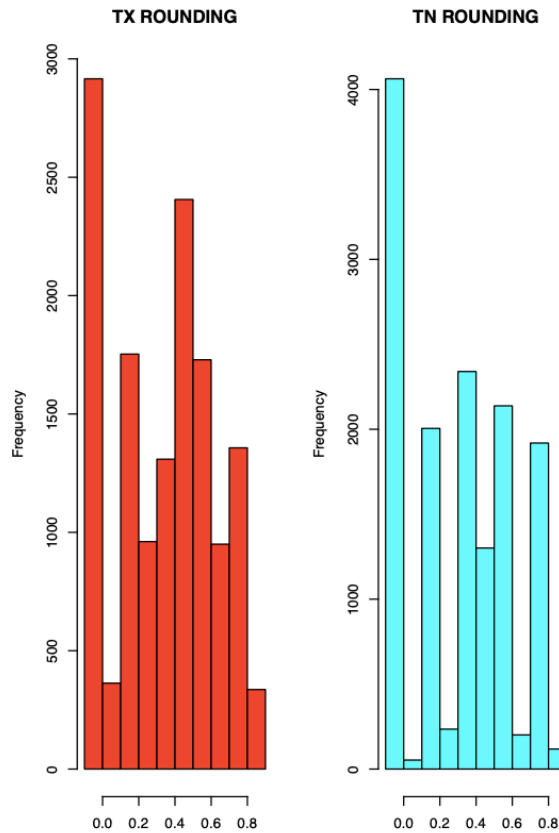


Figura 15. Histogramas de las cifras decimales en los datos de las series de tiempo de temperatura máxima (izquierda) y mínima (derecha).

- **Valores repetidos:** bloques de datos donde la Tmax o Tmin tienen valores similares en al menos tres días consecutivos.

– Observatorio 30075 (1CC) tn_flatline.txt y Observatorio 30075 (1CC) tx_flatline.txt:

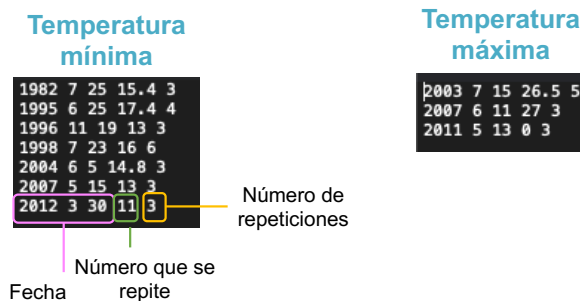


Figura 16. Archivo de las fechas con la información de los valores que se repiten al menos tres veces de manera consecutiva en las series de tiempo.

Como se puede observar en la Figura 16, hay varios renglones donde se muestra que se repiten sucesivamente varios datos. Se reportan de tres repeticiones en adelante. Primero se tienen que comparar los datos que tiene esta serie de tiempo con las de otra fuente oficial como las del SMN o con las estaciones más cercanas y si se observa que los datos son similares, se decide que a partir de la tercera repetición se cambia el dato a -99.9 .

- **Diferencias diarias excesivas:** muestra registros donde la diferencia de la temperatura con el día previo es más grande o igual que 20°C , en este caso solamente se tienen datos para la temperatura máxima y en el caso de la temperatura mínima no presentan este tipo de datos.

– Observatorio 30075 (1CC) tx jumps.txt

```
2011 5 10 32.2
2011 5 14 24.7
2011 8 25 27.6
```

Figura 17. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C .

En la Figura 17 se muestran las fechas cuando la diferencia de los datos consecutivos es mayor a 20°C , estos datos se corroboraron y son similares con otra fuente oficial. Después se buscó si se presentó algún evento meteorológico en la fecha que pudiera ocasionar esta diferencia de temperatura, como es el caso de los “Nortes”, el cual es un evento meteorológico que se presenta en la zona de estudio y puede ocasionar grandes descensos de temperatura de un día a otro. Dado que no se encontró ningún evento relacionado con la fecha se decidió sustituir los datos por -99.9 .

Después de realizar los cambios en la base de datos, se realiza de nuevo el control de calidad básico y el extra para verificar que todas las observaciones han sido solventadas y ya no hay errores en la base de datos. El resultado del control de calidad de las otras bases se encuentra en el apartado de Anexos.

Ahora se puede pasar al análisis de homogeneidad de la estación; con ello garantizamos que los datos no presenten brincos bruscos por causas artificiales y que sus variaciones estén relacionadas con el clima.

Homogeneización

Las pruebas para demostrar que una serie de tiempo de una variable climática es razonablemente homogénea tienen por objeto garantizar que las variaciones contenidas en las observaciones correspondan únicamente a los procesos climáticos y no a otros factores “artificiales” (Vázquez Aguirre, 2010).

Se puede hablar de *inhomogeneidades* en una serie de tiempo como una tendencia gradual o como una discontinuidad (cambio estructural) en el promedio o la varianza de los datos (López Díaz, 2015):

- Las tendencias pueden ocurrir debido al efecto de calentamiento, urbanización, crecimiento de vegetación, etc.
- Las discontinuidades se deben usualmente a un cambio abrupto ocurrido en la estación de observación (cambio de lugar o de instrumentos), en el procesamiento de la información, por ejemplo, el procedimiento para calcular el promedio.

Las inhomogeneidades de las series pueden conducir a una interpretación errónea de los resultados: subestimación y/o sobreestimación en los datos. En el análisis de homogeneidad, resulta útil contar con metadatos sobre la estación de observación. Los metadatos proveen "información sobre la información" o "datos sobre los datos". En ellos se describen el tipo de instrumentos, las condiciones de medición y cualquier cambio que ocurra en el entorno, la ubicación u otros aspectos relacionados con el proceso de observación (Vázquez Aguirre, 2010). En México no se cuenta con un agregado nacional de metadatos.

Para ajustar las inhomogeneidades se pueden utilizar técnicas basadas en metadatos o bien pueden ser puramente estadísticas. En esta tesis se realizó por medio del software RHtestV4, el cual se basa en dos tipos de pruebas, las cuales fueron diseñadas para series gaussianas anuales / mensuales / diarias, es decir para el análisis de series de tiempo de la temperatura, que es la variable meteorológica que se está analizando en esta tesis (Wang & Feng, 2013).

- La prueba PMT (Penalized Maxima t test), es un algoritmo de prueba recursiva. Esta prueba identifica los puntos de cambio por medio de un modelo de regresión multifase, considerando la serie base menos la de referencia (Se requiere una serie de referencia).
- La prueba PMF (Penalized Maxima F test) es utilizada para los cambios negativos en la serie de tiempo sin cambio de tendencia, y garantiza que las

tasas de falsas alarmas se encuentren cerca del nivel nominal y se pueda probar todos los puntos (se utiliza si se carece de una serie de referencia).

Con estas pruebas el paquete computacional identifica los puntos de cambio que se presentan en la serie y si estos cambios en el comportamiento de la serie de datos son significativos, además de detectar y ajustar múltiples brincos que puedan existir en una serie de datos. Como parte de la carpeta “output”, se analizaron los diferentes archivos que se generaron; como ejemplo se utilizó la variable de Temperatura Mínima.

– Observatorio 30075 (2CC) tminMLY_U.pdf

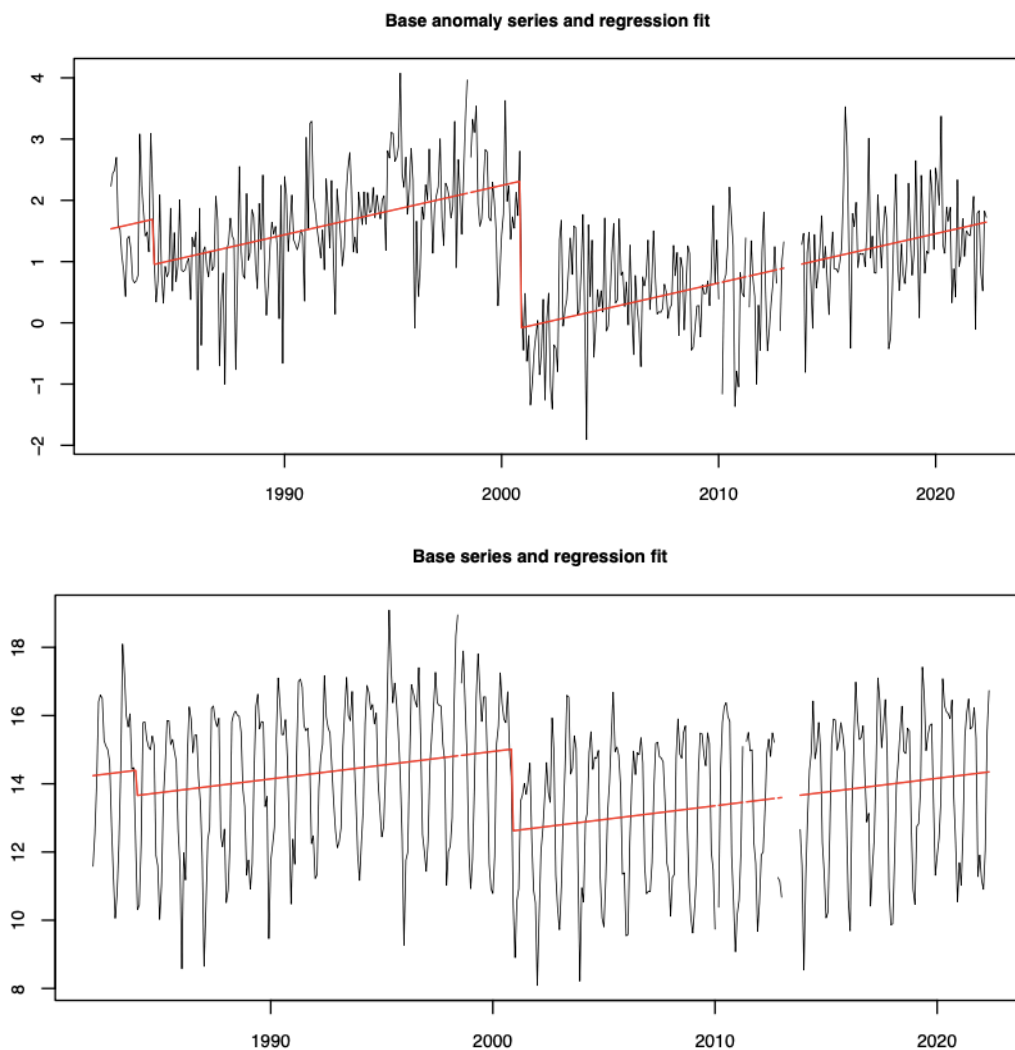


Figura 18. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia.

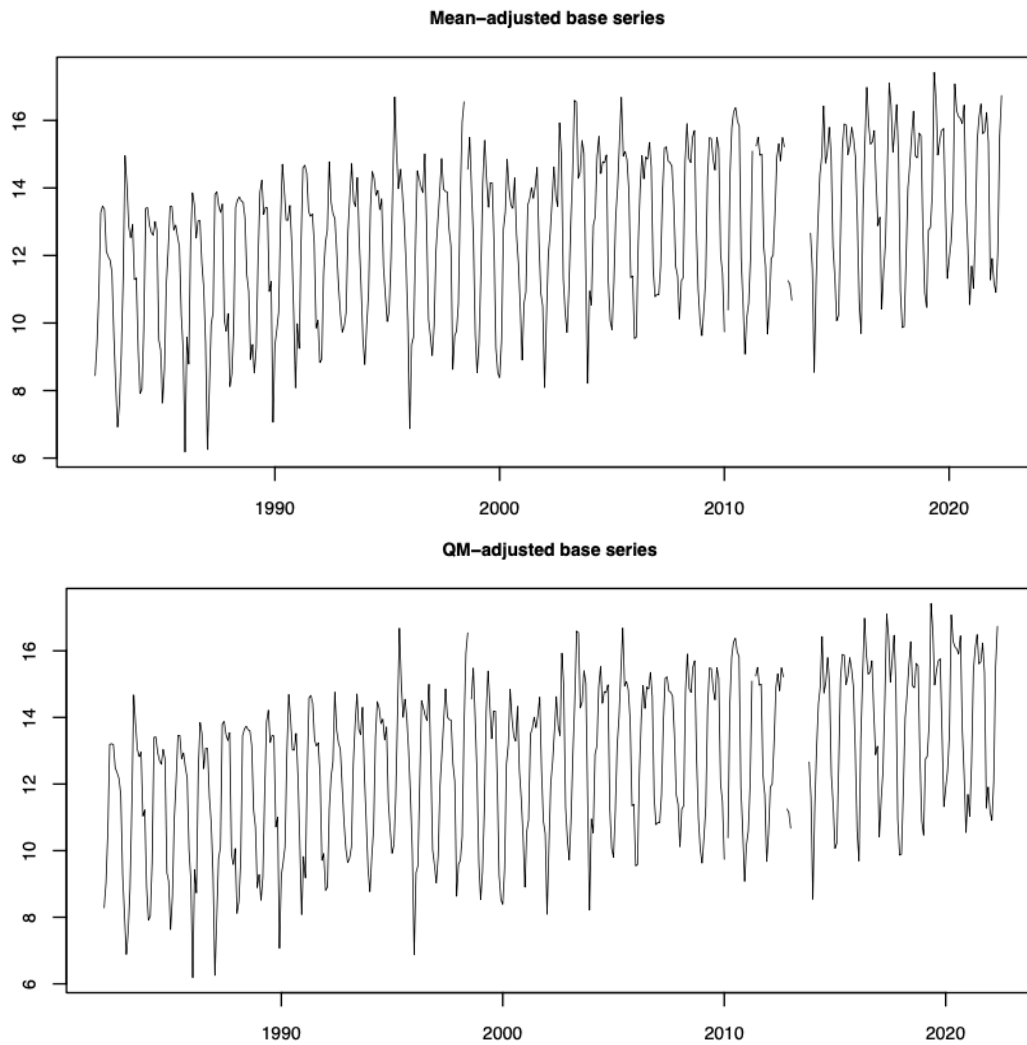


Figura 19. Ajustes de la base de datos.

La Figura 18 muestra que a lo largo del periodo se identificaron en la base de datos mensuales dos brincos. Al realizar una regresión lineal en los datos de la temperatura mínima, estos brincos se suavizan un poco. En la Figura 19 se presentan ajustes por medio de diferentes estrategias estadísticas (Prueba F de penalización máxima, método Quantile-Matching (QM)) con los que se adecuaron los brincos que se observan en la Figura 18.

- Xalapa Observatorio (1CC) tminMLY mCs.txt

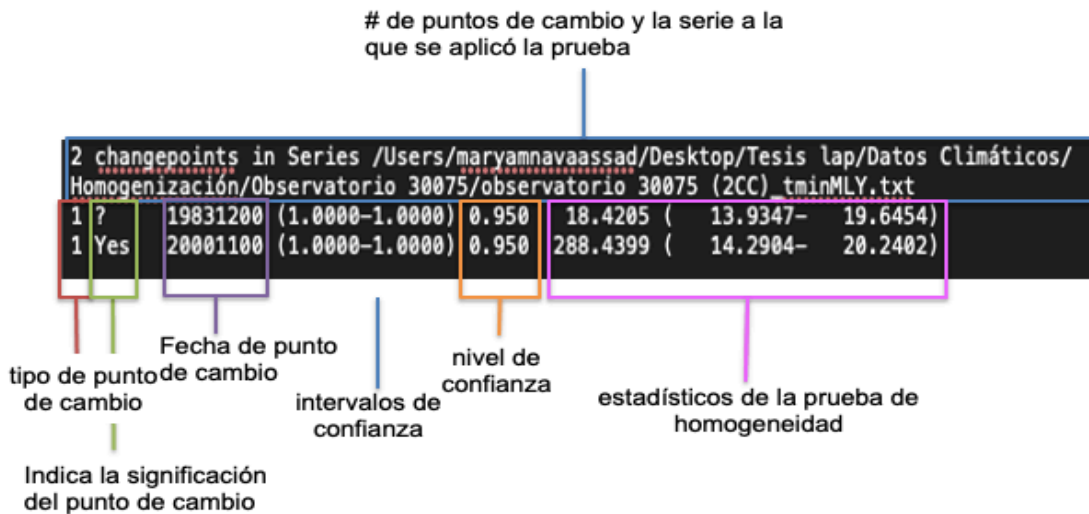


Figura 20. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima.

En este tipo de archivo se muestra la lista de los brincos que podrían ser significativos al nivel de confianza del 95% sin soporte de metadatos, a los cuales se les llama “Type-1 changepoints”. En caso de que se realizara un ejercicio y se tuvieran metadatos el número cambiaría “Type-0 changepoints”. En la segunda columna se muestra si el punto de cambio es significativo, para lo cual existen tres posibilidades en cuanto al brinco, son las siguientes: Si es significativo “Yes”; No es significativo “No”; Hay duda “?”.

De la Figura 20 se puede observar que se identificaron dos puntos de cambio (brincos) que son del tipo 1, ya que no cuentan con metadatos. También se señala que uno de los cambios es significativo (Yes) y el otro presenta duda (?).

RHtestsV4 realiza este análisis para cada una de las variables de manera independiente, por tanto, los resultados encontrados difieren entre una variable y otra, tanto en los brincos detectados como en su homogeneización. Los saltos detectados en el caso del Observatorio de Xalapa (Figura 20), en las series mensuales se leen siendo los primero cuatro dígitos representan el año y los dos siguientes asociados al mes (yyymm). Estos saltos se pueden relacionar con diferentes situaciones que ayuden a decidir si se ajustan o no los brincos:

- i. Salto con yyymm?, dudoso para ser significativo. Este tipo de fecha muestra un salto que se consideran no significativas.

- ii. En los casos yyyyymm donde hubo coincidencia con ocurrencia de eventos de El Niño o La Niña, de acuerdo con el índice multivariado de El Niño/Oscilación del Sur (MEI por sus siglas en inglés, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/rank.html>), respectivamente, no se ajustan esos saltos.
- iii. Para yyyyymm indica que estos brincos se repitieron en estaciones cercanas, por lo tanto, no se ajustan.
- iv. Para yyyyymm se tiene el caso que después de esta fecha hay datos faltantes.
- v. Finalmente, las fechas que no entran en alguno de los casos anteriores se ajustaron

Tabla 13. Saltos detectados en las series de datos de la temperatura mínima y su relación con factores que propician los brincos.

| Temperatura mínima | | | |
|--------------------|-----------------------------|--------|-----------|
| Lugar | Saltos Mensuales Detectados | | Causa |
| Observatorio | 198312 | 200011 | Años Niña |

En el caso de la Tabla 13 y la Figura 20 se observa que los saltos en las dos fechas identificadas por el software están relacionados con un año de La Niña, por lo anterior no hay que realizar ningún cambio en la estación, ya que el salto está relacionado a la variabilidad climática y declaramos la serie homogénea. Para el caso de la temperatura máxima el software no ha detectado puntos de cambio, por lo tanto la serie que se está probando puede declararse homogénea.

Después de realizar este procedimiento ya se tienen series con control de calidad y análisis de homogeneidad, por lo que se puede proceder a la realización del cálculo de los índices de cambio climático que se describe a continuación.

Cálculo de Índices de Cambio Climático

El ETCCDI ha venido impulsando a escala global el cálculo de índices de cambio climático a partir de datos diarios. El uso sistemático de dichos índices ha permitido mejorar el diagnóstico global de los cambios en extremos de temperatura y precipitación (Alexander *et al.*, 2006). El cálculo es relativamente directo si se realiza con alguna de las herramientas de software diseñadas para el propósito (e.g. RClimdex, FClimdex, etc). En este bloque se usará el software RClimdex disponible en <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>. A continuación, se describen los 27 índices de cambio climático que se pueden calcular con este paquete de R (Vázquez Aguirre, 2010). Es importante resaltar que estos índices están vinculados

con las variables de temperatura máxima y mínima, así como la precipitación, teniendo diferentes formas de cálculo (Tabla 14):

Tabla 14. Formas de cálculo para los 27 índices de cambio climático.

| Tipo de cálculo | Descripción | Índice de ETCCDI |
|--------------------|---|--|
| UMBRALES | Número de días en los cuales un valor de temperatura o precipitación se encuentra sobre o por debajo de un umbral fijo. Los umbrales son específicos para cada variable y se aplican para todo el país. | <ul style="list-style-type: none"> - FD0. Días con helada ($T_{min} < 0$) - SU25. Días de verano ($T_{max} > 25$) - ID0. Días de hielo ($T_{max} < 0$) - TR20. Noches tropicales ($T_{min} > 20$) - R10. Días con lluvia mayor a 10mm ($PCP \geq 10mm$) - R20. Días con lluvia mayor a 20mm ($PCP \geq 20mm$) |
| PERCENTILES | <p>Para la temperatura se utilizan los siguientes percentiles: 10 relacionado con temperaturas frías y el percentil 90 el cual se asocia a temperaturas cálidas.</p> <p>En cuanto a la precipitación se utiliza el percentil 95 o 99. Este tipo de metodología se ajusta a la climatología de cada lugar.</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Tn10p. Frecuencia de noches frías ($T_{min} < 10$ percentil) - Tx10p. Frecuencia de días frescos ($T_{max} < 10$ percentil) - Tn90p. Frecuencia de noches cálidas ($T_{min} > 90$ percentil) - Tx90p. Frecuencia de días calurosos ($T_{max} > 90$ percentil) - R95pTOT. Días muy húmedos ($PCP > 95$ percentil) - R99p. Días extremadamente húmedos ($PCP > 99$ percentil) |

| | | |
|-----------|---|---|
| ABSOLUTOS | Representan los valores máximos y mínimos de una variable en un mes, temporada o año. Este tipo de metodología se ajusta a la climatología de cada lugar. | <ul style="list-style-type: none"> - TXx. Temperatura máxima extrema (La máxima Tmax diaria cada mes) - TXn. Temperatura máxima más baja (Tmax diaria más baja mensual) - TNx. Temperatura mínima más alta (Tmin máxima mensual) - TNn. Temperatura mínima extrema (Tmin más baja mensual) - Rx1day. Precipitación máxima en un día. (Máximo mensual de precipitación en 1 día) - Rx5day. Precipitación máxima en cinco días (Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos) |
| DURACIÓN | Definen periodos de tiempo extremos con cierta duración y características climáticas. | <ul style="list-style-type: none"> -GSL. Estación de crecimiento (ocurrencia de 6 días consecutivos con: $T_{ij} > 5^{\circ}\text{C}$) - WSDI. Duración de los períodos cálidos (por lo menos 6 días consecutivos: $T_{xij} > T_{xen90}$) - CSDI. Duración de los períodos fríos (por lo menos 6 días consecutivos: $T_{nij} < T_{nen10}$) |
| OTROS | Aquellos que no caen en alguna de las categorías anteriores | <ul style="list-style-type: none"> -DTR. Rango diurno de temperatura (Diferencia media mensual entre Tmax y Tmin) -SDII. Índice simple de intensidad de precipitación diaria (PCP anual total dividida por el número de días húmedos ≥ 1 mm en un año) -PRCPTOT. Precipitación total anual. (PCP anual total en los días húmedos ≥ 1 mm) |

Fuente: (López Díaz, 2015)

Se va a utilizar el paquete “RClimDex”, el cual calcula los 27 índices básicos del ETCCDI, pero el usuario puede seleccionar los índices en los que se está interesado, de acuerdo con el objetivo de la investigación y la relevancia de cada uno de los índices para la zona de estudio. Para los fines de esta tesis se utilizarán, los índices relacionados con la temperatura mínima y máxima. A continuación, se exponen las razones por las que algunos índices vinculados a las variables de interés fueron descartados:

Índices de umbrales: Días con helada ($T_{min} < 0$); Días de hielo ($T_{max} < 0$), ya que no arrojaron resultados, por su definición, ya que en la zona de estudio no se

presentan temperaturas diarias menores a 0°C.

Índices de duración: El indicador de estación de crecimiento es útil sólo para latitudes altas.

Los resultados de ejecutar RClimDex muestran el cálculo de cada uno de los índices seleccionados por año, ya sea un promedio anual o por matrices mensuales e incorporando un promedio anual. En el caso de la carpeta “trend” (que llamaremos pendiente) muestra un resumen de la tendencia para el período de análisis de cada uno de los índices evaluados (Tabla 15).

Tabla 15. Pendiente, desviación estándar y significancia de los índices de cambio climático para la estación Observatorio 30075.

| Lon | Lat | Indices | SYear | EYear | Slope | STD_of_Slope | P_Value |
|-------|-----|---------|-------|-------|--------|--------------|---------|
| 19.51 | -96 | su25 | 1981 | 2022 | 2.397 | 0.295 | 0 |
| 19.51 | -96 | tr20 | 1981 | 2022 | -0.069 | 0.041 | 0.099 |
| 19.51 | -96 | gsl | 1981 | 2022 | 0.001 | 0.006 | 0.886 |
| 19.51 | -96 | txx | 1981 | 2022 | 0.043 | 0.025 | 0.098 |
| 19.51 | -96 | txn | 1981 | 2022 | 0.063 | 0.021 | 0.006 |
| 19.51 | -96 | tnx | 1981 | 2022 | -0.033 | 0.017 | 0.064 |
| 19.51 | -96 | tnn | 1981 | 2022 | -0.018 | 0.022 | 0.409 |
| 19.51 | -96 | tx10p | 1981 | 2022 | -0.275 | 0.079 | 0.001 |
| 19.51 | -96 | tx90p | 1981 | 2022 | 0.31 | 0.054 | 0 |
| 19.51 | -96 | tn10p | 1981 | 2022 | 0.1 | 0.088 | 0.264 |
| 19.51 | -96 | tn90p | 1981 | 2022 | -0.079 | 0.112 | 0.485 |
| 19.51 | -96 | csdi | 1981 | 2022 | -0.06 | 0.094 | 0.524 |
| 19.51 | -96 | dtr | 1981 | 2022 | 0.061 | 0.011 | 0 |

Nota: el color rojo indica pendiente positiva de los índices, el color azul pendiente negativa y el color verde los índices con cambios significativos.

Podemos observar que las primeras dos columnas están relacionadas con la ubicación de la estación, en la tercera columna se presenta el acrónimo de cada uno de los índices que se calculó, en la cuarta y quinta columnas se muestra el período de análisis para cada índice, en la sexta columna muestra el cálculo de la pendiente de una regresión lineal de mínimos cuadrados. La séptima columna es la desviación estándar de la pendiente y en la última columna se tiene el p-value el cual indica si la pendiente es estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0.05$) o no.

En la Tabla 15 de forma general se tienen los 13 índices calculados para la temperatura máxima y mínima. Solamente cinco índices presentan cambios significativos en la pendiente, de acuerdo con lo que indica el p-value (casos marcados en verde) y se observa que son índices vinculados a la temperatura máxima donde hay una clara tendencia al incremento de esta variable. Debido que en el caso de la temperatura mínima no se presentan cambios significativos en la pendiente se partirá de analizar gráficamente cada uno de los índices (carpeta “plots”).

Las gráficas producidas por RClimindex para cada uno de los índices contiene los siguientes elementos para su interpretación: la línea unida por pequeños círculos corresponde al índice, la línea recta continua es un ajuste de tendencia por mínimos cuadrados y la línea punteada un ajuste de regresión lineal localmente ponderada (Vázquez Aguirre, 2010). A continuación, se presentan algunos ejemplos de las gráficas.

- Índices por umbrales:

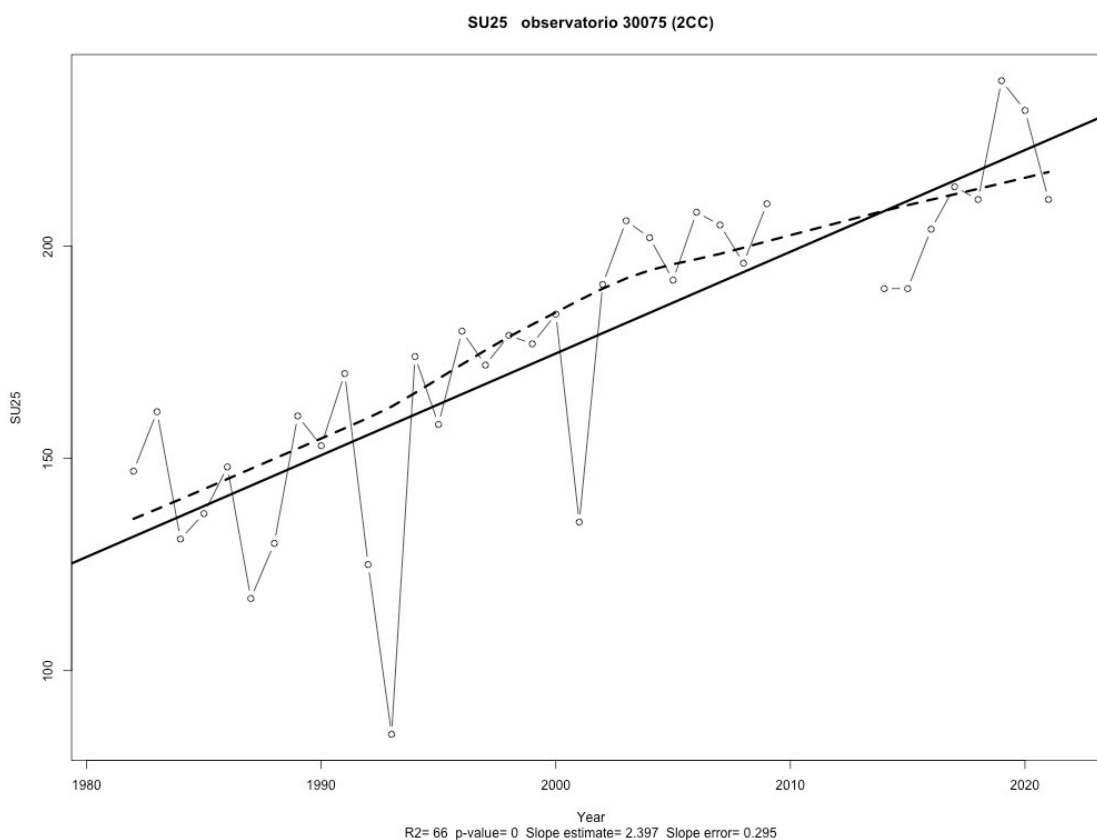


Figura 21. Índice Días de verano (SU25= $T_{max} > 25$) para la estación de Observatorio.

El índice de días de verano en la ciudad de Xalapa se **incrementó** a lo largo del periodo de análisis, es decir, la **temperatura máxima** en Xalapa está aumentando, ya que cada año presenta mayor incidencia de días que rebasan el umbral de 25°C, adicionalmente se puede constatar que el ajuste que arroja el software es significativo y que tiene una pendiente positiva (Figura 21).

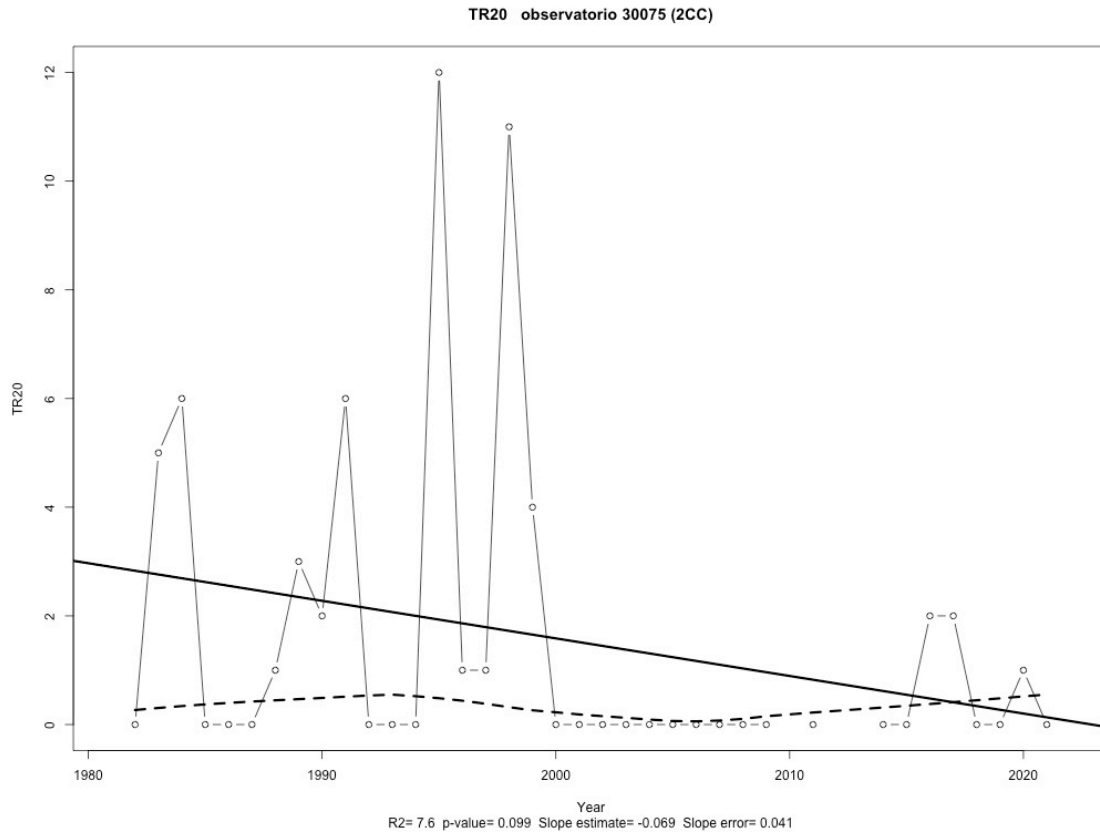


Figura 22. Índice noches tropicales (TR20= Tmin> 20°C) para la Estación de Observatorio.

La Figura 22 del índice de **noches tropicales** muestra que por medio del ajuste de pendiente no hay un cambio significativo, al ser el p-value mayor a 0.05, pero al observar el comportamiento se puede dividir en dos segmentos, el primero de 1980 a 1999 donde se presentaba una tendencia al incremento, mientras que en el segundo hubo una disminución al principio, pero posteriormente en los años hay un aumento de TR20. Si bien el ajuste de mínimos cuadrados (línea recta) que realiza el software no se ajusta bien al comportamiento de los datos observados se tiene el ajuste de regresión lineal localmente ponderada (línea punteada) el cual presenta un mejor ajuste. En la ciudad de Xalapa presenta un **incremento** asociado a la **temperatura mínima**. Es importante resaltar que se han tenido casos extraordinarios de noches con temperaturas por encima de 20°C, dada que la climatología de Xalapa es de 13.7°C, pero que si han ocurrido, y en años recientes han sido menos.

- Índices por percentiles:

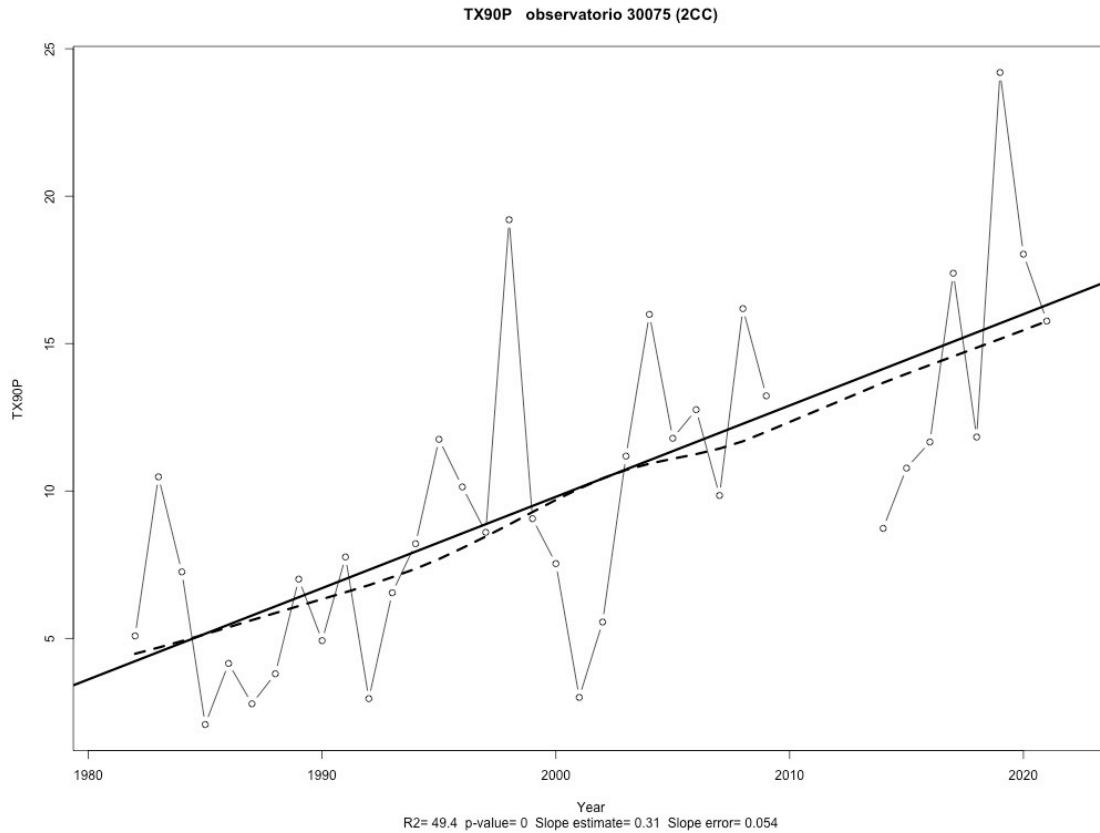


Figura 23. Índice de frecuencia de días calurosos (TX90P= Tmax>90percentil) para la Estación de Observatorio.

Los índices basados en los percentiles, los cuales varían en función de la climatología de cada lugar, ayudan a ver de forma más particular qué es lo que está pasando en el sitio de estudio. El índice de días calurosos presenta una **tendencia al incremento** al tener un cambio significativo en el tiempo ($p\text{-value}>0.05$). Este índice se relaciona con el **percentil 90 de la temperatura máxima**, es decir, las temperaturas más cálidas dentro de la temperatura máxima y cada vez es más frecuente que días presenten esta condición (Figura 23).

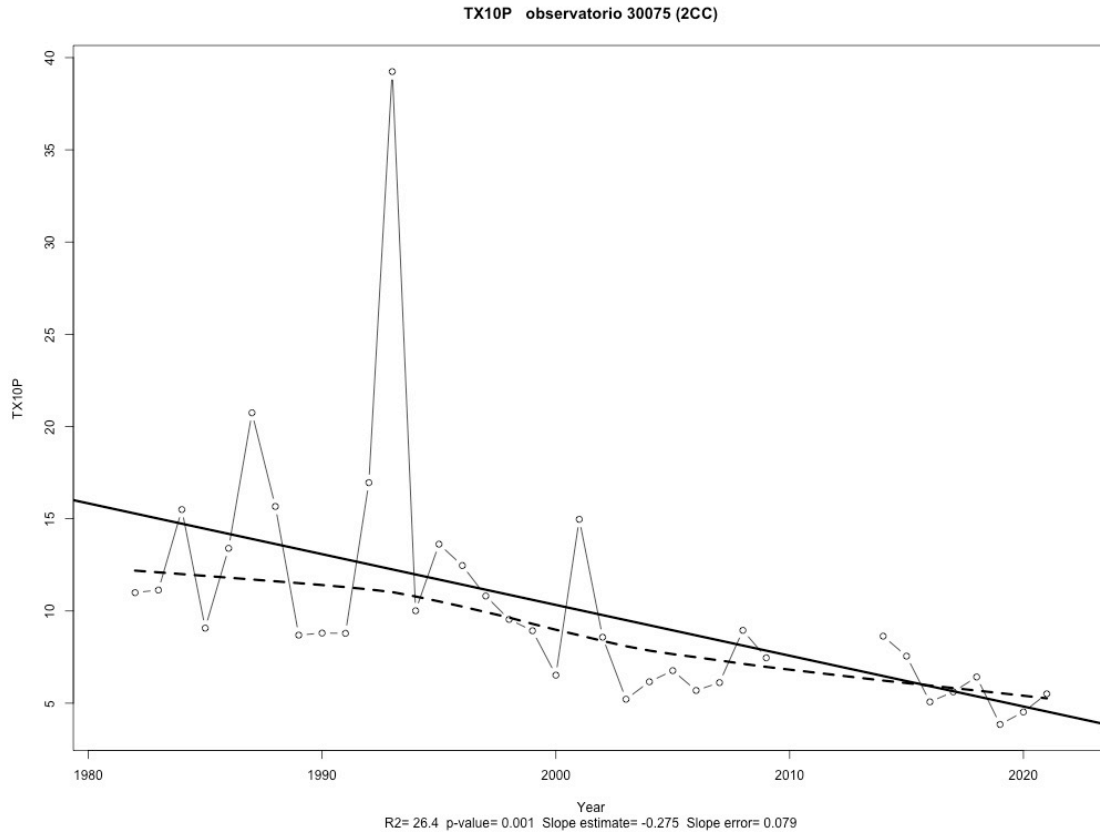


Figura 24. Índice de frecuencia de días frescos (TX10P= $T_{max} < 10\text{percentil}$) para la Estación de Observatorio.

En cuanto a la temperatura máxima para el caso del índice de frecuencia de **días frescos** se presenta una **tendencia negativa**, esto significa que las temperaturas más bajas de la **temperatura máxima** están aumentando al tener un cambio significativo en el tiempo ($p\text{-value} < 0.05$) (Figura 24).

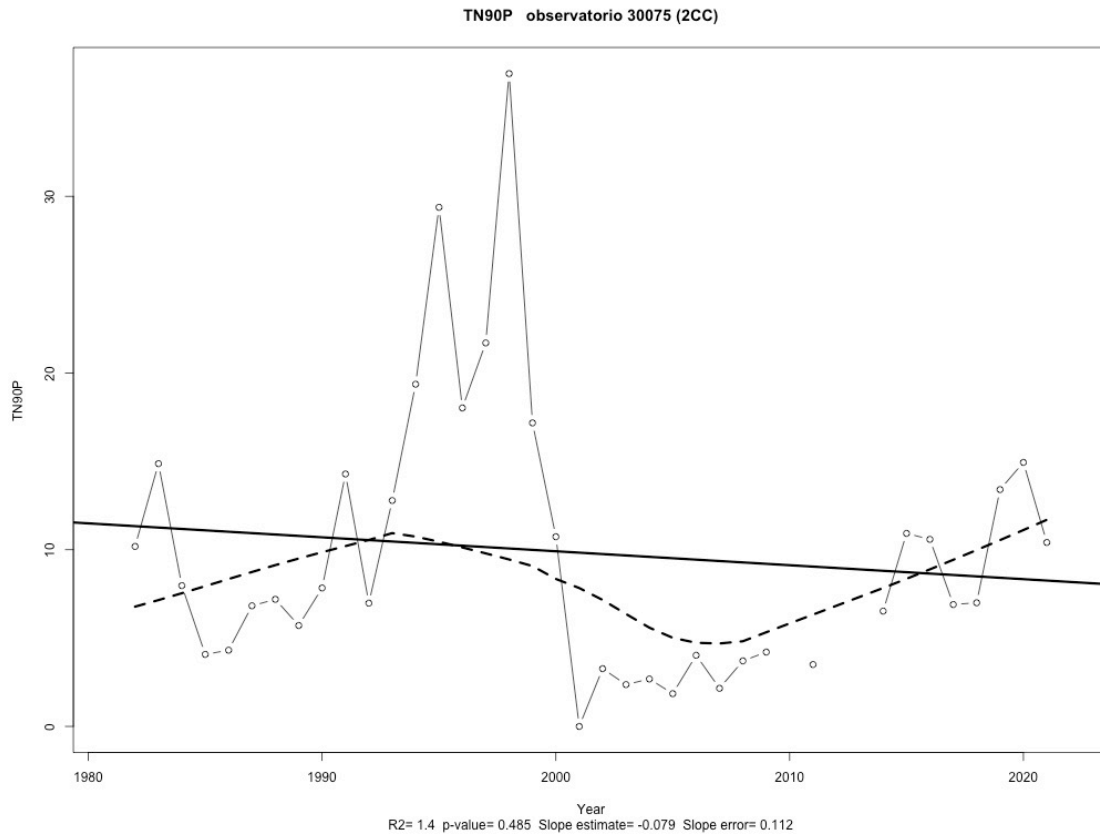


Figura 25. Índice de frecuencia de noches cálidas (TN90P= Tmin>90percentil) para la Estación de Observatorio.

Para este índice el ajuste arrojado por el software no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$), pero al observar el comportamiento de los datos y la línea punteada, la frecuencia de **noches cálidas** presenta una **tendencia positiva** y se relaciona con el **percentil 90 de la Tmin**. Por lo tanto, se puede observar que la temperatura mínima está tendiendo a ser cada vez más cálida (Figura 25).

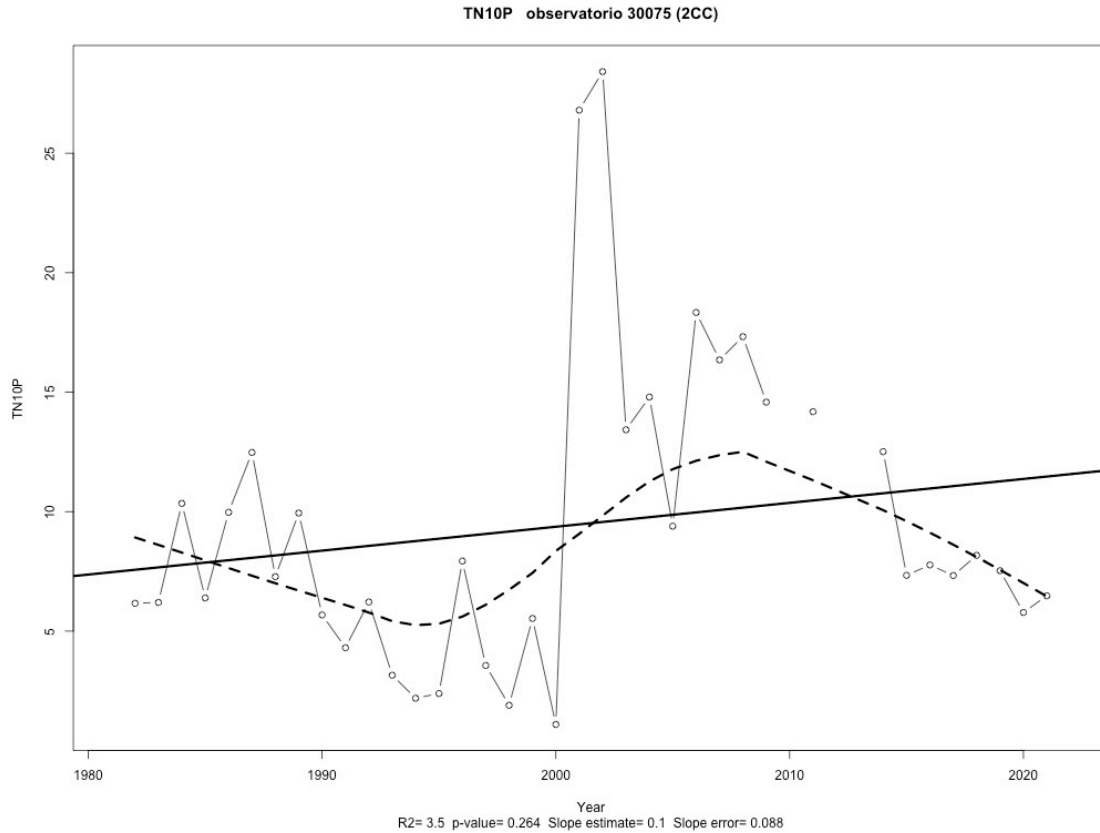


Figura 26. Índice de frecuencia de noches frías (TN10P= Tmin<10percentil) para la Estación de Observatorio.

Para la temperatura mínima, el análisis del índice de **noches frías** presenta una **tendencia a disminuir**. Este índice se relaciona con el **percentil 10 de la Tmin**, es decir, las temperaturas más frías dentro de la temperatura mínima. Lo anterior se puede observar en el comportamiento de los datos, ya que en este caso el ajuste arrojado por el software no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$). La disminución en la frecuencia de noches frías en la ciudad se puede asociar a que los valores de la temperatura mínima están incrementando (Figura 26).

- Índices absolutos:

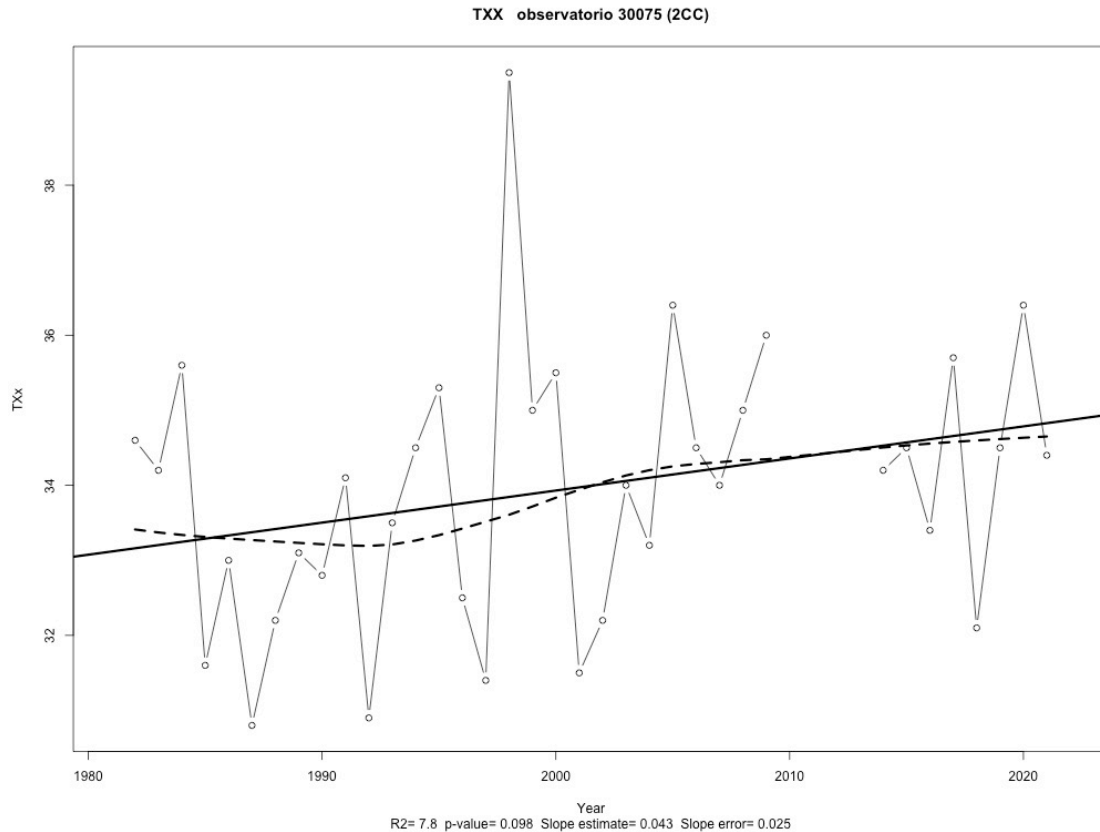


Figura 27. Índice de temperatura máxima extrema (TXX) para la Estación de Observatorio.

El índice **Temperatura máxima extrema** que explica el comportamiento de la **temperatura máxima más alta** de cada mes. Tiene una tendencia a **incrementar**, dicho de otra manera, que las temperaturas máximas más altas están aumentando (la información presentada en el eje “Y” son °C). Lo anterior se puede observar en el comportamiento de los datos y la línea punteada, ya que en este caso el ajuste arrojado por el software no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$) (Figura 27).

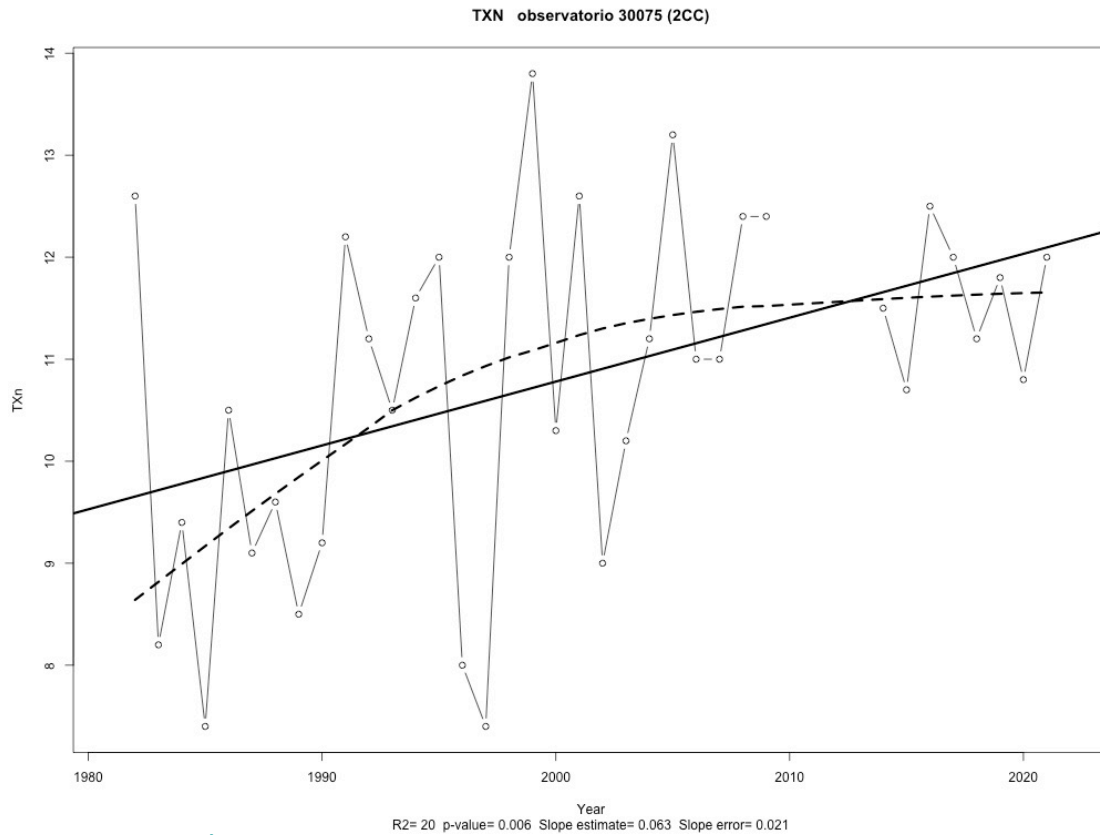


Figura 28. Índice de temperatura máxima más baja (TXN) para la Estación de Observatorio.

El índice **Temperatura máxima más baja** de cada mes, este índice presenta **una tendencia al incremento**, lo que significa que las temperaturas máximas más frías de cada mes se están calentando al tener un cambio significativo en el tiempo ($p\text{-value} < 0.05$) (las unidades del eje “Y” son °C) (Figura 28). Por lo tanto, con este tipo de índices se puede concluir que la temperatura máxima está aumentando.

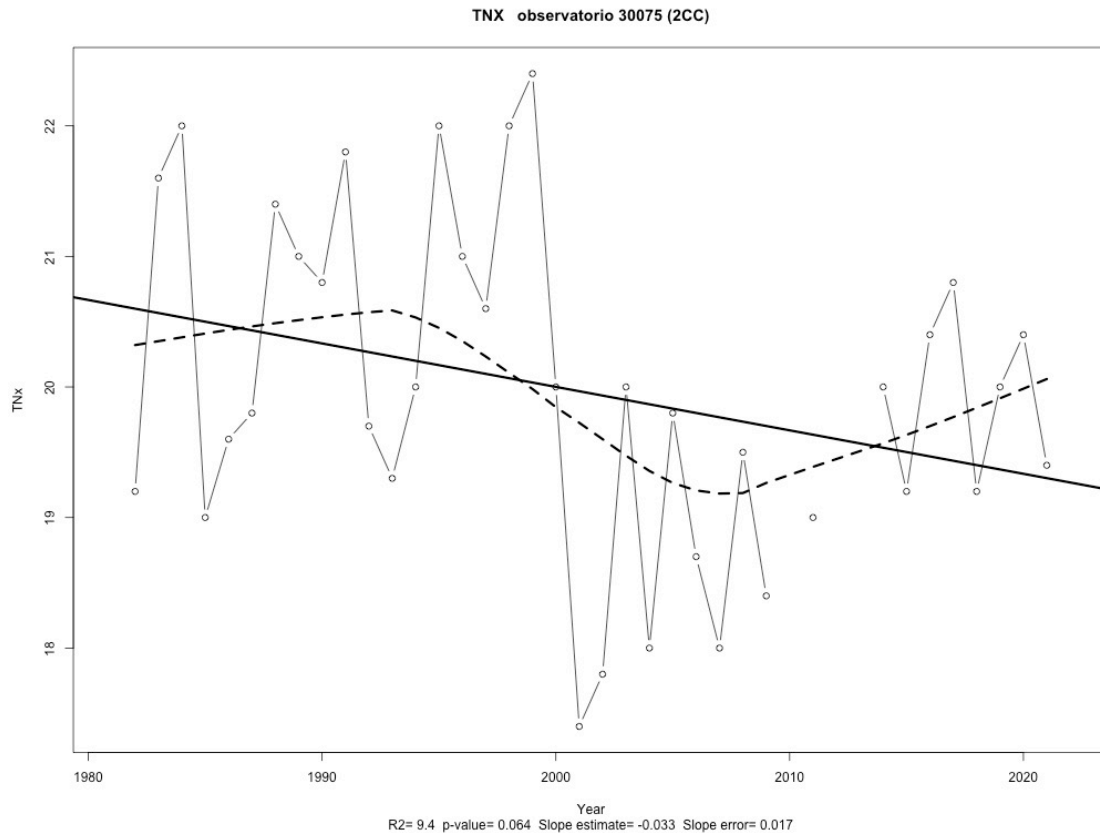


Figura 29. Índice de temperatura mínima más alta (TNX) para la Estación de Observatorio.

Para el índice **Temperatura mínima más alta** de cada mes tiene una tendencia a **incrementar**, es decir, que las temperaturas mínimas más altas se están calentando (la información presentada en el eje “Y” son °C). Lo anterior se puede observar en el comportamiento de los datos y la línea punteada, ya que en este caso el ajuste arrojado por el software no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$) (Figura 29).

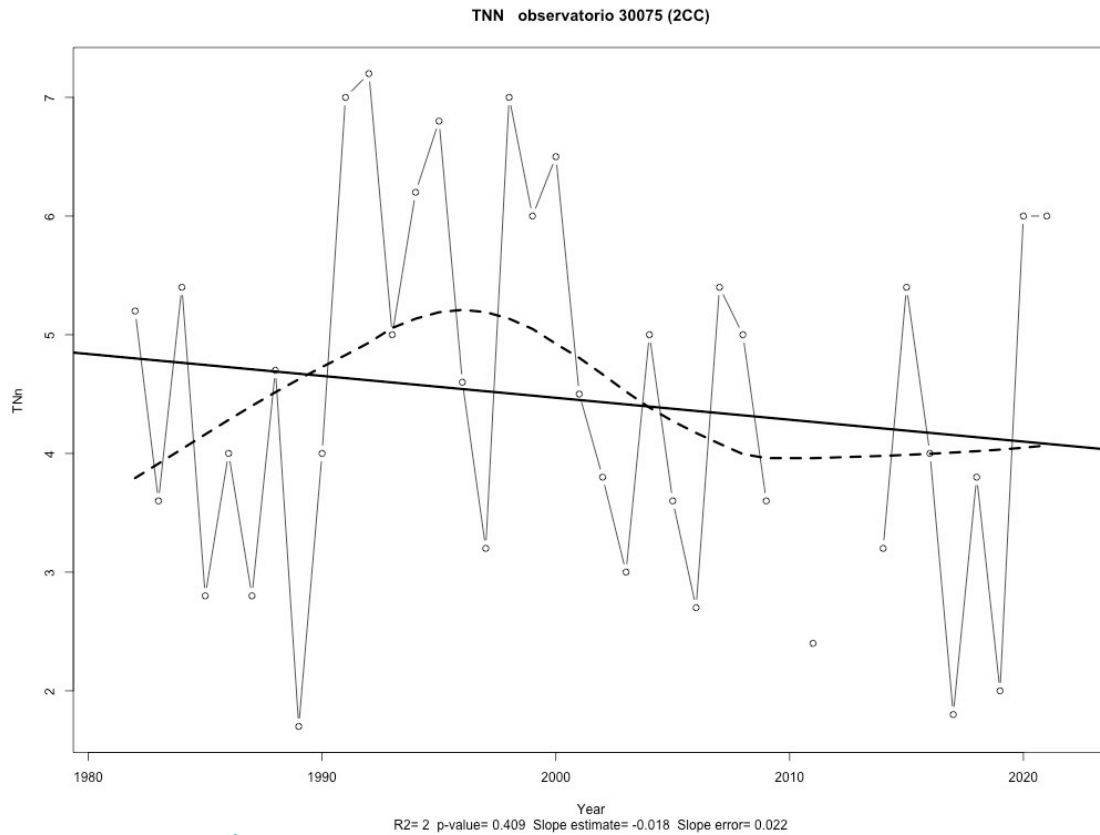


Figura 30. Índice temperatura mínima extrema (TNN) para la Estación de Observatorio.

El índice **Temperatura mínima extrema** está asociado a la **temperatura mínima más fría** de cada mes. Presenta mucha variabilidad, aunque en los últimos dos años la Tmin es más cálida (la información presentada en el eje “Y” son °C). Lo anterior se puede observar en el comportamiento de los datos y la línea punteada, ya que en este caso el ajuste arrojado por el software no es significativo ($p\text{-value} > 0.05$). Por lo tanto, se concluye que temperatura mínima está calentándose (Figura 30).

- Índices por duración

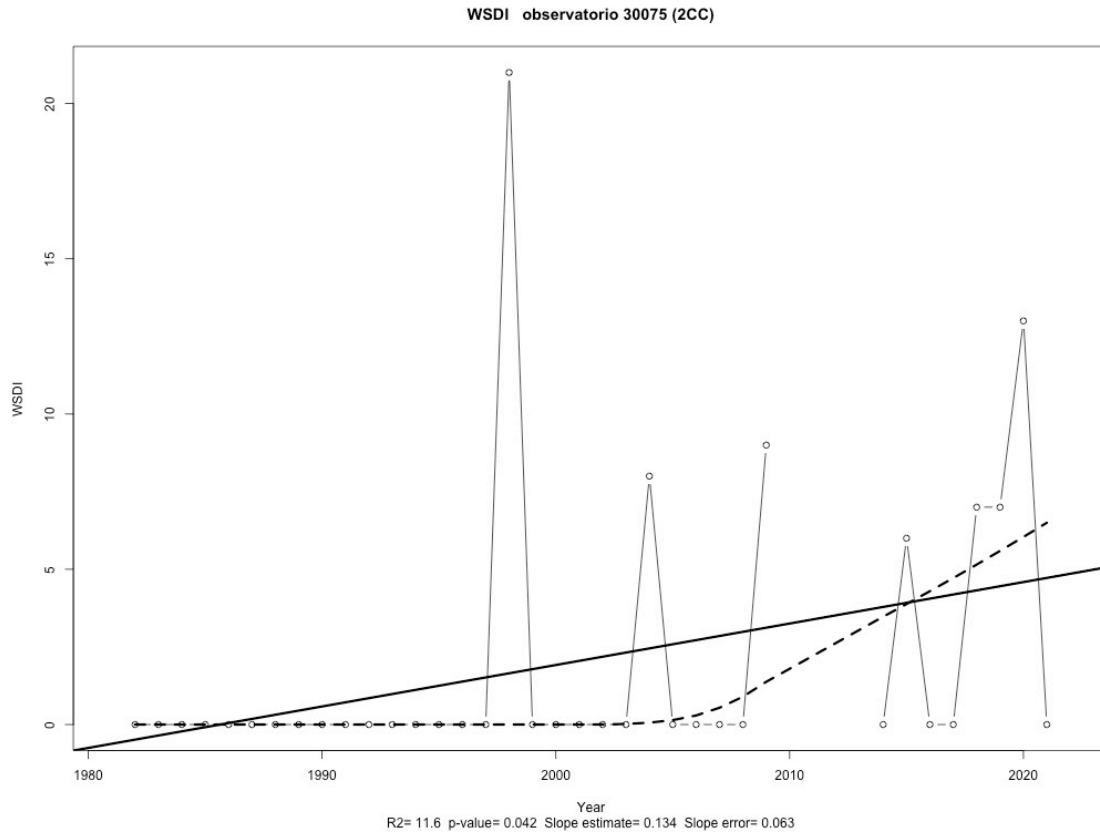


Figura 31. Índice de duración de los periodos cálidos (WSDI= por lo menos 6 días consecutivos: $T_{xij} > T_{xen90}$).

El **índice de duración de periodos cálidos** indica cuando la temperatura máxima diaria es mayor al percentil noventa durante un periodo de ocurrencia de 6 días consecutivos. En la ciudad Xalapa está **incrementado** a lo largo del periodo de análisis, es decir, los periodos cálidos son cada vez más recurrentes en la ciudad al tener un cambio significativo en el tiempo ($p\text{-value} < 0.05$) (Figura 31).

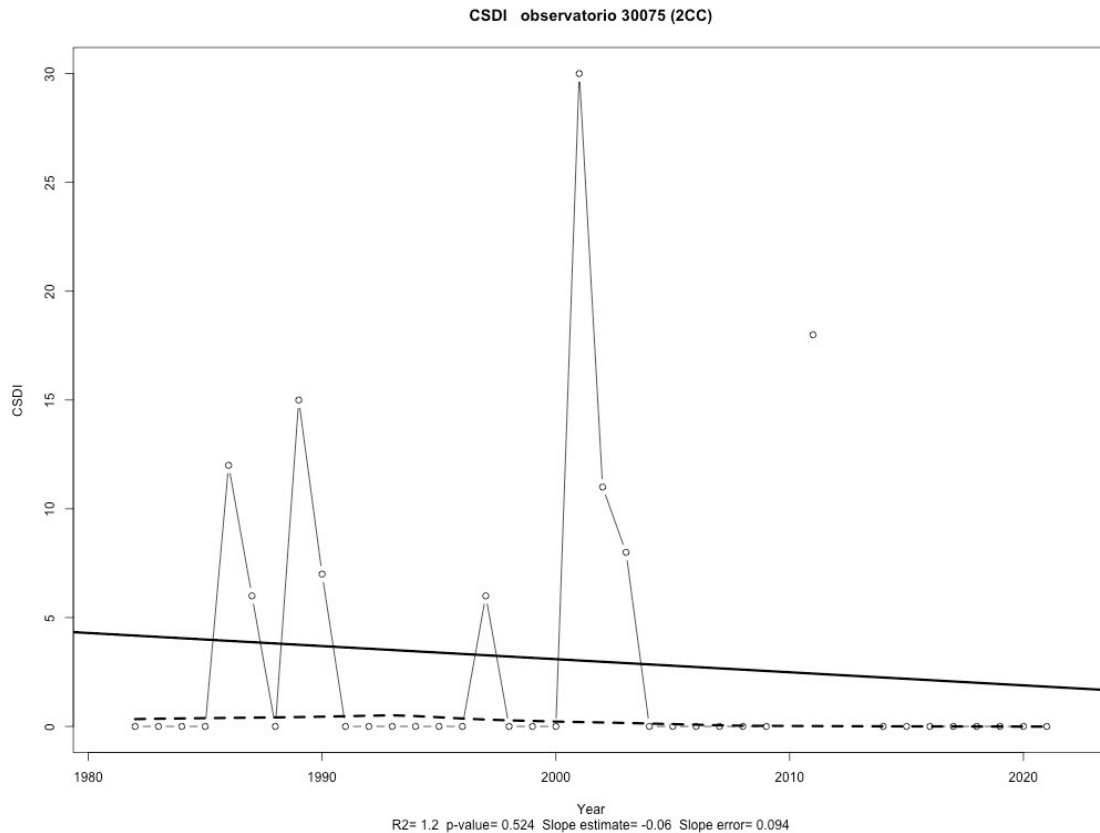


Figura 32. Índice de duración de los periodos fríos (CSDI= por lo menos 6 días consecutivos: $T_{nij} < T_{nen10}$).

En el caso de los **periodos fríos**, la gráfica se puede dividir en dos secciones de 1982 al 2004 cuando hubo presencia de estos periodos y de 2005 a 2022 en donde CSDI no se ha presentado, lo que muestra que desde el inicio del periodo analizado a la actualidad tiene una tendencia a la disminución de la duración de los periodos fríos. Lo que significa que la temperatura mínima está **incrementando** y los periodos de días consecutivos con temperaturas bajas han disminuido (Figura 32).

En general se puede observar que la temperatura mínima y la máxima están aumentando a lo largo del periodo, por lo tanto, el clima en la estación de Observatorio de la ciudad de Xalapa está siendo más cálido. De forma adicional se puede observar que los índices vinculados con la temperatura máxima presentan un cambio significativo a lo largo del periodo y la pendiente tiene un buen ajuste con el comportamiento de los datos observados. Con este análisis queda cubierto el objetivo particular uno que se plantea en la tesis “Emplear los índices del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés) para analizar las tendencias observadas en las temperaturas máximas y mínimas de la región de estudio”.

En el caso de la temperatura mínima, aunque no presenta un buen ajuste al comportamiento de los datos con la pendiente, se puede analizar el comportamiento observando la variabilidad de los datos observados. Otro elemento que se observa es que durante el periodo del 2000 al 2008 la temperatura máxima esta incrementado, pero la temperatura mínima está disminuyendo, haciendo el clima más extremo, pero eso se vincula con la presencia del fenómeno de La Niña, la cual genera, estadísticamente, inviernos más cálidos, pero con eventos fríos extremos de un par de días de duración y más lluvia, en verano el ambiente es caluroso con lluvias más escasas (Secretaría de Protección Civil Veracruz, 2022), lo cual muestra como fenómenos de baja frecuencia tienen impacto en el comportamiento del clima local y puede ser mayor a la señal de la urbanización. El análisis de las otras estaciones se desglosa en el Anexo III de la tesis.

Modificaciones asociadas al cambio climático

Con el análisis de los índices de cambio climático que se han evaluado para la ciudad de Xalapa se observó que se presentan modificaciones en el comportamiento de las temperaturas extremas (máxima y mínima) (Cervantes Pérez, *et al.* 2001; Tejeda-Martínez y Acevedo-Rosas, 1990; IPCC, 2021) y esto lo plantea el IPCC por medio de tres posibles modificaciones en los eventos extremos.

Las variaciones que se observan del análisis de tendencia de los índices de cambio climático para las estaciones muestran el comportamiento de las variables, se puede decir que se encuentra en el caso de valor medio desplazado hacia los extremos cálidos. Lo anterior debido a que en los datos se observa la presencia de más temperaturas extremadamente cálidas y menos temperaturas mínimas frías (IPCC, 2021) (Figura 33).

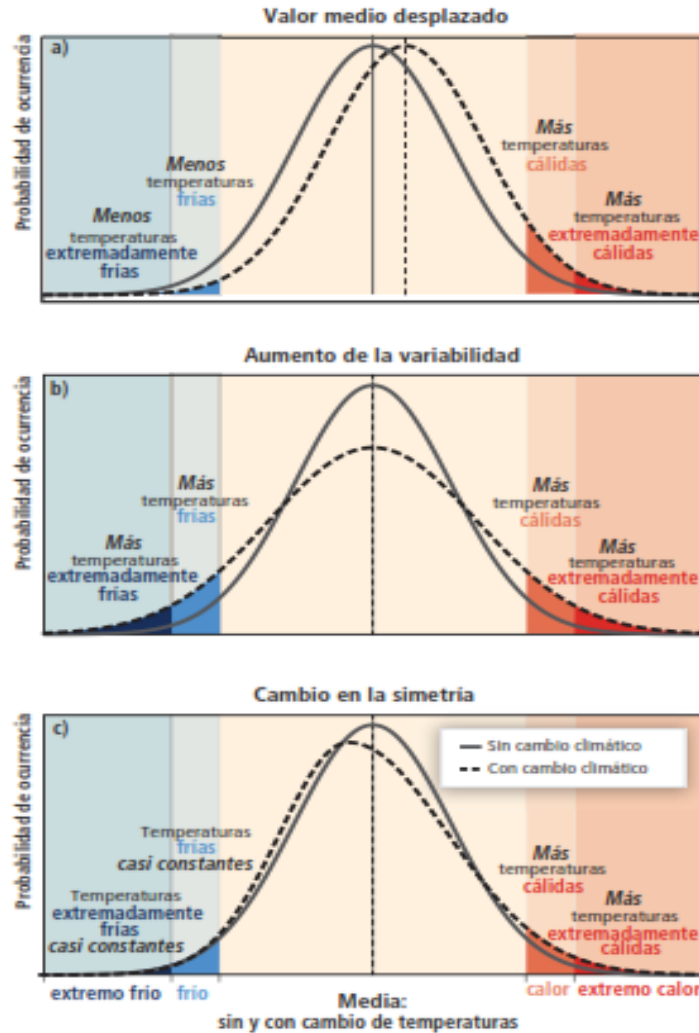


Figura 33. Cambio en el clima puede conducir a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de los eventos extremos. **Fuente:** (IPCC, 2012).

Después del análisis de los índices de la temperatura máxima y mínima se analizará la tendencia de la incidencia de las ondas de calor. Cuando se realizan estudios sobre temperatura es común referirse a los valores promedios y su comportamiento a través del tiempo y con ello identificar la tendencia. Sin embargo, el promedio por sí sólo no representa las tendencias al cambio o variabilidad, ya que esta medida suaviza la información. Los valores extremos permiten una mejor identificación de la tendencia (Díaz Peón, *et al.*, 2015).

Otro fenómeno que está vinculado a la modificación del comportamiento de la temperatura máxima y mínima derivado del proceso de urbanización es la ocurrencia de ondas de calor, por lo anterior se presenta el análisis realizado para este tema.

Ondas de Calor

Las evidencias del cambio climático observado muestran que se han incrementado las olas de calor, con más días y noches más cálidas, a la vez que han disminuido las olas de frío. Estas condiciones se exacerban por el efecto isla de calor de las ciudades, aumentando los riesgos en la salud y el bienestar de sus habitantes. Las proyecciones climáticas indican que estos efectos se acentuarán en el futuro (IPCC, 2021b y IPCC, 2022a).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), define “una onda calor, como el periodo de más de tres días consecutivos con temperaturas por arriba del promedio, esto aplica tanto para las temperaturas máximas como para las mínimas” (CENAPRED, 2020). Debido a que este tipo de fenómeno depende de la climatología de cada sitio de interés en el trabajo desarrollado por Díaz Lázaro, (2011) considera una onda de calor cuando en un intervalo de por lo menos un día la temperatura máxima y mínima coincide o sobrepasa el percentil 95, cuyos valores son en Xalapa 30.2°C y 16.4°C.

Por lo anterior la definición de onda de calor que se propone utilizar y actualizar es “un periodo de tres o más días consecutivos con una temperatura mínima de 16°C o mayor y con una temperatura máxima de 30°C o mayor”. Esta definición parte de considerar lo establecido por el CENAPRED que es la institución federal que define estos tipos de eventos y considerar el percentil 95 de la ciudad, pero redondeado, ya que la unidad menor de un termómetro convencional es de 0.5°C y al utilizar el valor exacto se podría dejar afuera la ocurrencia de ondas de calor.

Partiendo de las condiciones establecidas en la definición se realizaron los siguientes pasos para el análisis:

- a) Redondeo de los datos observados de temperatura máxima y mínima hacia el entero próximo ($x < 0.5$ baja; $x \geq 0.5$ sube).

Función: =REDONDEAR(D2,0)

- b) Posteriormente se usa la función “SI” de Excel donde comparamos si el dato redondeado es mayor o igual al valor del umbral (30°C o 16°C) dando como respuesta si el día cuenta con condición para una onda de calor o no.

| Año | Mes | Día | T max | T max Redondeo | Umbral Redondeo | Condición de onda de calor |
|------|-----|-----|-------|----------------|-----------------|----------------------------|
| 1982 | | 1 | 22.6 | 23 | 30 | No |
| 1982 | | 1 | 28 | 28 | 30 | No |
| 1982 | | 1 | 29.8 | 30 | 30 | Onda |
| 1982 | | 1 | 20.4 | 20 | 30 | No |
| 1982 | | 1 | 22.2 | 22 | 30 | No |

Función: =SI(E2>=F2,"Onda","No")

c) Se realiza el paso anterior para las dos variables (Tmax y Tmin).

| T max Redondeo | Umbral Redondeo | Condición de onda de calor | T min | T min Redondeo | Umbral Redondeo | Condición de Onda de Calor |
|----------------|-----------------|----------------------------|-------|----------------|-----------------|----------------------------|
| 23 | 30 | No | | 13.6 | 14 | 16 No |
| 28 | 30 | No | | 13.2 | 13 | 16 No |
| 30 | 30 | Onda | | 15.2 | 15 | 16 No |
| 20 | 30 | No | | 11.4 | 11 | 16 No |
| 22 | 30 | No | | 8.4 | 8 | 16 No |

d) Después se aplica un filtro sobre la condición de onda de calor, seleccionando la opción “Onda” en una variable (Tmax) y se aplica la función igual.

| Umbral Redondeo | Condición de onda de calor | T min | T min Redondeo | Umbral Redondeo | Condición de Onda de Calor | Onda de Calor |
|-----------------|----------------------------|-------|----------------|-----------------|----------------------------|---------------|
| 30 | Onda | 15.2 | 15 | 16 | No | FALSO |
| 30 | Onda | 16.4 | 16 | 16 | Onda | VERDADERO |
| 30 | Onda | 15.6 | 16 | 16 | Onda | VERDADERO |
| 30 | Onda | 16 | 16 | 16 | Onda | VERDADERO |
| 30 | Onda | 15 | 15 | 16 | No | FALSO |

Donde se obtiene si se presentan las condiciones de la temperatura máxima y mínima. *Función: =G4=K4*

e) Se procedió a aplicar un filtro sobre la columna onda de calor donde solamente se selecciona la opción “verdadero” y se analiza el número de días consecutivos de duración y se marcan las de 3 días y mayor de esto.

| Año | Mes | Día | Onda de Calor | Días de duración |
|------|-----|-----|---------------|------------------|
| 1982 | | 3 | 16 VERDADERO | |
| 1982 | | 3 | 30 VERDADERO | |
| 1982 | | 3 | 31 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 3 VERDADERO | 7 |
| 1982 | | 4 | 4 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 5 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 6 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 7 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 8 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 9 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 14 VERDADERO | 4 |
| 1982 | | 4 | 15 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 16 VERDADERO | |
| 1982 | | 4 | 17 VERDADERO | |

Con lo anterior se tiene la identificación de las fechas en las que se presentan ondas de calor en cada una de las estaciones, así como su duración. Se puede observar que hay verdaderos que no están marcados, ya que no cumplen con las condiciones de ser 3 días consecutivos. En la Tabla 16 se resumen el total de las ondas de calor

ocurridas durante el periodo de análisis y la duración máxima de la onda de calor más severa.

Tabla 16. Total de ondas de calor de las tres estaciones.

| Estación | Periodo | Ondas de Calor | Duración máxima de un evento de onda de calor |
|--------------|-------------|----------------|---|
| Observatorio | 1982 – 2022 | 97 | 16 días (Mayo 1999) |
| Las Ánimas | 1954 – 1993 | 127 | 17 días (Abril-Mayo 1975) |
| Xalapa | 1953 – 1981 | 74 | 15 días (Abril-Mayo 1964) |

La estación de Las Ánimas es la que presenta más ondas de calor, pero es la primera estación que formó parte de la mancha urbana en la década de los 80's, en el caso de la estación Xalapa es la que tiene un periodo de tiempo más corto. El Observatorio de Xalapa del periodo de 1982 a 2022, presenta 97 ondas de calor (periodos de mínimo 3 días consecutivos con temperaturas mayores a $T_{min} > 16^{\circ}C$ y $T_{max} > 30^{\circ}C$). A continuación se muestra la información detallada sobre la estación Observatorio y el resto de las estaciones puede consultarse en el apartado "Anexo VI.- Ondas de Calor"

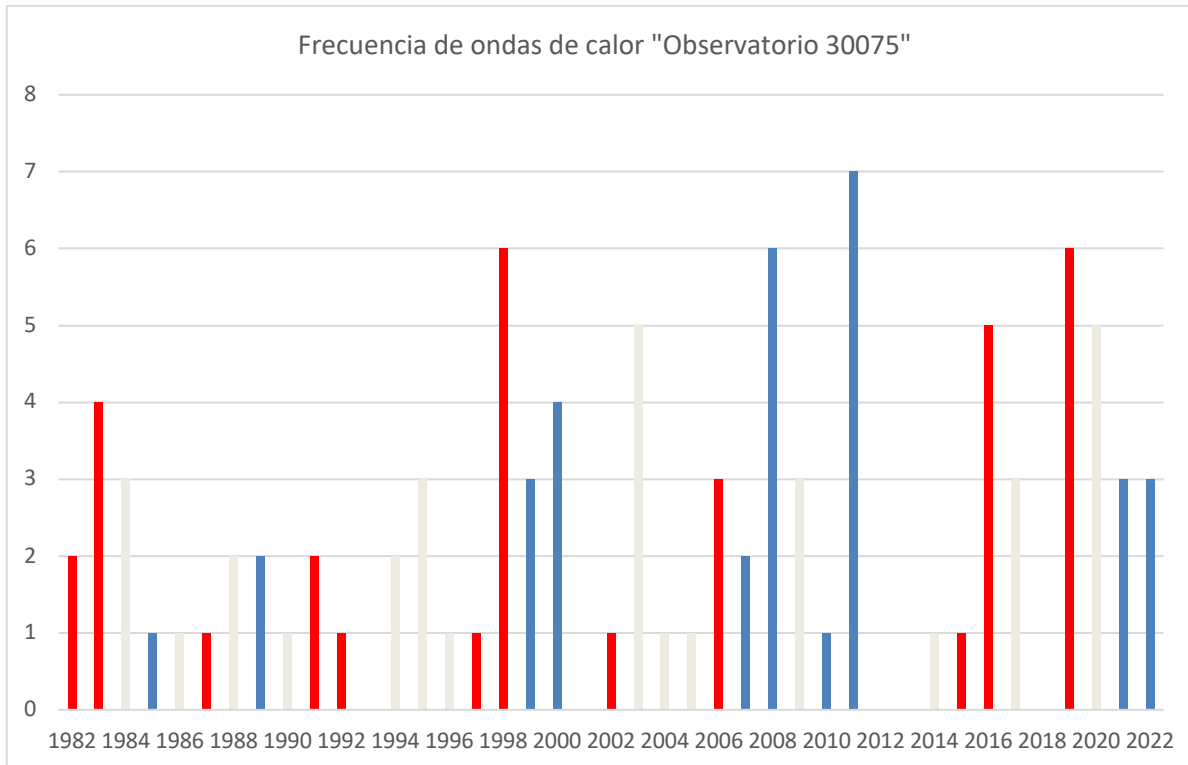


Figura 34. Frecuencia de la ocurrencia de ondas de calor de 1982 a 2022 en la estación de Observatorio de Xalapa. Donde las columnas representan años de El Niño (rojo), La Niña (azul) y Neutro (grises). Fuente: Elaboración propia con datos del SMN.

La Figura 34 muestra la frecuencia de ocurrencia de ondas de calor por año, en donde se distingue entre años de El Niño (rojo), La Niña (azul) y Neutro (grises). Se observa que la mayor frecuencia de ondas de calor ocurre tanto en años El Niño como La Niña. Uno de los años que presenta mayor recurrencia de ondas de calor es 1998, el cual fue año El Niño fuerte en el que el Estado de Veracruz reporta varios impactos (Angulo Fernández y González Álvarez, 2008). Por lo anterior no se muestra una vinculación entre las condiciones para declarar la ocurrencia de ondas de calor o la duración de éstas con la presencia de años El Niño o La Niña.

En la Tabla 17 se observa que los meses que tienen mayor recurrencia de ondas de calor son abril y mayo y que su duración en días desde la década de los 90's es mayor, asociado a lo anterior podemos observar que el comportamiento de las ondas de calor muestra que se están incrementando tanto la temperatura máxima y mínima ya que el umbral se asocia al percentil 95 de las temperaturas.

Tabla 17. Número de ondas de calor por año, duración de cada onda y mes de ocurrencia en la Estación Observatorio.

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes | Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes | Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------|-------------------|------------------|-------|------|-------------------|------------------|---------|------|-------------------|------------------|------------|
| 1982 | 1 | 7 | Abril | 1999 | 1 | 5 | Abril | 2011 | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril | | 1 | 5 | Abril | | 1 | 3 | Mayo |
| 1983 | 1 | 3 | Marzo | | 1 | 16 | Mayo | | 1 | 9 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo | 2000 | 1 | 9 | Marzo | 1 | 3 | Mayo | |
| | 1 | 10 | Mayo | | 1 | 3 | Abril | 2014 | 1 | 6 | Abril |
| | 1 | 5 | Mayo | | 1 | 3 | Abril | 2015 | 1 | 5 | Abril |
| 1984 | 1 | 4 | Abril | 1 | 4 | Mayo | 2016 | 1 | 3 | Abril | |
| | 1 | 5 | Abril | 2002 | 1 | 3 | | Mayo | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 7 | Mayo | 1 | 3 | Abril | | 1 | 8 | Abril-Mayo | |
| 1985 | 1 | 3 | Abril | 1 | 4 | Abril | 1 | 6 | Mayo | | |
| 1986 | 1 | 3 | Abril | 2003 | 1 | 12 | Mayo | 1 | 3 | Junio | |
| 1987 | 1 | 3 | Marzo | | 1 | 5 | Mayo | 2017 | 1 | 6 | Abril-Mayo |
| 1988 | 1 | 4 | Abril | | 1 | 3 | Junio | | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo | 2004 | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 9 | Mayo |
| 1989 | 1 | 7 | Mayo | 2005 | 1 | 7 | Junio | 2019 | 1 | 3 | Febrero |
| | 1 | 6 | Junio | 1 | 4 | Abril | 1 | | 3 | Mayo | |
| 1990 | 1 | 4 | Mayo | 2006 | 1 | 6 | Mayo | | 1 | 7 | Mayo |
| 1991 | 1 | 8 | Abril | | 1 | 3 | Octubre | | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo | 2007 | 1 | 5 | Mayo | | 1 | 4 | Junio |
| 1992 | 1 | 4 | Junio | | 1 | 3 | Junio | | 1 | 4 | Junio |
| 1994 | 1 | 4 | Abril | 2008 | 1 | 4 | Abril | 2020 | 1 | 3 | Abril |

| | | | | | | | | | | | |
|------|---|----|-------|------|---|----|--------|------|---|----|-------|
| | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 4 | Abril | | 1 | 3 | Abril |
| 1995 | 1 | 6 | Marzo | | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 7 | Abril |
| | 1 | 9 | Abril | | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 13 | Mayo | | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 3 | Julio |
| | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 3 | Agosto | | 1 | 10 | Abril |
| 1996 | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 4 | Abril | 2021 | 1 | 4 | Abril |
| 1997 | 1 | 3 | Junio | 2009 | 1 | 4 | Mayo | | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 5 | Abril | | | 1 | 3 | Mayo | | 1 | 5 |
| 1998 | 1 | 14 | Mayo | 2010 | 1 | 11 | Junio | 2022 | 1 | 9 | Mayo |
| | 1 | 8 | Mayo | | 1 | 4 | Marzo | | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 4 | Junio | 2011 | 1 | 3 | Abril | | | | |
| | 1 | 12 | Junio | | 1 | 3 | Abril | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Al incrementar la ocurrencia y duración de este tipo de evento se confirma lo observado en el análisis de los índices de cambio climático para la estación de Observatorio, principalmente el índice de duración de los periodos cálidos que está incrementando y la duración de los periodos fríos que está disminuyendo (IPCC, 2021).

La Tabla 17 y la Figura 34 se marcan los años El Niño, La Niña y Neutro, lo anterior para observar si es que existe alguna vinculación entre la variabilidad climática y la ocurrencia de las ondas de calor. Existen años con alto número de frecuencia de ondas de calor que son tanto El Niño, La Niña y Neutro, por lo tanto, no se puede observar una interacción clara. Con este análisis queda cubierto el objetivo particular dos que se plantea en la tesis “Analizar la influencia del fenómeno del Niño Oscilación del Sur (variabilidad climática), en la recurrencia de las ondas de calor en la ciudad de Xalapa –Enríquez”.

Capítulo 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se compilan los diferentes componentes desarrollados en el apartado de la metodología, como es el procesamiento del desarrollo urbano y datos climáticos, con ello se busca contestar la pregunta inicial ¿Cómo ha impactado el desarrollo urbano el comportamiento de las variables de temperatura máxima y mínima en la ciudad de Xalapa – Enríquez, en el estado de Veracruz, en las últimas décadas?

Es elemental partir de identificar en qué década las estaciones meteorológicas fueron incluidas dentro de la mancha urbana de la ciudad de Xalapa – Enríquez para poder vincular con la parte climática (Figura 35).

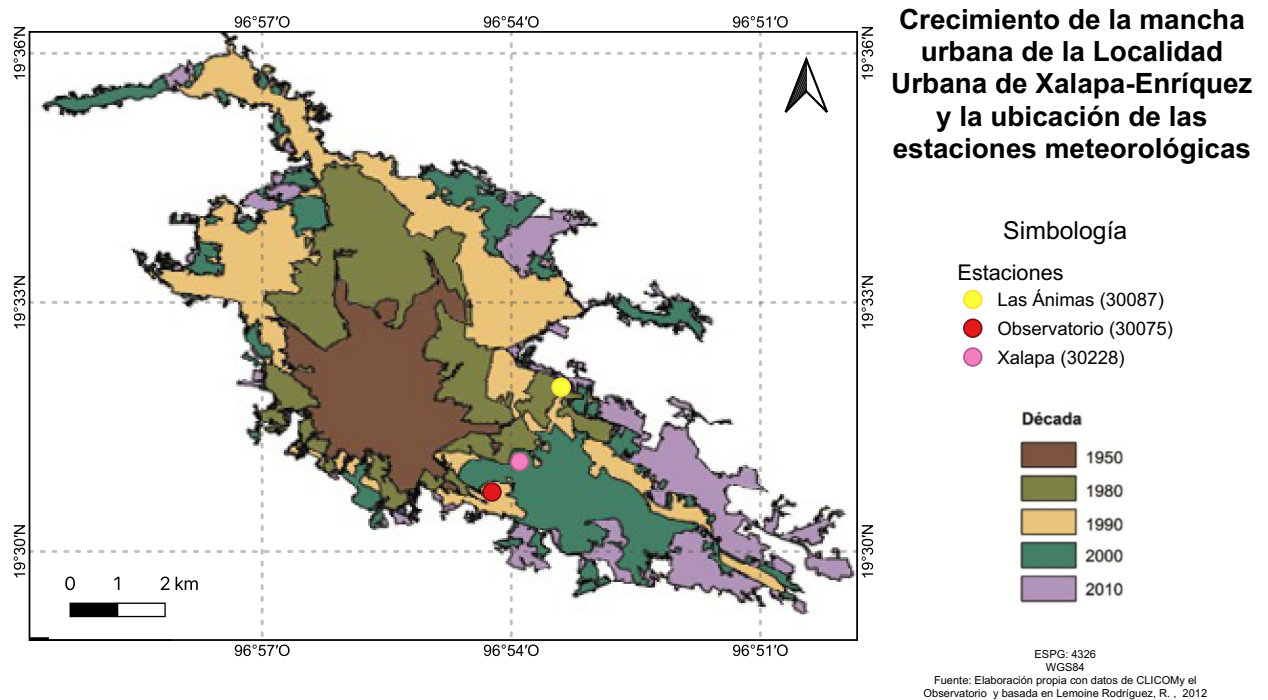


Figura 35. Superposición de polígonos correspondientes a la mancha urbana de la localidad de Xalapa y la ubicación de las estaciones meteorológicas.

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM y el Observatorio y basada en Lemoine Rodríguez, 2012.

De las estaciones meteorológicas utilizadas se observa que la primera en incorporarse a la mancha urbana fue la estación de Las Ánimas en 1980. De acuerdo con su periodo de análisis (1954-1993) sí se presenta la transición de pre-urbano a urbano en la estación.

En 1990 las estaciones de Xalapa y Observatorio fueron incorporadas a la mancha urbana, en el caso de la primera, el periodo de estudio es de 1953-1981 por lo anterior los datos de esta estación muestran solamente datos pre-urbanos. La segunda estación cuenta con un periodo de 1982-2022, por ello sí presenta datos pre-urbanos y urbanos.

La población de la ciudad de Xalapa desde los años 50 se ha incrementado; es la segunda localidad urbana más poblada del estado de Veracruz. En cuanto a la mancha urbana se observa que hasta los años 80 el crecimiento de la ciudad era circundante a la zona del centro histórico y en las siguientes décadas se incrementó la superficie de la ciudad por asentamientos aislados.

En la localidad urbana de Xalapa – Enríquez se presentan tres diferentes tipos de suelo que son agrícola y de cultivo, forestal y urbano. El incremento del suelo urbano ha causado deforestación en la vegetación primaria de la ciudad como es el suelo forestal o la transición de áreas forestales a agrícolas, en general la ciudad de Xalapa ha presentado más proceso de deforestación que incrementan el grado de exposición de la población a peligros de inundación y deslave los cuales son los principales peligros hidrometeorológicos en la ciudad (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2015).

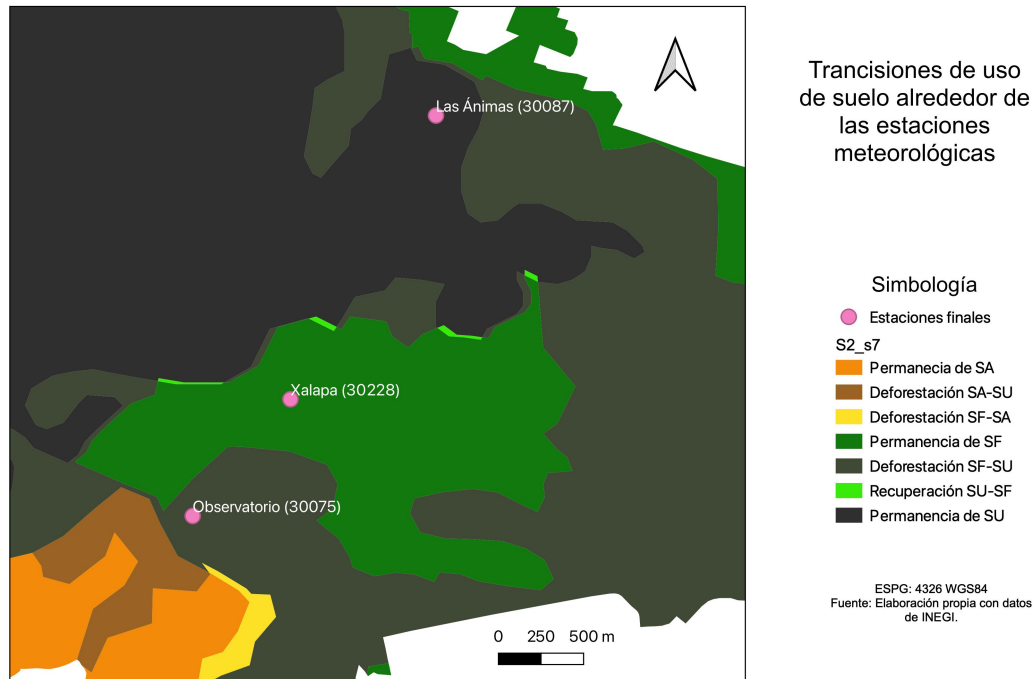


Figura 36. Cambio de uso de suelo en la estación y sus alrededores.

También es importante observar que dentro de la misma localidad urbana se observa la presencia de microclimas vinculados con las características como la altitud y uso de suelo de los alrededores en los que se encuentra la estación. Se observa que la estación de Las Ánimas es más cálida que la del Observatorio, lo anterior puede deberse a que la estación de Las Ánimas se encuentra en una zona con menor altitud y de forma adicional fue la primera estación en incorporarse a la mancha urbana y que las áreas circundantes han cambiado de suelo forestal a urbano, por lo tanto, la radiación solar se consume en calentar las edificaciones al existir menos superficies húmedas (Figura 36).

En el caso del Observatorio presenta una mayor altitud y se encuentra en suelo urbano, pero a su alrededor se tiene suelo forestal y agrícola, por lo tanto, un porcentaje de la radiación se distribuye en calentar las edificaciones mientras que

el otro porcentaje de la radiación solar se consume primordialmente en evaporar agua presente en los suelos forestales y agrícola.

A continuación, se muestran algunas de las características principales de las tres estaciones climatológicas analizadas (Tabla 18). La fecha en la que se da el cambio de uso de suelo a urbano, en función de estos dos datos se define cuál es la metodología que se usa para el análisis del cambio en el comportamiento de la temperatura máxima y mínima.

Tabla 18. Características de las estaciones climatológicas seleccionadas.

| Estación | Periodo | Altitud | Cambio a urbano | Metodología |
|-----------------------------|----------------|----------------|------------------------|--|
| Xalapa (30228) | 1953-1981 | 1365 | 1990 | Cambio en los índices y ondas de calor |
| Las Ánimas (30087) | 1954-1993 | 1281 | 1980 | Diferencia de Urbano – Pre-urbano |
| Observatorio (30075) | 1982-2022 | 1360 | 1990 | Diferencia de Urbano – Pre-urbano |

Para estas tres estaciones se evaluaron 12 índices, de los cuales a continuación se presenta el cambio de cada índice de acuerdo con la interpretación de cada índice ya sea asociado al valor de su pendiente o al comportamiento de la temperatura mínima o máxima, según a la que se asocie el índice (Tabla 19). El sombreado color rojo indica que la variable a la que está asociada está presentando calentamiento, mientras que el color azul se vincula con un enfriamiento de la variable.

Tabla 19. Índices evaluados para las tres estaciones.

| Estación | SU25. Días de verano (Tmax>25) | TR20.Noche s tropicales (Tmin>20) | TXx. Temperatura máxima extrema (La máxima Tmax diaria cada mes) | TXn. Temperatura máxima más baja (Tmax diaria más baja mensual) | TNx. Temperatura mínima más alta (Tmin máxima mensual) | TNn. Temperatura mínima extrema (Tmin más baja mensual) | Tx10p.Frecuencia de días frescos (Tmax<10p) | Tx90p.Frecuencia de días calurosos (Tmax>90p) | Tn10p.Frecuencia de noches frías (Tmin<10p) | Tn90p.Frecuencia de noches cálidas (Tmin>90p) | WSDI. Duración de los períodos cálidos (por lo menos 6 días consecutivos: Txij > Txen90) | CSDI. Duración de los períodos fríos (por lo menos 6 días consecutivos: Tnij < Tnen10) |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|---|---|---|---|---|--|--|
| Las Ánimas (30087) | 1.788 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | 0.064 | -0.103 | 0.187 | -0.262 | ↑ | constante | ↑ |
| Xalapa (30228) | 1.872 | ↑ | ↑ | constante | ↑ | 0.126 | ↑ | 0.719 | -0.471 | 0.723 | 0.509 | constante |
| Observatorio (30075) | 2.397 | ↑ | ↑ | 0.063 | ↑ | ↑ | -0.275 | 0.31 | ↑ | ↑ | 0.134 | ↑ |

Se puede observar que, de acuerdo con la Tabla 19 tanto la temperatura máxima como la mínima están incrementando en las diferentes estaciones durante el periodo de análisis. De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 18, se puede observar que en la estación de Xalapa no aplica la metodología diferencia de urbano – pre-urbano, ya que todos los datos son durante el periodo que la estación se encontraba en fase pre-urbano, por lo que se utiliza la comparación de los índices de cambio climático y la recurrencia de ondas de calor. Por lo anterior se observa que la temperatura mínima y la máxima presenta un incremento, el cual se esperaría que fuera mayor asociado al proceso de urbanización.

Para las estaciones de Las Ánimas y el Observatorio se aplica la metodología de diferencia de pre-urbano - urbano por medio del análisis de la gráfica de los índices de detección de cambio climático. Para ello se seleccionaron algunos índices y a continuación, se muestra su comportamiento.

Índice de días de verano ($T_{max}>25$), se puede observar que desde el periodo pre-urbano se presenta este índice, pero su frecuencia menor comparado con el periodo de uso de suelo urbano donde se presenta un incremento de días desde que se presenta el cambio de uso de suelo.

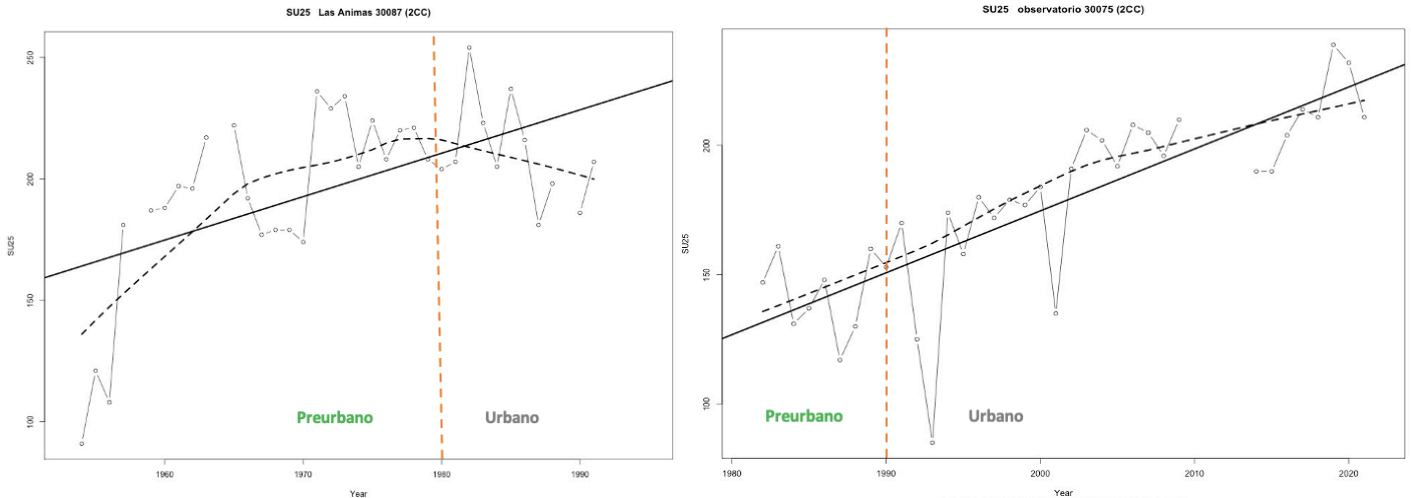


Figura 37. Comparación del comportamiento del índice de días de Verano ($T_{max}>25^{\circ}\text{C}$) en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio.

En la estación de Las Ánimas justo en la década del cambio presenta una ligera tendencia a disminuir, pero la frecuencia de días de verano es mucho mayor que al inicio del periodo analizado. En el caso de Observatorio presenta un incremento durante todo el periodo (Figura 37).

Índice de temperatura máxima extrema (la máxima T_{max} diaria cada mes), en el caso de la estación Observatorio después del cambio de uso de suelo urbano se incrementó 1°C en esta temperatura máxima. Mientras que en la estación de Las Ánimas se observa que un poco antes de la urbanización se presenta un cambio en la pendiente, pero es importante resaltar que a pesar de la disminución el valor de las temperaturas máximas de cada mes es mayor al que se tenía al principio del periodo analizado (Figura 38).

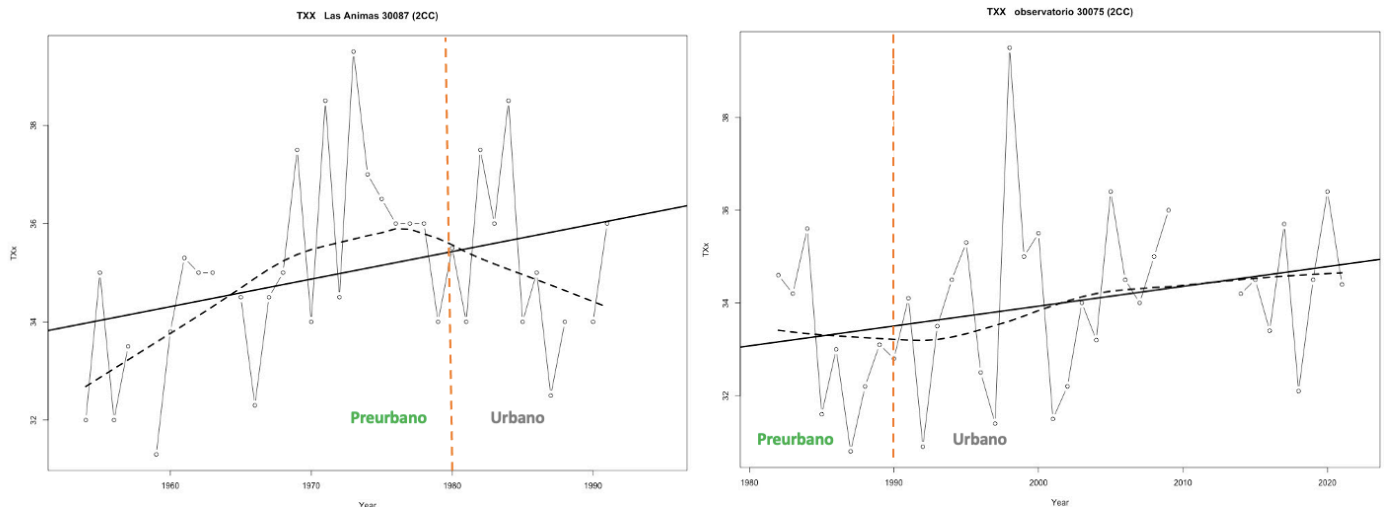


Figura 38. Comparación del comportamiento del índice de temperatura máxima extrema en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio.

Índice de frecuencia de días calurosos ($T_{max} > 90$ percentil), en la estación de Las Ánimas se observa que un poco antes del cambio de uso de suelo se presenta un cambio de pendiente, pero es importante resaltar que a pesar de la disminución en el número de días, estos son mayores a los del inicio del periodo analizado. Para Observatorio se observa que el número de días incrementa 5 días cada diez años después de la urbanización (Figura 39).

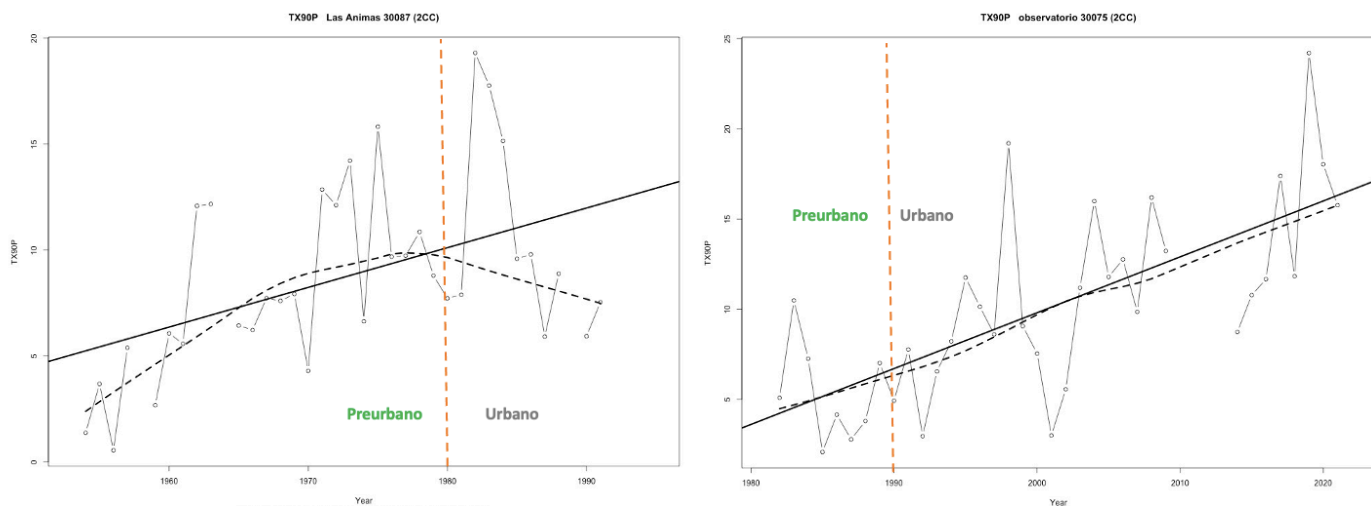


Figura 39. Comparación del comportamiento del índice de frecuencia de días calurosos en el periodo pre-urbano y urbano para las estaciones de Las Ánimas y El Observatorio.

Tabla 20. Frecuencia de ondas de calor por año y días acumulados por estación

| Xalapa 30228 | | | Las Ánimas 30087 | | | Observatorio 3007 | | |
|--------------|------------------------------|--|------------------|------------------------------|--|-------------------|------------------------------|--|
| Año | Frecuencia de ondas de calor | Días acumulados con onda de calor al año | Año | Frecuencia de ondas de calor | Días acumulados con onda de calor al año | Año | Frecuencia de ondas de calor | Días acumulados con onda de calor al año |
| 1954 | 1 | 3 | 1954 | 1 | 3 | | | |
| 1955 | 2 | 18 | 1955 | 2 | 9 | | | |
| 1956 | 0 | 0 | 1956 | 0 | 0 | | | |
| 1957 | 3 | 14 | 1957 | 3 | 14 | | | |
| 1958 | 4 | 12 | 1958 | 1 | 3 | | | |
| 1959 | 0 | 0 | 1959 | 2 | 6 | | | |
| 1960 | 3 | 9 | 1960 | 3 | 10 | | | |
| 1961 | 4 | 13 | 1961 | 2 | 7 | | | |
| 1962 | 1 | 6 | 1962 | 8 | 37 | | | |
| 1963 | 4 | 15 | 1963 | 5 | 22 | | | |
| 1964 | 1 | 15 | 1964 | 5 | 28 | | | |
| 1965 | 2 | 6 | 1965 | 5 | 21 | | | |
| 1966 | 0 | 0 | 1966 | 0 | 0 | | | |
| 1967 | 4 | 15 | 1967 | 3 | 13 | | | |
| 1968 | 2 | 8 | 1968 | 4 | 15 | | | |
| 1969 | 2 | 10 | 1969 | 2 | 12 | | | |
| 1970 | 2 | 7 | 1970 | 4 | 16 | | | |
| 1971 | 3 | 13 | 1971 | 5 | 21 | | | |
| 1972 | 1 | 3 | 1972 | 3 | 15 | | | |
| 1973 | 6 | 30 | 1973 | 5 | 32 | | | |
| 1974 | 1 | 6 | 1974 | 2 | 14 | | | |
| 1975 | 2 | 11 | 1975 | 7 | 41 | | | |
| 1976 | 5 | 19 | 1976 | 3 | 12 | | | |
| 1977 | 6 | 34 | 1977 | 2 | 8 | | | |
| 1978 | 3 | 16 | 1978 | 3 | 15 | | | |
| 1979 | 8 | 27 | 1979 | 4 | 14 | | | |
| 1980 | 3 | 15 | 1980 | 2 | 20 | | | |
| 1981 | 1 | 7 | 1981 | 0 | 0 | | | |
| | | | 1982 | 1 | 3 | 1982 | 2 | 11 |
| | | | 1983 | 5 | 28 | 1983 | 4 | 22 |
| | | | 1984 | 6 | 26 | 1984 | 3 | 16 |
| | | | 1985 | 3 | 10 | 1985 | 1 | 3 |
| | | | 1986 | 5 | 17 | 1986 | 1 | 3 |
| | | | 1987 | 3 | 11 | 1987 | 1 | 3 |
| | | | 1988 | 2 | 8 | 1988 | 2 | 7 |
| | | | 1989 | 5 | 24 | 1989 | 2 | 13 |
| | | | 1990 | 4 | 15 | 1990 | 1 | 4 |
| | | | 1991 | 4 | 24 | 1991 | 2 | 12 |
| | | | 1992 | 2 | 10 | 1992 | 1 | 4 |
| | | | 1993 | 1 | 6 | 1993 | 0 | 0 |
| | | | | | | 1994 | 2 | 8 |
| | | | | | | 1995 | 3 | 28 |
| | | | | | | 1996 | 1 | 4 |
| | | | | | | 1997 | 1 | 3 |
| | | | | | | 1998 | 6 | 46 |
| | | | | | | 1999 | 3 | 26 |
| | | | | | | 2000 | 4 | 19 |
| | | | | | | 2001 | 0 | 0 |
| | | | | | | 2002 | 1 | 3 |
| | | | | | | 2003 | 5 | 27 |
| | | | | | | 2004 | 1 | 4 |
| | | | | | | 2005 | 1 | 7 |
| | | | | | | 2006 | 3 | 13 |
| | | | | | | 2007 | 2 | 8 |
| | | | | | | 2008 | 6 | 23 |
| | | | | | | 2009 | 3 | 11 |
| | | | | | | 2010 | 1 | 11 |
| | | | | | | 2011 | 7 | 29 |
| | | | | | | 2012 | 0 | 0 |
| | | | | | | 2013 | 0 | 0 |
| | | | | | | 2014 | 1 | 6 |
| | | | | | | 2015 | 1 | 5 |
| | | | | | | 2016 | 5 | 23 |
| | | | | | | 2017 | 3 | 18 |
| | | | | | | 2018 | 0 | 0 |
| | | | | | | 2019 | 6 | 24 |
| | | | | | | 2020 | 5 | 20 |
| | | | | | | 2021 | 3 | 17 |
| | | | | | | 2022 | 3 | 21 |

Las ondas de calor son eventos extremos que exceden el percentil 95 de la temperatura mínima y máxima de Xalapa. En la Tabla 20, la primera columna muestra los años del periodo analizado por estación los cuales, si están en color azul, es año La Niña; color rojo, El Niño y negro Neutro; la segunda columna hacer referencia a las ondas de calor ocurridas en ese año; la tercera columna son los días acumulados en el año con condiciones de onda de calor.

Se observa que la ocurrencia de una onda de calor depende de las características específicas de la estación, como su altura y entorno, ya que al comparar los mismos años en dos estaciones diferentes no se presentan el mismo número de ondas o duración. Se observa que la estación Las Ánimas es la más cálida, lo cual se asocia a que es la estación con menor altitud. Tampoco se presenta una vinculación clara con los años de El Niño. Para la estación de Observatorio se observa que después del cambio de uso de suelo (casilla marcada en gris) la frecuencia y los días acumulados con ondas de calor se incrementan.

De esta forma podemos observar que después del proceso de desarrollo urbano hay un incremento en los valores de la temperatura máxima y mínima. De forma general, considerando el cambio del clima en las estaciones para un periodo de tiempo mínimo de 30 años, el comportamiento de la temperatura máxima y mínima es tender a ser más cálida por lo cual se presenta un cambio en el valor medio de la temperatura.

Capítulo 6.- PROPUESTAS DE MEDIDAS

De acuerdo con los cambios observados en el Capítulo 5 es necesario implementar los instrumentos de planeación con los que cuentan la localidad de Xalapa – Enríquez, ya que incluyen consideraciones ambientales y climáticas en ellos, pero estos instrumentos no siempre son aplicados en el territorio. Además, siguiendo las recomendaciones del Sexto Reporte del IPCC, Grupo II (Dodman, *et al.*, 2022) se deben reforzar programas de reforestación (Jones *et al.*, 2022) y designación de áreas para el establecimiento de parques de bolsillo (Conde *et al.*, 2022; Rosso *et al.*, 2022) con especies nativas de la ciudad, así como reforzar los lineamientos legales que impidan la expansión de la mancha urbana por adición de asentamientos informales de baja densidad, entre otros (Bona *et al.*, 2023).

Considerando todos estos factores que se relacionan con el cambio en el comportamiento de la temperatura máxima y mínima de la localidad y la frecuencia de ondas de calor, se realiza una propuesta de medidas que buscan incrementar la resiliencia y capacidad adaptativa de la localidad urbana considerando estas condiciones climáticas actuales y las que se esperaran bajo condiciones de cambio climático. Por lo

anterior se realizó una revisión de los siguientes instrumentos de planeación con los que cuenta la federación, el estado, municipio y la localidad urbana que atienden directamente la problemática identificada o vinculados al tema de medio ambiente, cambio climático, urbanización, agricultura, recursos forestales, clima y desarrollo urbano:

- Primera Comunicación sobre la Adaptación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC, 2022).
- Sistema de Información de la Agenda de Transparencia de acciones climáticas a nivel subnacional (SEMARNAT-GIZ, 2022).
- Estrategia para la conservación y uso sustentable de la biodiversidad del Estado de Veracruz (CONABIO, 2013).
- Programa Veracruzano ante el Cambio Climático (UV, 2009).
- Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024 (Gobierno del Estado de Veracruz, 2019).
- Veracruz ante el CC: acciones mínimas 2019-2024. 65 propuestas (UV, 2019).
- Plan Municipal de Desarrollo – Xalapa 2022 – 2025 (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2022).
- Programa de Acción Climática Municipal Xalapa, Veracruz (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2013).

Tabla 21. *Propuestas de medidas para incrementar la resiliencia y la capacidad adaptativa ante el incremento de la temperatura mínima y máxima de la ciudad de Xalapa - Enríquez*

| Propuesta | Temas |
|---|--------------|
| Fortalecer la seguridad alimentaria a través de impulsar la producción y competitividad sustentable de las producciones agrícola, ganadera y silvícola, privilegiando el establecimiento de técnicas agroecológicas, ecotecnias en la localidad urbana. | Agrícola |
| Reactivar lo programas para la reconversión productiva de terrenos degradados y abandonados por la ganadería o la agricultura hacia sistemas agroforestales. | Agrícola |
| Promover apoyos a los productores para obtener la certificación de productores sustentables por medio de mercados regionales de productos sustentables y fortalecer los existentes. | Agrícola |
| Elaborar e implementar un programa de educación y comunicación hacia la población urbana, periurbana, organizaciones comunitarias y de la sociedad civil sobre el impacto del incremento de temperatura, islas de calor y golpe de calor. | Capacitación |
| Generar en coordinación con las universidades municipales/estatales en el municipio, escenarios de cambio climático para calcular el índice de vulnerabilidad futura en la localidad. | Capacitación |
| Establecer y conservar corredores biológicos (reforestación o restauración) que conecten fragmentos dentro y entre los diferentes tipos de vegetación aplicando un enfoque de cambio climático. | Forestal |
| Proteger y conservar la diversidad biológica y disminuya la fragmentación, buscando potenciar el desarrollo forestal sustentable bajo un ordenamiento ecológico e incorporar un enfoque de cambio climático. | Forestal |
| Completar y actualizar los programas de desarrollo urbano, regionales y locales, ordenamientos ecológicos, atlas municipal de riesgo, planes y protocolos de protección civil, aplicando un enfoque de cambio climático y preventivas de gestión de riesgo. | Planeación |

| | |
|---|-------------------|
| Impulsar la elaboración de los reglamentos municipales de ecología, que incorporen criterios de conservación, uso sustentable de la biodiversidad, cambio de uso de suelo y cambio climático y den continuidad a las políticas ambientales. | Planeación |
| Incluir en los Programas de Desarrollo Municipal la planificación del crecimiento de las zonas urbanas y de vivienda con criterios de adaptación al cambio climático. | Planeación |
| Diseñar e implementar programas y campañas para la prevención y actuación ante impactos por riesgos sanitarios (dengue, golpes de calor, entre otras) asociados con el cambio climático y riesgos hidrometeorológicos | Población / Salud |
| Diseñar e implementar protocolo de alerta multi-riesgos para eventos hidrometeorológicos y climáticos extremos y promover la instalación de estaciones meteorológicas que alimenten el protocolo. | Población / Salud |
| Diseñar, implementar y establecer acciones de monitoreo y alerta temprana de plagas y enfermedades en zonas de cultivo y su impacto en la producción agrícola y forestal | Sector primario |
| Mejorar el confort térmico en viviendas e infraestructura ante condiciones de incremento/reducción de temperatura, mediante la incorporación de criterios de cambio climático en su diseño y adecuación | Zona urbana |
| Promover el revestimiento con techos blancos, pavimento fresco y áreas verdes permeables en los edificios y espacios para mejorar las condiciones de confort de los habitantes en ciudades. | Zona urbana |
| Promover la creación y mejora de infraestructura y áreas verde en la localidad urbana en alineación con la norma mexicana sobre edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos (NMX-AA-164-SCF1-2013), a fin de reducir los efectos de la isla de calor urbana. | Zona urbana |

Las ondas de calor, al ser un evento extremo que bajo condiciones de mayor urbanización y cambio climático, se espera que sean más frecuentes y severas, originando implicaciones en la salud de la población, se realiza una propuesta de Sistema de Alerta Temprana (Dessai *et al.*, 2021, New *et al.*, 2022) que anticipe a la población acerca de situaciones meteorológicas extremas y sus posibles efectos en la salud y mortalidad (Ellena *et al.*, 2023; Kjellstrom *et al.*, 2009; Kjellstrom & McMichael, 2013; Cabrera *et al.*, 2021; IPCC, 2022 y IPCC, 2022a).

Tabla 22. Identificación de población vulnerable ante la ocurrencia de una onda de calor.

| Población vulnerable |
|--|
| Personas mayores, discapacitadas y los niños menores de 5 años. Personas con enfermedades crónicas (hipertensión, diabetes, cardiopatía, obesidad, alcoholismo). Personas que realizan trabajos físicos intensos o deporte al aire libre cuando hay temperaturas elevadas. |

El objetivo es que tanto la población como la Secretaría de Protección Civil de Xalapa puedan tomar las medidas de prevención, mitigación y de respuesta adecuadas a cada nivel de alerta. Los niveles de alerta se basan en la definición de un umbral de temperatura máxima y mínima, así como la duración que se pronostica de dicho umbral la Tabla 23 presenta las características de cada nivel de alertamiento.

Tabla 23. Nivel de alertamiento de acuerdo con el percentil de la temperatura máxima y mínima

| Percentil | Umbral de Tmax | Umbral de Tmin | Periodo de tiempo | Tipo de evento climático | Efecto en la salud |
|-----------|----------------|----------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 95 | 30 | 16 | 1 día | Inicio de la onda de calor | Sin efecto sobre la salud |
| 95 | 30 | 16 | Más de 3 días consecutivos | Onda de calor | Efecto leve-moderado |
| 97 | 31 | 17 | | | Efecto moderado-alto |
| 99 | 33 | 18 | | | Efecto alto-extremo |

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED, 2020 y Servicio Meteorológico Nacional Argentina, 2023.

Se identifica las siguientes recomendaciones que pueden servir para la formulación del protocolo ante el pronóstico del inicio de la onda de calor:

- Lanzar alerta de la inminente llegada de una onda de calor a la población a través de los medios de comunicación y redes sociales.
- Generar una campaña de concientización sobre los golpes y ondas de calor, así como sus implicaciones en la salud.

Cuando se pronostica la ocurrencia de una onda de calor, conlleva la posibilidad de un golpe de calor, se identifican las siguientes recomendaciones adicionales (CENAPRED, 2020 y Servicio Meteorológico Nacional Argentina, 2023):

- Evite salir de casa entre las 12 del mediodía y las 6 de la tarde.
- Manténgase hidratado, bebiendo más agua sin esperar tener sed.
- No abuse de las bebidas con cafeína, ni de los refrescos azucarados y evite la ingesta de alcohol.
- Evite comidas abundantes, elija platos ligeros que contribuyan a su hidratación.
- Reducir la actividad física y evitar realizar deportes al aire libre en las horas centrales del día.
- Procura permanecer en lugares frescos, ventilados, a la sombra o climatizados.
- Use ropa ligera y holgada, de colores claros, sombrero y gafas de sol.
- Utilice cremas protectoras solares en cara y cuerpo con factor de protección SFP 50.
- Durante el día baje las persianas y cierre las ventanas; ábralas por la noche para ventilar.

Con este capítulo quedan cubiertos los objetivos particulares tres y cuatro que se plantea en la tesis “Proponer medidas que incrementen la capacidad adaptativa y la resiliencia de la ciudad ante un clima más cálido” y “Sentar las bases para el desarrollo de un sistema de alerta temprana ante la ocurrencia de ondas de calor en la ciudad”.

Capítulo 7.- CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

La conclusión principal de esta tesis es que se comprueba la hipótesis planteada “el desarrollo urbano modifica el comportamiento de las variables climatológicas principalmente de la temperatura máxima y mínima” haciendo que tiendan a ser más cálidas al presentarse mayor urbanización.

Uno de los principales desafíos que se enfrentó para el desarrollo de esta tesis fue la disponibilidad de datos ya que inicialmente se identificaron cinco estaciones que se encontraban en el área de estudio, pero no cumplían con las condiciones mínimas de contar con un periodo de 30 años y tener menos del 20% de datos faltantes, por lo anterior se descartaron dos estaciones y solamente quedaron tres estaciones a las cuales se les aplicaron control de calidad y proceso de homogeneidad.

Buscando contar con una base de datos más larga y con registros recientes para las diferentes estaciones, se intentó utilizar datos de reanálisis, pero al compararlos con los datos observados los valores de las variables eran diferentes y tendían a suavizar los valores extremos los cuales son fundamentales para responder la pregunta de investigación de esta tesis. Adicionalmente se observó que los datos que arrojaba el reanálisis para dos estaciones (Xalapa y Observatorio) era el mismo valor, por lo tanto el reanálisis no caracteriza el microclima de cada estación. Es necesario seguir impulsando el monitoreo del tiempo meteorológico para contar con bases de datos con buena calidad y periodos más largos, lo cual permitirá seguir desarrollando este tipo de estudios de clima urbano, ya que en las ciudades se espera que los efectos del cambio climático sean más exacerbados.

La metodología planteada para esta tesis es la llamada diferencia entre pre-urbano – urbano (Oke *et al.*, 2017) la cual indica la comparación de datos antes y después del proceso de urbanización de una misma estación, pero no aclara si se comparan promedios mensuales o anuales de las variables para el periodo de análisis, pero un punto a resaltar es que si se utilizan promedios se quitaría la incorporación de las temperaturas extremas tanto de la temperatura mínima como máxima.

Por lo anterior la metodología propuesta es original al considerar métodos climáticos (evaluación de índices de cambio climático y frecuencia de ondas de calor) como base para implementar la metodología de diferencia pre-urbano – urbano. Es decir, a partir de conocer el proceso de cambio de uso de suelo y crecimiento de la mancha urbana vincular con cambios en el comportamiento de la temperatura máxima y mínima por medio de la evaluación de los índices de cambio climático y frecuencia de ondas de calor.

Los índices del ETCCDI en las tres estaciones muestran que la temperatura máxima y la mínima están siendo más cálidas. Lo anterior coincide con lo observado en los trabajos previos como "Índices de cambio climático y análisis de la variabilidad en el estado de Veracruz, México" (Torres *et al.*, 2010); "Ondas de calor en seis zonas urbanas del estado de Veracruz" (Díaz Lazaro, 2011), y "Cambios en la cobertura vegetal de la ciudad de Xalapa - Enríquez, Veracruz y zonas circundantes entre 1950 y 2010 (Lemoine Rodríguez, 2012)".

En cuanto al tema de ondas de calor se realiza una adecuación a la definición que existía para una onda de calor para la ciudad de Xalapa planteada por Díaz Lazaro, (2011) y se retoma lo planteado por el CENAPRED. Teniendo como definición "una onda de calor se declara cuando en un intervalo de tiempo de por lo menos tres días la temperatura máxima y la mínima coincide o sobrepasa 30°C y 16°C respectivamente".

Considerando estas condiciones se observa que la frecuencia y duración de las ondas de calor atienden al microclima de la estación y no presenta interconexión con el fenómeno de El Niño (como fuente de variabilidad climática), aún en los años que se presenta un evento muy fuerte (1982-1983; 1997-1998 y 2015-26). Se observa que al presentarse el proceso de cambio de uso de suelo la frecuencia y duración de las ondas de calor es mayor. Con base en lo anterior se puede concluir que tanto la temperatura máxima como mínima se están incrementando.

Se concluye que el proceso de desarrollo urbano sí modifica el comportamiento tanto de la temperatura mínima y de la máxima, las cuales tienden a incrementarse. Lo anterior se asocia a un cambio del valor medio de la temperatura, siendo más cálida y se espera que bajo condiciones de cambio climático el incremento sea mayor en menos tiempo.

Las propuestas de medidas y de las bases para el desarrollo de un sistema de alerta temprana plasmadas en esta tesis pretenden servir de base para iniciar un trabajo multidisciplinario con diferentes actores clave de política pública para iniciar la implementación de acciones que ayuden a incrementar la resiliencia de la población, ecosistemas e infraestructura ante los cambios de la temperatura máxima y mínima que sea han identificado.

La contribución de esta tesis es contar con un análisis completo a partir de metodologías robustas desarrolladas por instituciones líderes en el tema (IPCC y CENAPRED) que se complementan para construir el diagnóstico del comportamiento de la temperatura mínima y máxima en la ciudad de Xalapa - Enríquez y aterriza en propuestas de medidas, las cuales parten del análisis de área de oportunidad de los instrumentos de planeación

y de política climática con los que cuenta el área de estudio para atender la problemática climática identificada.

Adicionalmente se sientan las bases para desarrollar trabajos futuros que lleven a la implementación de medidas en la localidad urbana que involucren a diferentes actores claves y se diseñe y establezca un sistema para monitorear y evaluar la efectividad de estas medidas.

REFERENCIAS

- Aguas, T., Estrada, E., y Tejeda. (1992). Climatología comparada de Teocelo, Cosautlán y Coatepec, Veracruz. *La ciencia y el hombre*. 13, 21-47. Recuperado de: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/5164/19921213P21.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Aguilar, A. G. y Escamilla, I. (Coords). (2009). *Periferia Urbana. Deterioro ambiental y reestructuración metropolitana*. Instituto de Geografía - UNAM, México: MAPorrúa, pp. 399
- Alexander L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. Vazquez-Aguirre (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D05109). <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Angulo Fernández F. y González Álvarez L. (2008). El fenómeno de El Niño en México, un estudio de caso: la cuenca del Papaloapan, Veracruz. 567-590pp. Recuperado de: <https://books.openedition.org/cemca/1292?lang=es>
- Bona, S.; Silva-Afonso, A.; Gomes, R.; Matos, R.; Rodrigues, F. (2023). Nature-Based Solutions in Urban Areas: A European Analysis. *Appl. Sci.* , 13, 168. <https://doi.org/10.3390/app13010168>
- Birkmann, J., E. Liwenga, R. Pandey, E. Boyd, R. Djalante, F. Gemenne, W. Leal Filho, P.F. Pinho, L. Stringer, and D. Wrathall, (2022): Poverty, Livelihoods and Sustainable Development. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1171–1274, doi:10.1017/9781009325844.010.
- Cabrera A.N., Droste A., Heusinkveld B.G. and Steeneveld G.J. (2021). The Potential of a Smartphone as an Urban Weather Station—An Exploratory Analysis. *Front. Environ. Sci.* 9:673937. doi: 10.3389/fenvs.2021.673937
- Cavazos T. & Rivas D. (2004). Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. *CLIMATE RESEARCH. Clim Res Vol. 25: 229–243pp.*
- Cervantes Pérez, J., Barradas Miranda, V. L., Tejeda Martínez, A., y Pereyra Díaz, D. (2001). Clima urbano, bioclima humano, hidrología y evaluación de riesgos para hidrometeoros. En *Base Metodológicas para la Comprensión Integrada del Espacio Urbano* (págs. 1-57). Xalapa, Ver.: Universidad Veracruzana.
- CENAPRED. (2020). Onda de Calor en México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/onda-de-calor-en-mexico#:~:text=Una%20onda%20calor%2C%20se%20define,y%2007%3A00%20horas>
- CICESE. (2013). Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema Clicom). Recuperado de: <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CityAdapt. (2019). Estudio de Vulnerabilidad ante el Cambio Climático en Xalapa y Tlalnahuayocan, Veracruz. Recuperado de <https://cityadapt.com/wp-content/uploads/2020/04/191027-Ana%CC%81lisis-de-Vulnerabilidad-Xalapa.pdf>
- CONAGUA. (2021). Reporte del Clima en México: Reporte Anual 2021. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stic>

o%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2021.pdf

- CONAGUA. (2020). Portal de Sistemas de Información del Agua. Recuperado de <https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/>
- CONABIO. (2022). Portal de Geoinformación 2022. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONABIO. (2013). Estrategia para la Conservación y Uso Sustentable de la Biodiversidad del Estado de Veracruz. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Recuperado de <http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2018/02/ECUSBE-VER-Estrategia-de-Conserv-y-Uso-Sust-de-la-Biodiversidad.pdf>
- CONAPO. (2021). Índices de marginación 2020. Recuperado de <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- CONAPO. (2012). Sistema Urbano Nacional del Consejo Nacional de Población. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Catalogo_Sistema_Urbano_Nacional_2012
- Conde, C., L. Luyando, A. Tejeda, L. Sánchez, M. García; J.P. Báez, G. Balderas. (2022). Análisis del bioclima urbano y de las posibles acciones de adaptación ante los cambios observados y proyectados en la Ciudad de Puebla. Proyecto UNAM PAPIIT IN107123. (en desarrollo).
- Conde C. (2003). Cambio y variabilidad climáticos. Dos estudios de caso en México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Física de la Atmósfera). Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 227 pp
- CMNUCC. (2016). El Acuerdo de París de United Nations Climate Change. Recuperado de <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris#:~:text=El%20Acuerdo%20de%20Par%C3%ADs%20es,4%20de%20noviembre%20de%202016.>
- Delgado-Ramos, G. (2014). Medio Ambiente y Urbanización. Vol. 80. No. 1. Instituto Internacional de Medio Ambiente y Desarrollo - América Latina. Buenos Aires, Argentina. pp. 95 - 123.
- Dessai, S. J. Sillmann, C. Buontempo, C. Conde, A. Diongue-Niang. F. J. Doblas-Reyes, C. Jack, R. Jones, B. Lamptey, X. Lu, D. Maraun, B. Orlove, R. Ranasinghe, A. C. Ruane, A. Steynor, B. van den Hurk, R. Vautard. (2021). Cross-Chapter Box 12.2 | Climate Services and Climate Change Information. In: Ranasinghe, R., A.C. Ruane, R. Vautard, N. Arnell, E. Coppola, F.A. Cruz, S. Dessai, A.S. Islam, M. Rahimi, D. Ruiz Carrascal, J. Sillmann, M.B. Sylla, C. Tebaldi, W. Wang, and R. Zaaboul, 2021: Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pag. 1865-1869.
- DOF. (Última reforma 2017). Ley de Desarrollo Urbano, Ordenamiento Territorial y Vivienda para el Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. Recuperado de <https://www.legisver.gob.mx/leyes/LeyesPDF/LDUOTV181217.pdf>
- Díaz Peón, A. L., Méndez Pérez, J. M., y Méndez Pérez, I. R. (2015). En Teocelo y su compromiso con la sustentabilidad: Base de un modelo entre sociedad, gobierno municipal y universidad. Teocelo: Periodística y análisis de contenidos, S.A. de C.V. 414pp ISBN: 978-607-95504-3-1

- Díaz Lazaro, M. (2011). Ondas de calor en seis zonas urbanas del estado de Veracruz (Tesis de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz. 68 p.
- Doblas-Reyes, F.J., A.A. Sörensson, M. Almazroui, A. Dosio, W.J. Gutowski, R. Haarsma, R. Hamdi, B. Hewitson, W.-T. Kwon, B.L. Lamptey, D. Maraun, T.S. Stephenson, I. Takayabu, L. Terray, A. Turner, and Z. Zuo, (2021). Linking Global to Regional Climate Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1363–1512, doi:10.1017/9781009157896.012.
- Dodman, D., B. Hayward, M. Pelling, V. Castan Broto, W. Chow, E. Chu, R. Dawson, L. Khirfan, T. McPhearson, A. Prakash, Y. Zheng, and G. Ziervogel, (2022). Cities, Settlements and Key Infrastructure. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 907–1040, doi:10.1017/9781009325844.008.
- Ellena, M., Ricciardi, G., Mercogliano, P., Melis, G., Di Gangi, E., Zengarini, and N. Costa, G. (2023). Micro-scale UHI risk assessment on the heat-health nexus within cities by looking at socio-economic factors and built environment characteristics: The Turin case study (Italy). *Urban Climate*, 49. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.uclim.2023.101514>
- Evangelista, O., López, J., Nieto, J., & Alfaro, M. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*. 72 23-38 pp.
- FAO y PNUMA. (1999). *El Futuro de Nuestra Tierra: Enfrentando el Desafío*. ISBN 92-5-304366-0. Recuperado de <https://www.fao.org/3/X3810S/X3810S00.htm>
- Foro - Mexico.com. (2019). Evolucion de la poblacion desde 1900 hasta 2010. Recuperado de <https://www.foro-mexico.com/veracruz-llave/xalapa-enriquez/mensaje-541583.html>
- 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* 137:775–790. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2620-4>
- Gobierno del Estado de Veracruz. (2019). Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024. Recuperado de [http://repositorio.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/4/files/transp/pvd_2019_2024/Gac2019-224_Miercoles_05_TOMO_II_Ext_\(PLAN_VERACRUZANO_2019_2024\).pdf](http://repositorio.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/4/files/transp/pvd_2019_2024/Gac2019-224_Miercoles_05_TOMO_II_Ext_(PLAN_VERACRUZANO_2019_2024).pdf)
- Gómez Tosca, E. (2014). Aumento de la temperatura por la pérdida de cobertura vegetal en la Ciudad De Xalapa, Ver: Estudio de caso fraccionamiento lomas de santa fe (Homex) (Tesis de la Licenciatura Biología). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz. 68 p
- González Aztatzi, D. (2010). Tendencia en el cambio de uso de suelo inducido por los impactos ambientales del proyecto del libramiento de Xalapa, tramo Jilotepec-

- Banderilla, Ver. (Tesis de la Licenciatura Biología). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz. 48 p
- Grupo Banco Mundial. (2019). Banco Mundial. Datos: Población urbana (% del total). Recuperado de <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=MX>
- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose. (2021). Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.
- Guo-Yu R. (2015). Urbanization as a major driver of urban climate change. *Advances in Climate Change Research*. Volumen 6 Issue 1. 1-6 pp.
- H. Ayuntamiento de Xalapa. (2022). Plan Municipal de Desarrollo 2022-2025 de Xalapa. Recuperado de <https://xalapa.gob.mx/direccion-de-gobierno-abierto/wp-content/uploads/sites/33/2022/05/PlanMunicipalDesarrollo22-25.pdf>
- H. Ayuntamiento de Xalapa. (2015). Plan de Acción de Xalapa sostenible. Programa Ciudades Emergentes y Sostenible. Recuperado de México: https://issuu.com/ciudadesemergentesysostenibles/docs/xalapa_sostenible
- H. Ayuntamiento de Xalapa. (2013). Plan de Acción Climática Municipal Xalapa de Enríquez, Veracruz. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/0B87bmmJLaLlgZXNRZ3ZYaXotWUE/edit?resourcekey=0-epExX0SjjqeeZy73tBXfdQ>
- Hamdi Rafq, Hiroyuki Kusaka, Quang-Van Doan, Peng Cai, Huili He, Geping Luo, Wenhui Kuang, Steven Caluwaerts, François Duchêne, Bert Van Schaeybroek & Piet Termonia. (2020). The State-of-the-Art of Urban Climate Change Modeling and Observations. *Earth Systems and Environment*. 4:631–646pp.
- INECC. (2022). Primera Comunicación sobre la Adaptación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Pp. 219
- INEGI. (2020a). Cuéntame. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/poblacion/>
- INEGI. (2020b). Distribución de la población. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/poblacion/distribucion.aspx?tema=me&e=30>
- INEGI. (2020c). México en Cifras. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=30>
- IPCC. (2022). IPCC Sixth Assessment Report. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Recuperado de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- IPCC. (2022a): Annex I: Global to Regional Atlas [Pörtner, H.-O., A. Alegría, V. Möller, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, S. Götze (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth*

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2811–2896, doi:10.1017/9781009325844.028.
- IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.)] Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, 582 pp. Available from June 2012
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 18 pp
- IPCC-WGI. (2021). Regional fact sheet - Urban Areas. Recuperado de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/factsheets/IPCC_AR6_WGI_Regional_Fact_Sheet_Urban_areas.pdf
- IPCC-WG1. (2021a). Frequently Asked Questions. FAQ 10.2. Why Are Cities Hotspots of Global Warming? 60-61.
- Jáuregui, E. (2009). The heat spell of Mexico City. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(70), 7176.
- J Jones, L., Anderson, S., Læssøe, J., Banzhaf, E., Jensen, A., Bird, D. N., Miller, J., Hutchins, M. G., Yang, J., Garrett, J., Taylor, T., Wheeler, B. W., Lovell, R., Fletcher, D., Qu, Y., Vieno, M., & Zandersen, M. (2022). A typology for urban Green Infrastructure to guide multifunctional planning of nature-based solutions. *Nature-Based Solutions*, 2. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.nbsj.2022.100041>
- Kjellstrom, T., McMichael, A. V. (2013). Climate change threats to population health and well-being: the imperative of protective solutions that will last, *Global Health Action*, 6:1.
- Kjellstrom T, Holmer I y Lemke B. (2009). Workplace heat stress, health and productivity - an increasing challenge for low and middle-income countries during climate change. *Glob. Health Action 2 (Spec. Vol.): 46–51"*
- Landsberg, E. (1981). *The Urban Climate* (Vol. 28). United States of America, New York: International Geophysics Series.
- Lemoine Rodríguez, R. (2012). Cambios en la cobertura vegetal de la ciudad de Xalapa-Enríquez, Veracruz y zonas circundantes entre 1950 y 2010 (Tesis de la Licenciatura Biología). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz. 48 pp
- Lingshan L. (2022). Small green spaces can help keep cities cool during heat waves. *Physo.ORG*. Recuperado de <https://phys.org/news/2022-06-small-green-spaces-cities-cool.html>
- Lino Solano, J. J. (2019). Detección y caracterización espacial de la isla urbana de calor en la zona periferia de la ciudad de Xalapa en el Municipio de Emiliano Zapata, Veracruz (Tesis de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz.

- López Díaz, F. (2015). PROYECTO: 00086487 - Plataforma de colaboración sobre cambio climático y crecimiento verde entre Canadá y México 2013-2016. 9° Seminario sobre Eventos Climáticos Extremos: Homogeneidad de series de datos.
- Luevano, A. (2015). Cambio de uso de suelo y su impacto en temperaturas máximas en la Zona Metropolitana de Xalapa (Tesis de Especialista en Diagnóstico y Gestión Ambiental). Universidad Veracruzana. Xalapa-Enríquez, Veracruz. 76 pp
- Luyando, E. (2016). Efectos de las Temperaturas y Precipitaciones Extremas en el Bioclima Humano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México por Cambio Climático Local y Global (Tesis de Doctorado en Geografía). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 178pp.
- Lwasa, S., K.C. Seto, X. Bai, H. Blanco, K.R. Gurney, Ş. Kılış, O. Lucon, J. Murakami, J. Pan, A. Sharifi, Y. Yamagata. (2022). Urban systems and other settlements. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.010"
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3), 313–330. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.3.949>
- Mc Carthy, M. P., & Sanderson, M. G. (2011). Urban Heat Island: Sensitivity of Urban Temperatures to Climate Change and Heat Release in Four European Cities. The World Bank.
- New, M., D. Reckien, D. Viner, C. Adler, S.-M. Cheong, C. Conde, A. Constable, E. Coughlan de Perez, A. Lammel, R. Mechler, B. Orlove, and W. Solecki. (2022). Decision-Making Options for Managing Risk. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2539–2654, doi:10.1017/9781009325844.026.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates* (Vol. Second Edition). Methuen: Taylor & Francis Group.
- OMM. (2022). Estado del clima en América Latina y el Caribe 2021. Recuperado de <https://public.wmo.int/es/estado-del-clima-en-am%C3%A9rica-latina-y-el-caribe-0>
- OMM. (2014). *El Niño/Oscilación del Sur*. OMM-N°1145. ISBN 978-92-63-31145-0 . 12pp.
- PECCUV. (2019). Veracruz ante el cambio climático acciones mínimas 2019-2024. 65 propuestas. Recuperado de <http://repositorio.veracruz.gob.mx/medioambiente/wp-content/uploads/sites/9/2019/08/VERACRUZ-ANTE-EL-CC-PROPUESTAS-MI%CC%81NIMAS-2019-2024.pdf>
- Perdigón-Morales J., Romero-Centeno R., Barrett B. & Ordoñez P. (2019). Intraseasonal Variability of Summer Precipitation in Mexico: MJO Influence on the Midsummer Drought. *American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0425. 2313-2327pp.

- Robles, C., Campos, R., López, J., & Luna, A. (2010). Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas*. Ciudad de México: Boletín del Instituto de Geografía.
- Romero-Centeno R, Zavala-Hidalgo J, Raga GB. (2007). Midsummer gap winds and low-level circulation over the eastern tropical Pacific. *J. Clim.* 20(15): 3768– 3784.
- Rosso, F., F. Cappa, R. Spitzmiller, M. Ferrero. (2022). Pocket parks towards more sustainable cities. Architectural, environmental, managerial and legal considerations towards an integrated framework: A case study in the Mediterranean region, *Environmental Challenges*, Volume 7,100402,ISSN 2667-0100, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100402>
- SE. (2020). DataMéxico. Recuperado de <https://datamexico.org/es/profile/geo/xalapa#population-and-housing>
- SEDESOL. (2015). Sistema de Apoyo para la Planeación Catálogo de Localidades. Recuperado de <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=300870001>
- SEMARNAT - GIZ. (2022). Sistema de Información de la Agenda de Transparencia de acciones climáticas a nivel subnacional (SIAT-Subnacional). Recuperado de <https://siatsubnacional.semarnat.gob.mx/inicio>
- SEMARNAT - INECC. (2015). Elementos mínimos para la elaboración de programas de cambio climático de las entidades federativas. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/elementos-minimos-para-la-elaboracion-de-programas-de-cambio-climatico>
- SEMARNAT. (2019). Sistema Urbano Nacional. Recuperado de http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D1_SISTEMA_URBANO/D1_R_SISCDs00_01.htm
- SEMARNAT. (2005). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Recuperado de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/introduccion/presentacion.html
- Secretaría de Protección Civil Veracruz. (2022). Cuadernillo No.5 Fenómenos hidrometeorológicos y alerta gris. Recuperado de <http://www.veracruz.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/5/2022/01/Cuadernillo05.pdf>
- SMN. (2020). Normales Climatológicas por Estado. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=ver>
- Servicio Meteorológico Nacional Argentina. (2023). Alertas ante olas de calor. Recuperado de https://www.smn.gob.ar/smn_alertas/olas_de_calor
- Sobrino, J. (2022). Un tren llamado urbanización. Recuperado de <https://futurociudades.tec.mx/es/volumen-y-caracteristicas-de-la-urbanizacion#:~:text=Las%20Naciones%20Unidas%20estimaron%20para,respecto%20a%20la%20poblaci%C3%B3n%20total>.
- Tejeda-Martínez, A., y Acevedo-Rosas, F. (1990). Alteraciones Climáticas Por La Urbanización En Xalapa, Ver. Xalapa, Ver.
- Tejeda-Martínez, A., y Jauregui-Ostos, E. (2004). Apartado: Cuatro décadas de climatología urbana en México. Anuario. En *Estudios de Arquitectura Bioclimática*. Ciudad de México: Limusa Noriega.
- Tejeda-Martínez A. García-Cueto R., Aquino Martínez P., Nava Assad M. (2016). Simple statistical models of surface/atmosphere energy fluxes and their hysteresis in a desertic Mexican city (Mexicali). *Atmósfera* 29(2), 129-139.

- Tejeda, A., Acevedo, F., y Jauregui, E. (1989). Atlas Climático del Estado de Veracruz. Xalapa, Ver. Universidad Veracruzana.
- Torres, A., Tejeda, A., Vázquez, J., Brunet, I., Hernández, P., y Ruíz, B. (2010). Índices de cambio climático de la variabilidad en el estado de Veracruz, México. Asociación Española de Climatología.
- UV. (2009). Progmrada Veracruzana ante el Cambio Climático. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41034/2009_vz_pacc.pdf
- Vázquez Aguirre, J. (2010). Guía Para El Cálculo Y Uso De Índices De Cambio Climático En México. Ciudad de México: Primera edición.
- Yang, X., Peng, L. L., C. Y., Yao, L., & Wang, Q. (2020). Air humidity characteristics of local climate zones: a three-year observational study in Nanjing. *Building and Environment* (171), 106661.
- Wang, X., & Feng, Y. (2013). RhtestsV4 User Manual. Recuperado de http://etccdi.pacificclimate.org/RHtest/RHtestsV4_UserManual_20July2013.pdf

BIBLIOGRAFÍA

- Arnfield J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology* 23. 1-26pp.
- García-Cueto R., Jáuregui-Ostos E., Toudert D., Tejeda-Martinez A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B.C., Méxicio and its relationship with land use. *Atmósfera* 20(2), 111-131pp.
- Jáuregui E. (2005). Possible impact of urbanization on the termal climate of some large cities in México. *Atmósfera* 18(4). 247-248 pp.
- Jauregui E. & Luyando E. (1998). Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City. *Atmósfera* (11). 45-60pp.
- Tejeda Martínez A. (1994). *Sobre la Relación Clima/Urbe*. Xalapa, Ver.
- OECD (2010). *Cities and Climate Change*, OECD Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1787/9789264091375-en>

Anexo I.- Control de Calidad

Estación: Ánimas 30087

Los datos que se analizan en esta estación son los siguientes:

| Estación | Porcentaje de datos faltantes | | Periodo | Años |
|---------------------|-------------------------------|------|--------------------------|---------|
| | Tmax | Tmin | | |
| Las Ánimas 30087 | 5.4% | 5.2% | 01/01/1954 31/12/1994 | 41 años |

Lo primero es analizar gráficamente la serie de tiempo de la estación. Los puntos rojos y espacios que se muestra en la Figura A.1 corresponden a los datos faltantes en la base de datos. Se puede observar que tanto la temperatura máxima como la mínima presentan ciclos anuales marcados. El porcentaje de datos faltantes (5%) es similar en las dos variables, pero distribuidos en el tiempo de forma distinta.

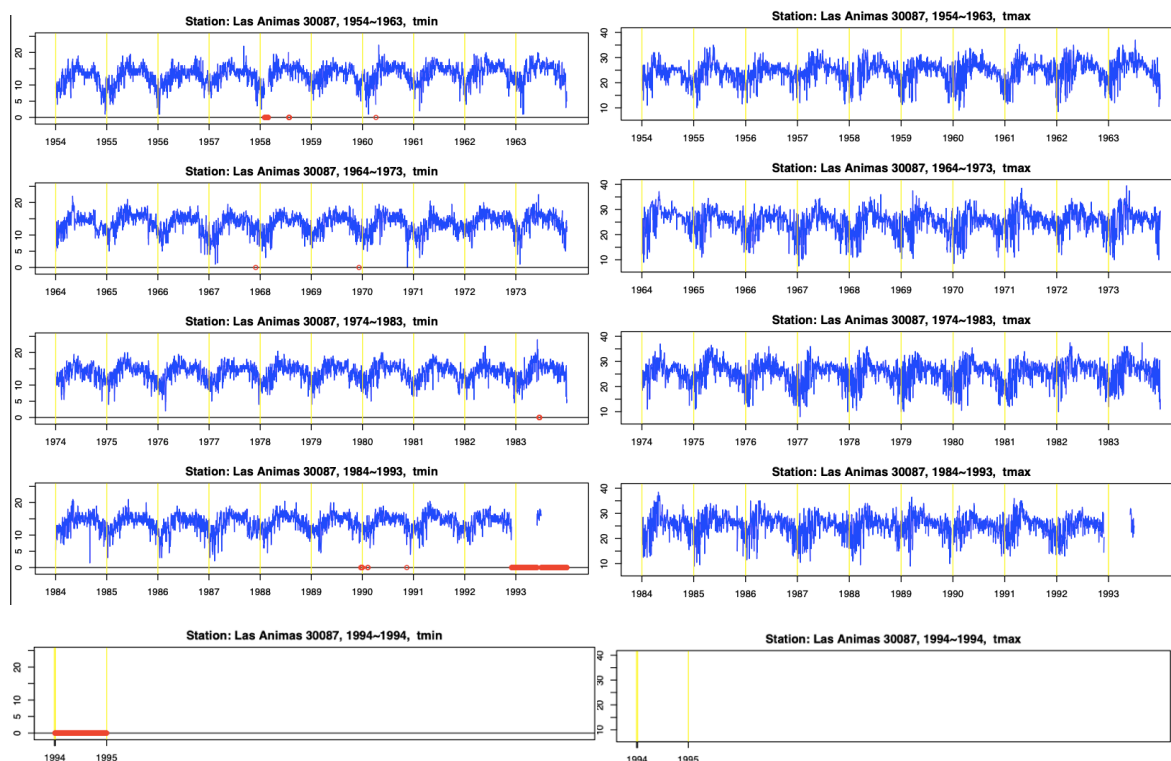


Figura A.1. Serie de datos de Temperatura Máxima y Mínima para la Estación Las Ánimas 1954-1994.

- Control de calidad básico
 - **Identificar valores de Tmax<Tmin y Tmax=Tmin**

Este tipo de valores se muestran en el archivo “Las Animas 30087_tempQC.csv” el cual para esta estación se encuentra vacío, por lo tanto, no se encuentran esos tipos de errores lógicos en la base de datos.

- **Identificar outliers [media-ndvs, media+ndvs]**

En el Archivo “Las Animas 30087_tepstdQC.csv” arroja los siguientes errores:

| year | month | day | tmaxlow | tmax | tmaxup | tminlow | tmin | tminup | dtrlow | dtr | dtrup | | | |
|------|-------|-----|---------|------|--------|---------|------|--------|--------|------|-------|----------------------------------|---------------------------|----------------------|
| 1963 | 7 | 9 | 17.61 | 37 | 35.66 | 10.49 | 15.5 | 19.34 | 1.24 | 21.5 | 22.26 | Esta igual en la base del CLICOM | Xalapa 30228 (25.5) | Sustitución por 27 |
| 1970 | 11 | 17 | 14.6 | 23 | 33.61 | 1.42 | 0 | 22.06 | 0 | 23 | 24.73 | Esta igual en la base del CLICOM | Xalapa 30228 (-2.2) | Dejar el dato |
| 1983 | 8 | 25 | 17.27 | 37.5 | 36.4 | 9.37 | 15.5 | 20.15 | 1.79 | 22 | 22.37 | Esta igual en la base del CLICOM | Observatorio 30075 (24.8) | Sustitución por 27.5 |
| 1984 | 9 | 1 | 18.97 | 26 | 34.51 | 5.14 | 1.4 | 24.5 | -0.66 | 24.6 | 24.49 | Esta igual en la base del CLICOM | Observatorio 30075 (14.4) | Sustitución por 14 |

Se muestra en color verde el dato que se encuentra por arriba o por debajo de cuatro desviaciones estándar alrededor de la media de cada variable, y subrayado en amarillo el umbral que rebasa. Cada uno de los datos sospechosos fue comparado con una base de datos de la misma estación, pero de fuente diferente y se encontró que tienen el mismo valor.

Adicionalmente se procedió a comparar el dato dudoso con los datos de las estaciones más cercanas considerando el periodo de observación de cada una. Se puede ver que se presentan errores tipográficos en el primero, tercero y cuarto caso; el segundo dato puede ser un dato correcto. Por lo anterior se optó por hacer las modificaciones marcadas en la última columna, ya que en general la estación de Las Ánimas tiene una temperatura superior en 2°C aproximadamente con respecto a Xalapa y Observatorio.

Atendidos dichas correcciones, se guarda una nueva base de datos (se sugiere poner algún indicativo que ya tiene un primer control de calidad). Después se procede a cargar la base de datos modificada y correr el control de calidad básico y se observa que ya no aparecen los outliers detectados inicialmente; después se procede a correr el control de calidad extra.

- Control de calidad extra
 - **Detección de outliers:**

El archivo “Las Animas 30087 (1CC)_boxes.pdf” muestra las gráficas de cajas y bigotes de los promedios mensuales para todo el periodo de observación, identificados en forma de círculo aquellos valores que superan el tercer cuartil + 3 veces el rango intercuartílico o los que no alcanzan el primer cuartil – 3 veces el rango intercuartílico. De estos casos solamente uno rebasa las cuatro desviaciones estándar como lo mostro el control de calidad básico (Figura A.2).

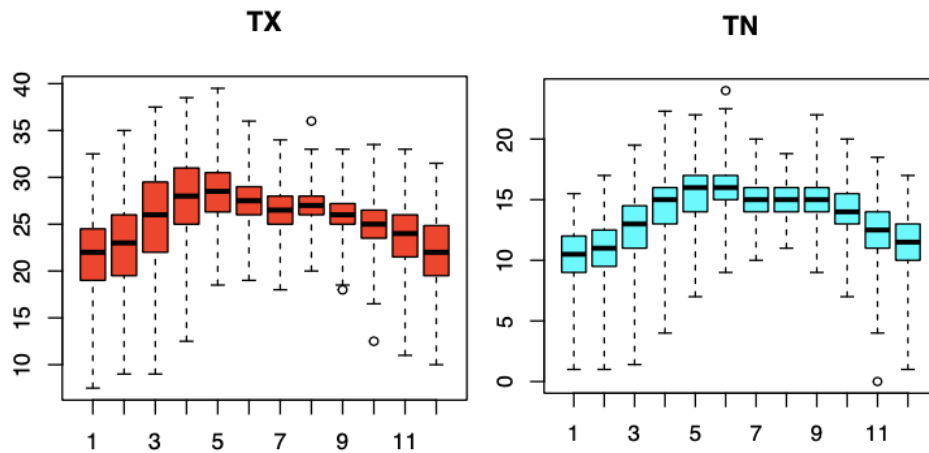


Figura A.2. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de los promedios anuales de la temperatura máxima (TX) y la mínima (TN).

También se puede observar que hay variaciones en el tamaño de la caja, lo que se relaciona con la dispersión de las temperaturas durante un mes o un año, como se puede observar en el archivo “Las Animas 30087 (1CC)_boxseries.pdf” (Figura A.3).

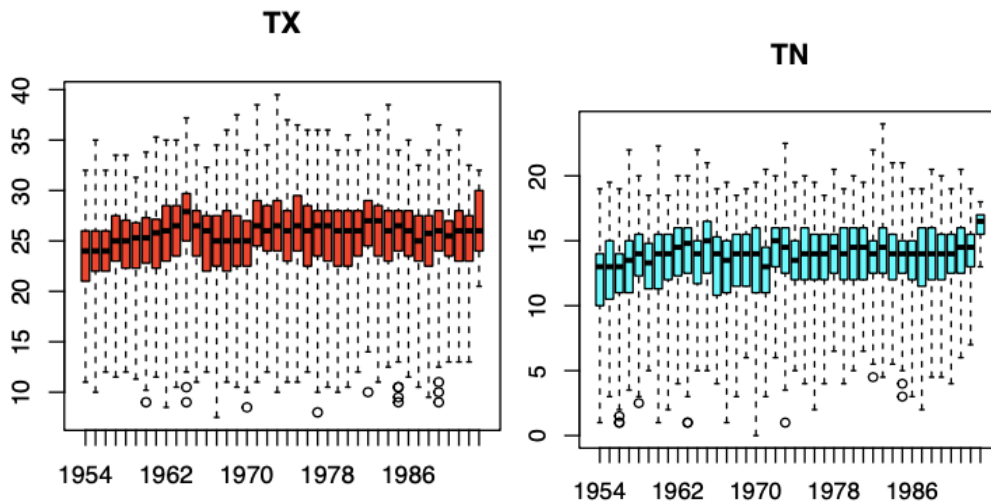


Figura A.3. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de la serie de tiempo de la temperatura máxima (TX), la mínima (TN).

Adicionalmente se cuenta con el archivo “Las Animas 30087 (1CC)_outliers.txt” que muestra los outliers por fecha exacta y mostrando cuál es el umbral que rebasan:

```
tx up
***
1968 8 10 0 36 14 22
tx low
***
1967 9 24 28.6 18 16.5 1.5
1967 10 31 5.2 12.5 11 1.5
tn up
***
1983 6 4 2.6 32 24 8
tn low
***
1970 11 17 0 23 0 23
```

La revisión se lleva a cabo renglón por renglón de este archivo, para saber si el dato es originado por algún evento extremo, o si es un dato erróneo y se debe sustituir el dato por -99.9. Estos datos son diferentes a los establecidos en el primer control de calidad.

El primer caso se comparó con los días previos y posteriores de la misma estación y con los datos de la estación cercana y se observa que es un error de dedo ya que la temperatura anda en los veinte por ellos se modificará el valor a 26°C que es consistente con lo observado. Los siguientes datos son consistentes con lo reportado en la estación cercana que guarda una diferencia de aproximadamente 2°C a lo largo de toda la serie de datos.

En el caso de datos duplicados esta base de datos no presenta ese error. Es decir el archivo “Las Animas 30087 (1CC)_duplicates.txt” este archivo está vacío para el caso de esta estación.

- **Redondeo:**

Se puede observar que los decimales que se presentan con mayor frecuencia en la serie de tiempo son cero y de 0.5, esto es lo que ocurre normalmente ya que la escala mínima del termómetro es de 0.5°C para el caso de la temperatura. Adicionalmente podemos observar que existe una prevalencia del grado entero y de los decimales pares, aunque no de forma exagerada (Figura A.4).

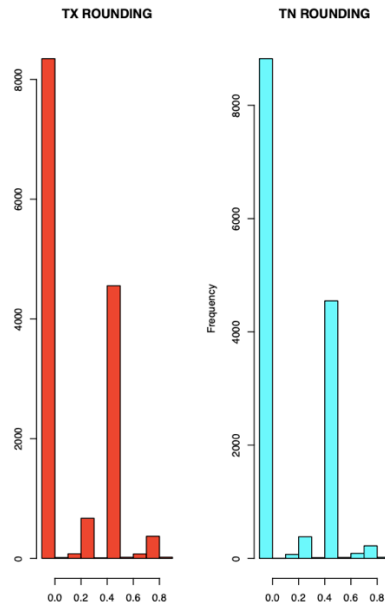


Figura A.4. Histograma de valores decimales de la serie de tiempo.

- **Errores en Tmax y Tmin:** esta prueba muestra los errores lógicos como la $T_{max} < T_{min}$ o la $T_{max} = T_{min}$. Para el caso de esta serie de tiempo no se presenta este error.

- **Valores repetidos:** bloques de datos donde la Tmax y Tmin con valores similares de al menos tres días consecutivos se muestran en los siguientes archivos “Las Animas 30087 (1CC)_tn_flatline.txt” y “Las Animas 30087 (1CC)_tx_flatline.txt”. En ambos archivos hay varios renglones donde se muestra que se repiten sucesivamente varios datos, se reportan de tres repeticiones en adelante. Primero se tienen que comparar los datos que tiene esta serie de tiempo con las de otra fuente oficial SMN o con las estaciones más cercanas y si se observa que los datos son similares, se decide que a partir de la tercera repetición se cambia el dato a -99.9 .

- **Diferencias diarias excesivas:** muestra registros donde la diferencia de la temperatura con el día previo es más grande o igual que 20°C , en este caso solamente se tiene datos para la temperatura máxima y en el caso de la temperatura mínima no presentan este tipo de datos, lo cual se muestra en el archivo “Las Animas 30087 (1CC)_tx_jumps.txt”

1982 1 13 20

Figura A.5. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C .

En la Figura A.5 se muestran las fechas cuando la diferencia de los datos consecutivos es mayor a 20°C , estos datos se corroboraron y son similares con otra fuente oficial. Después se buscó si se presentó algún evento meteorológico en la fecha que pudiera

ocasionar esta diferencia de temperatura, como es el caso de los “Nortes”, el cual es un evento meteorológico que se presenta en la zona de estudio y puede ocasionar grandes descensos de temperatura de un día a otro. Dado que no se encontró ningún evento relacionado a la fecha se decidió sustituir los datos por -99.9.

- **Valores demasiado grandes:** muestra los valores de precipitación mayores a 200 mm o temperaturas mayores a 50°C. Para el caso de esta estación no se tiene este tipo de error.

Partiendo de la atención a todos los datos dudosos que ha detectado en las diferentes pruebas del control de calidad, que se han realizado a la base de datos, se cuenta con una base de datos que solamente muestran la fluctuación del clima para esta estación.

Estación: Xalapa 30228

Los datos que se analizan en esta estación son los siguientes:

| Estación | Porcentaje de datos faltantes | | Periodo | Años |
|-----------------|-------------------------------|-------|--------------------------|---------|
| | Tmax | Tmin | | |
| Xalapa 30228 | 10.7% | 10.7% | 01/01/1952 31/12/1981 | 30 años |

Lo primero es analizar gráficamente la serie de tiempo de la estación, donde podemos ver cómo están distribuidos los datos faltantes los cuales son representados por puntos rojos o espacios que se muestra en la Figura A.6. Tanto la temperatura máxima como la mínima presentan ciclos anuales marcados. porcentaje de datos faltantes y su distribución en el tiempo es similar en las dos variables.

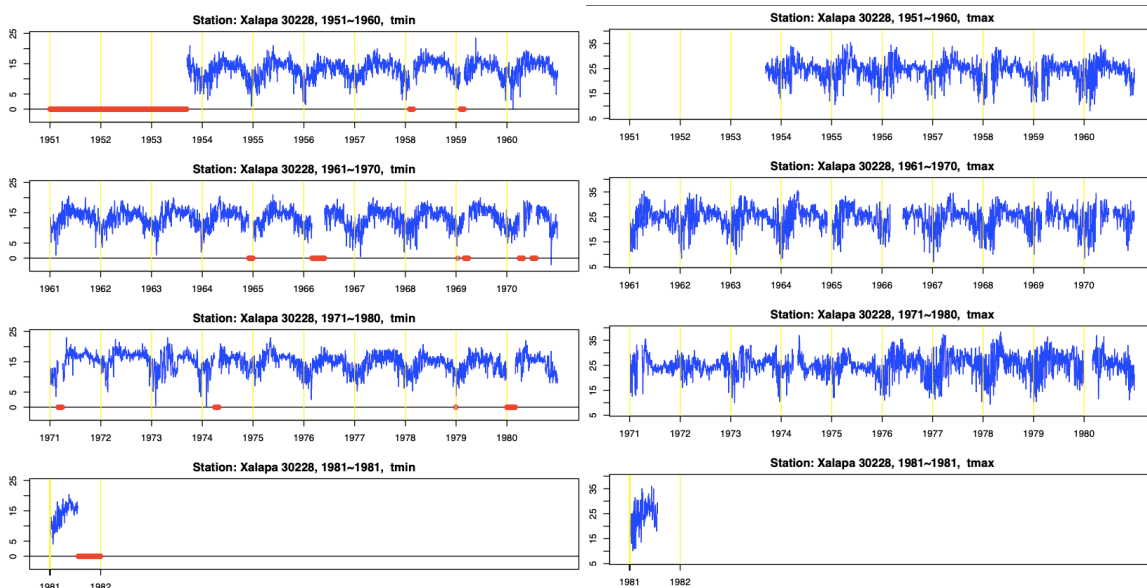


Figura A.6. Serie de datos de Temperatura Máxima y Mínima para la Estación Xalapa 1952-1981.

- Control de calidad básico
 - **Identificar valores de $T_{max} < T_{min}$ y $T_{max} = T_{min}$**

Este tipo de valores se muestran en el archivo “Xalapa 30228_tempQC.csv” el cual para esta estación se encuentra vacío, por lo tanto, no se encuentran esos tipos de errores lógicos en la base de datos.

- **Identificar outliers [media-ndvs, media+ndvs]**

Se identifica los valores que están por arriba o por debajo de cuatro desviaciones estándar, por lo tanto, no se genera el archivo. Por lo que, para el proceso de control de calidad básico no se identifican outliers, por lo anterior se procede a correr el control de calidad extra.

- Control de calidad extra
 - **Detección de outliers:**

El archivo “Xalapa 30228 (1CC)_boxes.pdf” muestra las gráficas de cajas y bigotes de los promedios mensuales para todo el periodo de observación, identificados en forma de círculo aquellos valores que superan el tercer cuartil + 3 veces el rango intercuartílico o los que no alcanzan el primer cuartil – 3 veces el rango intercuartílico hay pocos datos (Figura A.7).

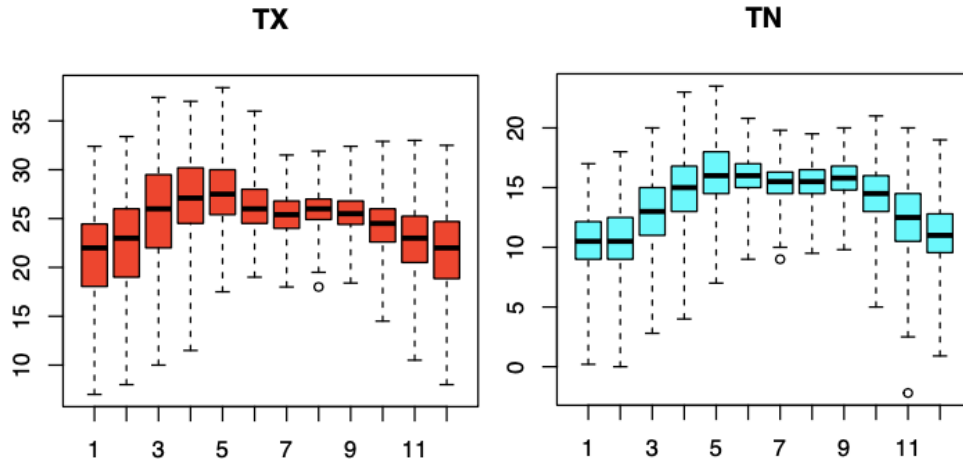


Figura A.7. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de los promedios anuales de la temperatura máxima (TX) y la mínima (TN).

También se puede observar que hay variaciones en el tamaño de la caja esto se relaciona con la dispersión de las temperaturas durante un mes o un año, como se puede observar en el archivo “Xalapa 30228 (1CC)_boxseries.pdf” (Figura A.8).

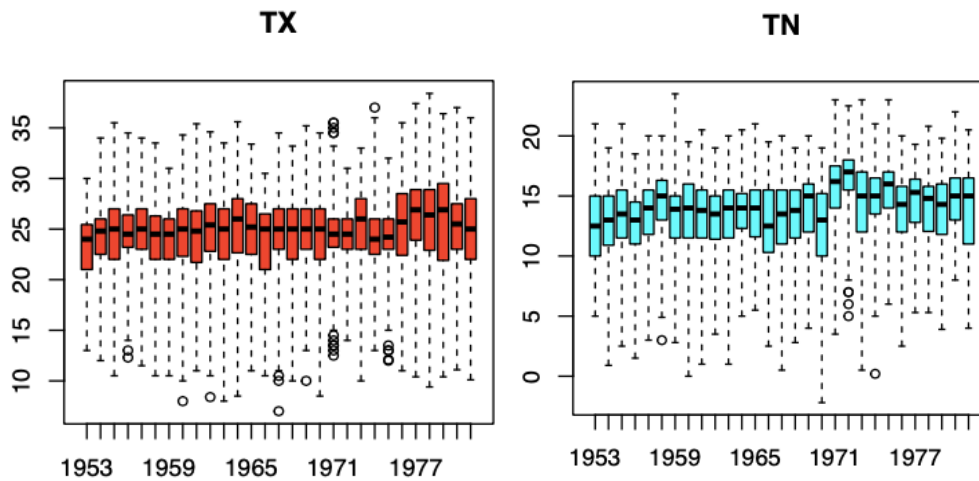


Figura A.8. Gráfico de cajas y bigotes de la representación de la serie de tiempo de la temperatura máxima (TX), la mínima (TN).

Adicionalmente se cuenta con el archivo “Xalapa 30228 (1CC)_outliers.txt” que muestra los outliers por fecha exacta y mostrando cual es el umbral que rebasan:

```
tx up
**
tx low
**
1966 8 23 0 18 16.5 1.5
tn up
**
tn low
**
1966 7 10 0 25 9 16
1970 11 17 14.3 23 -2.2 25.2
```

La revisión se lleva a cabo renglón por renglón de este archivo, para saber si el dato es originado por algún evento extremo, o si es un dato erróneo y se debe sustituir el dato por -99.9. En estos casos se comparó con los días previos y posteriores de la misma estación y con los datos de la estación cercana y se observa que el dato no es consistente por lo tanto se optó por -99.9.

En el caso de datos duplicados esta base de datos no presenta ese error. Es decir el archivo "Xalapa 30228 (1CC)_duplicates.txt" este archivo está vacío para el caso de esta estación.

- **Redondeo:**

Se puede observar que los decimales que se presentan con mayor frecuencia en la serie de tiempo son cero y de 0.5, esto es lo que ocurre normalmente ya que la escala mínima del termómetro es de 0.5°C para el caso de la temperatura. Adicionalmente podemos observar que existe una prevalencia del grado entero y de los decimales pares, aunque no de forma exagerada (Figura A.9).

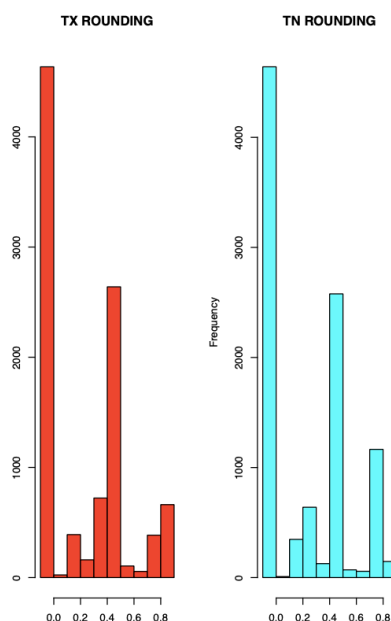
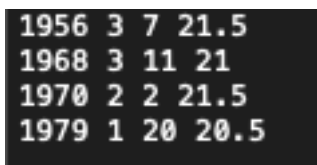


Figura A.9. Histograma de valores decimales de la serie de tiempo.

- **Errores en Tmax y Tmin:** esta prueba muestra los errores lógicos como la $T_{max} < T_{min}$ o la $T_{max} = T_{min}$. Para el caso de esta serie de tiempo no se presenta este error.

- **Valores repetidos:** bloques de datos donde la Tmax y Tmin con valores similares de al menos tres días consecutivos se muestran en los siguientes archivos “Xalapa 30228 (1CC)_tn_flatline.txt” y “Xalapa 30228 (1CC)_tx_flatline.txt”. En ambos archivos hay varios renglones donde se muestra que se repiten sucesivamente varios datos, se reportan de tres repeticiones en adelante. Primero se tienen que comparar los datos que tiene esta serie de tiempo con las de otra fuente oficial como las del SMN o con las estaciones más cercanas y si se observa que los datos son similares, se decide que a partir de la tercera repetición se cambia el dato a –99.9.

- **Diferencias diarias excesivas:** muestra registros donde la diferencia de la temperatura con el día previo es más grande o igual que 20°C, en este caso solamente se tiene datos para la temperatura máxima y en el caso de la temperatura mínima no presentan este tipo de datos, lo cual se muestra en el archivo “Xalapa 30228 (1CC)_tx_jumps.txt”



| | | | |
|------|---|----|------|
| 1956 | 3 | 7 | 21.5 |
| 1968 | 3 | 11 | 21 |
| 1970 | 2 | 2 | 21.5 |
| 1979 | 1 | 20 | 20.5 |

Figura A.10. Datos con diferencias mayores o iguales a 20°C.

En la Figura A.10 se muestran las fechas donde la diferencia de los datos consecutivos es mayor a 20°C, estos datos se corroboraron y son similares con otra fuente oficial. Después se buscó si se presentó algún evento meteorológico en la fecha que pudiera ocasionar esta diferencia de temperatura, como es el caso de los “Nortes”, el cual es un evento meteorológico que se presenta en la zona de estudio y puede ocasionar grandes descensos de temperatura de un día a otro. Dado que no se encontró ningún evento relacionado a la fecha se decidió sustituir los datos por –99.9.

- **Valores demasiado grandes:** muestra los valores de precipitación mayores a 200 mm o temperaturas mayores a 50°C. Para el caso de esta estación no se tiene este tipo de error.

Al atender todos los datos dudosos que se han detectado en las diferentes pruebas del control de calidad, que se han realizado a la base de datos, se cuenta con una base de datos que solamente muestra la fluctuación del clima para esta estación.

Anexo II.- Homogeneización

Estación: Las Ánimas 30087

Como parte de la carpeta “output”, se analizarán los diferentes archivos que se generaron, para las variables de temperatura mínima y máxima.

- Las Animas 30087 (2CC) tminMLY_U.pdf

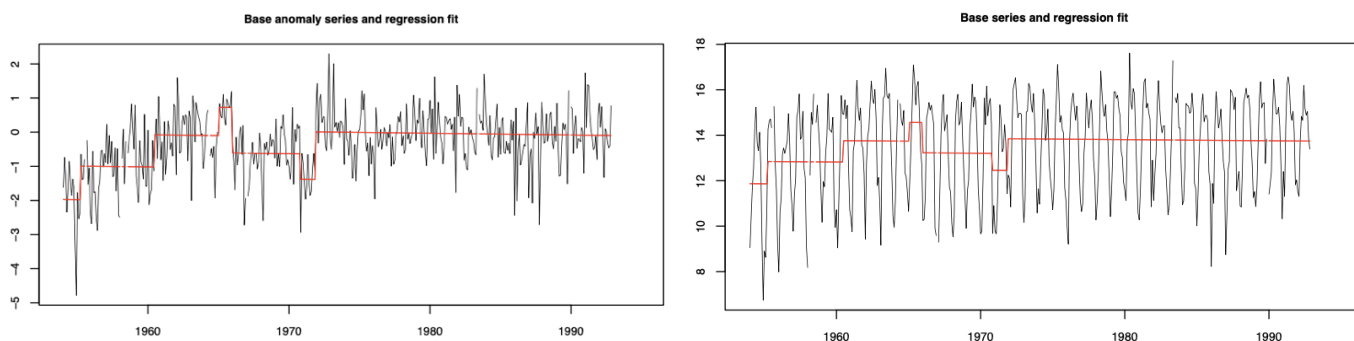


Figura A.11. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia.

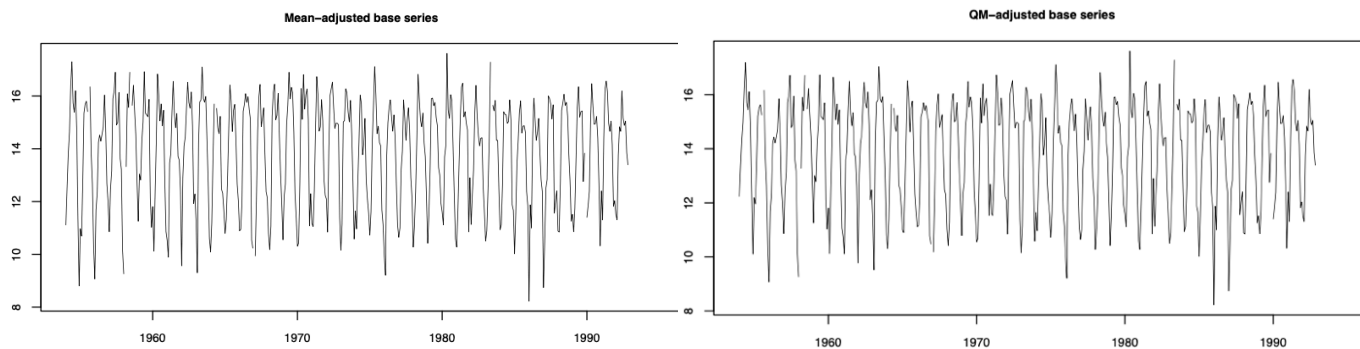


Figura A.12. Ajustes de la base de datos

Las y muestra que a lo largo del periodo se han identificado en la base de datos mensuales seis y cuatro puntos de cambio respectivamente (temperatura mínima y máxima). Al realizar una regresión en los datos, estos brincos se suavizan. En las Figura A.12 y Figura A. 14 se presentan ajustes por medio de diferentes métodos estadísticos con los que se adecuaron los brincos que se observan en las y .

- Las Animas 30087 (2CC) tmaxMLY U.pdf

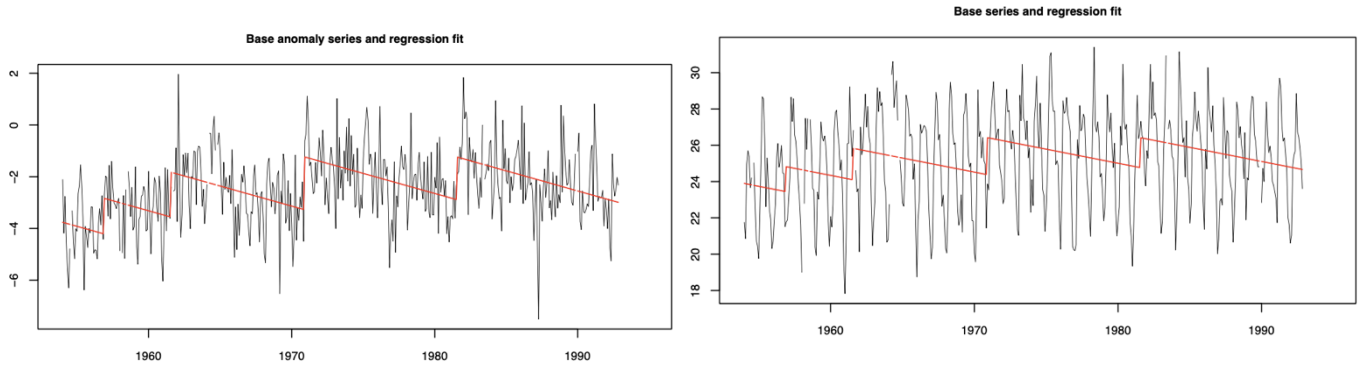


Figura A. 13. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia de la temperatura máxima.

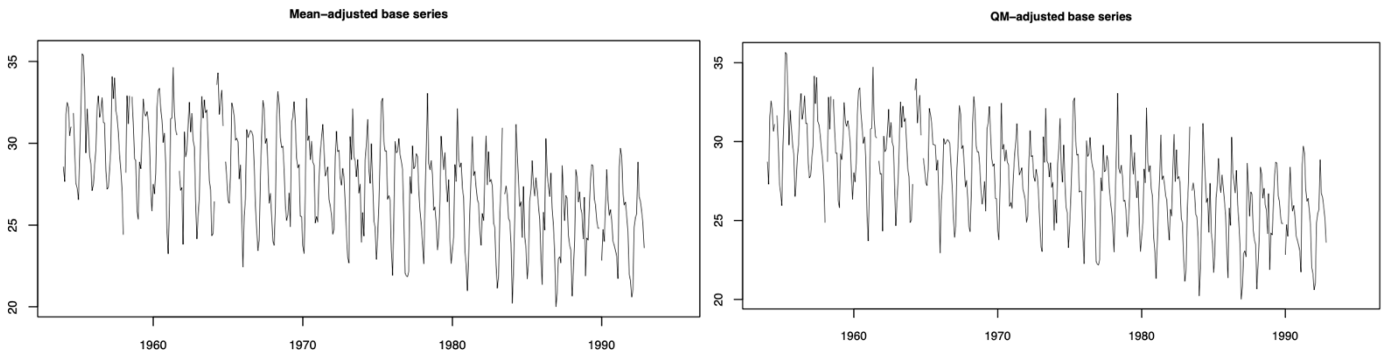


Figura A. 14. Ajustes de la base de datos.

- Las Animas 30087 (2CC) tminMLY mCs.txt

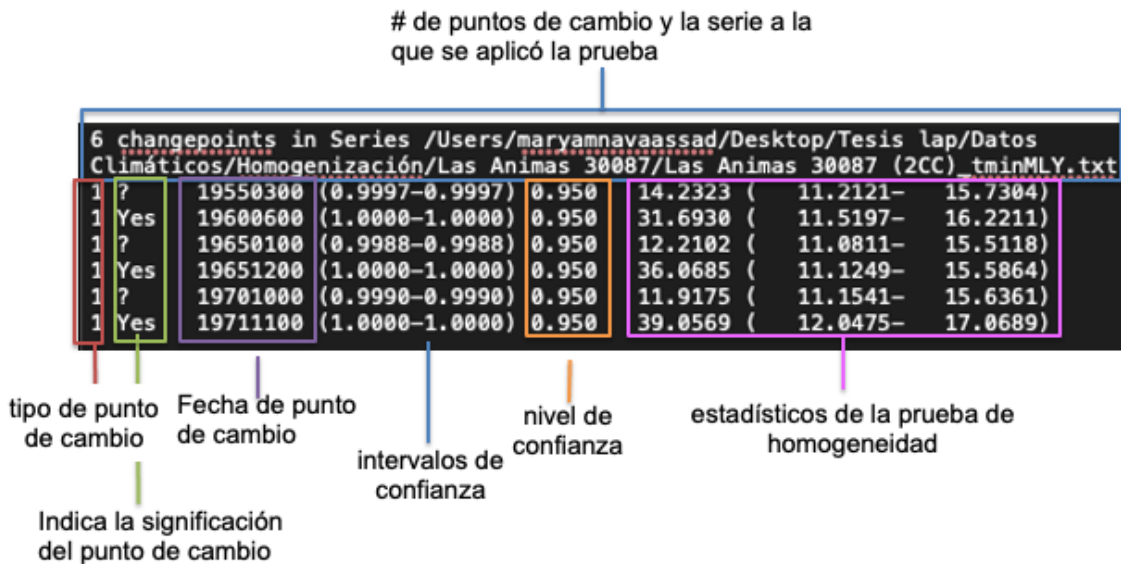


Figura A. 15. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima.

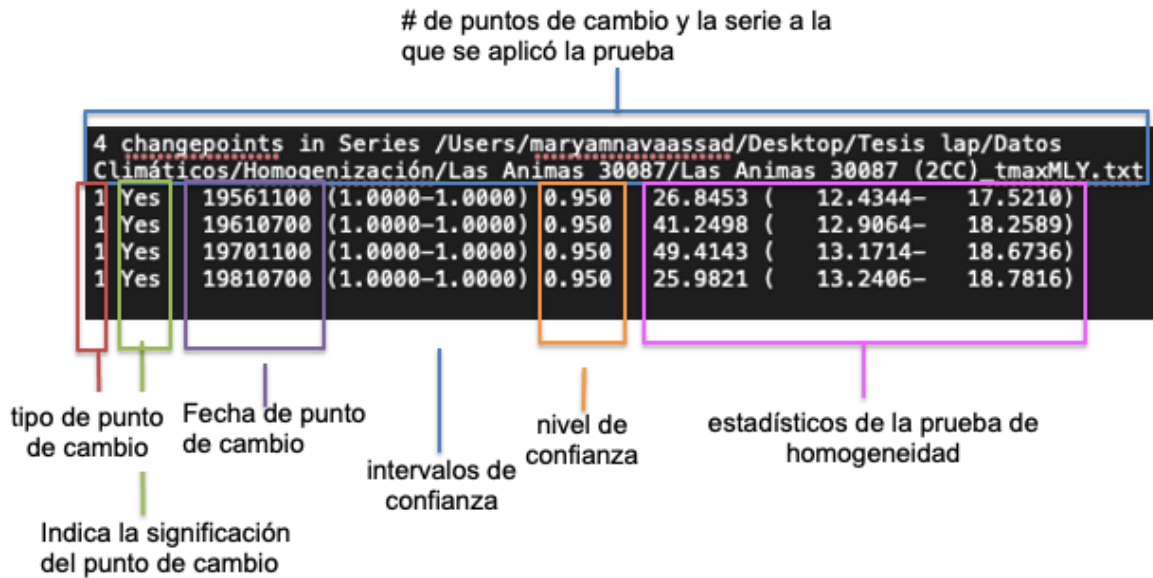


Figura A. 16. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura máxima.

En este tipo de archivo se muestra la lista de los puntos de cambio que podrían ser significativos al nivel de confianza del 95% sin soporte de metadatos, a los cuales se les llama “Type-1 changepoints”. En caso de que se tuvieran metadatos, el número cambiaría “Type-0 changepoints”. En la segunda columna se muestra si el punto de cambio es significativo, para lo cual existen tres posibilidades: Si punto de cambio es significativo “Yes”; No es significativo “No”; Hay duda “?”.

De las Figura A. 15 y Figura A. 16 se puede observar que se identificaron seis y cuatro puntos de cambio respectivamente que son del tipo 1, ya que no cuentan con metadatos. También se señala que unos de los cambios son significativos (Yes) y el otros presentan duda (?). Se muestran los saltos detectados en las series mensuales como “yyyymm”, aquí se presentan diferentes casos para la decisión de ajuste o no ajuste de los brincos:

- i. Salto con **yyyymm?**, dudoso para ser significativo. Este tipo de fechas se consideraron no significativas.
- ii. En los caso yyyymm donde hubo coincidencia con ocurrencia de eventos de **El Niño** o **La Niña**, de acuerdo al índice multivariado de El Niño/Oscilación del Sur (MEI por sus siglas en inglés, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/rank.html>), respectivamente, por tanto no se ajustaran esos saltos.

- iii. Para **yyyymm** indica que estos brincos se repitieron en estaciones cercanas por tanto no se ajustaron.
- iv. Para **yyyymm** se tiene el caso que después de esta fecha hay datos faltantes.
- v. Finalmente, las fechas que no entran en alguno de los casos anteriores se ajustaron

Tabla A.1. Saltos detectados en las series de datos de la estación Las Ánimas y su relación con factores que propician los puntos de cambio.

| Temperatura mínima | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Lugar | Clave | Saltos Mensuales Detectados | | | | | |
| Las Ánimas | 30087 | 195503 | 196006 | 196501 | 196512 | 197010 | 197111 |
| Temperatura máxima | | | | | | | |
| Lugar | Clave | Saltos Mensuales Detectados | | | | | |
| Las Ánimas | 30087 | 195611 | 196107 | 197011 | 198107 | | |

| Factores | | | | |
|----------|---------|------------------|-----------------|------------------|
| El Niño | La Niña | Estación cercana | Datos faltantes | No significativo |

En el caso de la Tabla A.1 y las Figura A. 15 y Figura A. 16 se observa que los saltos en las fechas identificadas por el *software*, están relacionados con diferentes factores como: años Niña, Niño, ausencia de datos y si se presenta el mismo punto de cambio en alguna estación cercana, en cuyo caso no hay que realizar ninguna corrección, ya que el brinco está relacionado con la variabilidad climática. Lo anterior aplica para el caso de las variables analizadas.

Estación: Xalapa 30228

Como parte de la carpeta “output”, se analizarán los diferentes archivos que se generaron, se utilizará la variable de temperatura mínima y máxima.

– Xalapa 30228 (2CC) tminMLY U.pdf

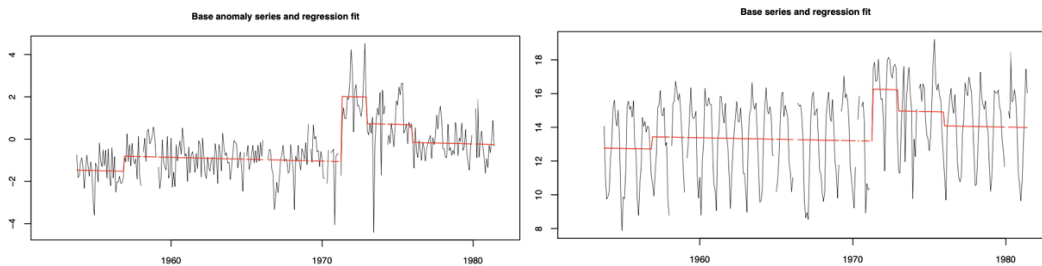


Figura A. 17. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia.

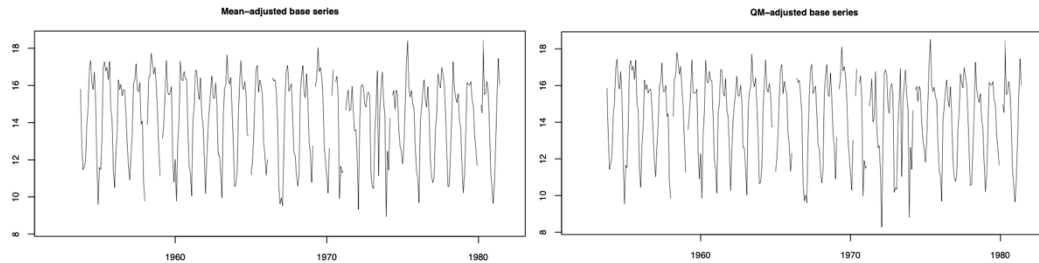


Figura A. 18. Ajustes de la base de datos.

Las Figura A. 17 y Figura A. 19 muestran que a lo largo del periodo se han identificado en la base de datos mensuales cuatro y cero puntos de cambio respectivamente (temperatura mínima y máxima). Al realizar una regresión en los datos de la temperatura mínima, estos brincos se suavizan. En las Figura A. 18 y Figura A. 20 se presentan ajustes por medio de diferentes métodos estadísticos con los que se adecuaron los brincos.

– Xalapa 30228 (2CC) tmaxMLY U.pdf

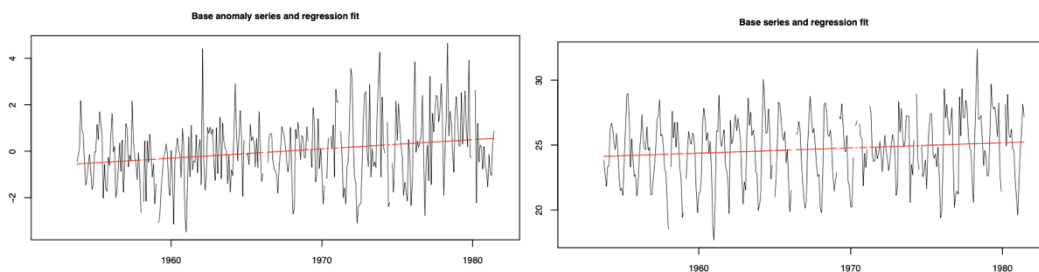


Figura A. 19. Detección de brincos en la base de datos e identificación de tendencia temperatura máxima.

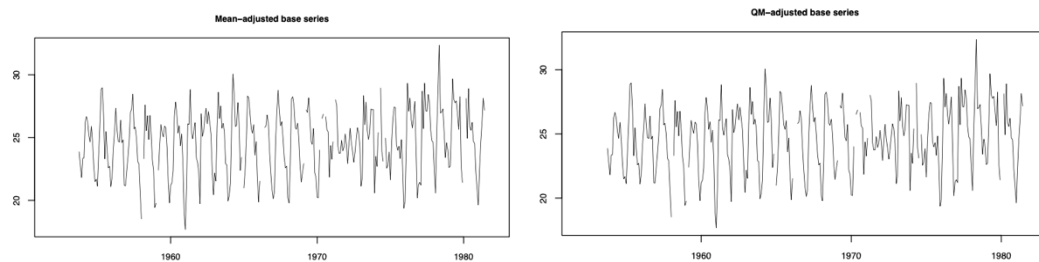


Figura A. 20. Ajustes de la base de datos.

- Xalapa 30228 (2CC) tminMLY mCs.txt

```
# changepoints in Series /Users/maryamnavassad/Desktop/Tesis lap/Datos Climáticos/Homogenización/
Xalapa 30228/Xalapa 30228 (2CC)_tminMLY.txt
1 ? 19561100 (0.9999-0.9999) 0.950 17.2830 ( 12.5449- 19.1220)
1 Yes 19710400 (1.0000-1.0000) 0.950 175.8333 ( 12.4782- 19.0034)
1 ? 19721200 (0.9992-0.9992) 0.950 12.4773 ( 11.4698- 17.2204)
1 ? 19751200 (0.9996-0.9996) 0.950 13.0839 ( 12.0604- 18.2753)
```

Figura A. 21. Puntos de cambio en la serie de datos de la variable de temperatura mínima.

De la Figura A. 21 se puede observar que se identificaron cuatro puntos de cambio que

son del tipo 1, ya que no cuentan con metadatos. También se señala que uno de los cambios es significativo (Yes) y los otros presentan duda (?). En el caso de la temperatura máxima no se detecta ni un punto de cambio, por lo tanto, se puede decir que es una serie homogénea.

Tabla A.2. Saltos detectados en las series de datos de la estación Xalapa y su relación con factores que propician los puntos de cambio.

| Temperatura mínima | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------------|--------|--------|--------|
| Lugar | Clave | Saltos Mensuales Detectados | | | |
| Xalapa | 30228 | 195611 | 197104 | 197212 | 197512 |

| Factores | | | | |
|----------|---------|------------------|-----------------|------------------|
| El Niño | La Niña | Estación cercana | Datos faltantes | No significativo |

En el caso de la Tabla A.2 y la Figura A. 21 se observa que los saltos en las fechas identificadas por el *software* están relacionados con factores de variabilidad climática como son los años La Niña y El Niño, por lo anterior no hay que realizar ningún cambio en la estación, ya que está relacionado el brinco a la variabilidad climática.

Al aplicar el control de calidad y homogeneidad en la serie de datos de la estación de interés, se puede proceder a la realización del cálculo de los índices de cambio climático que se describe a continuación.

Anexo III.- Índices de Cambio Climático

Estación: Las Ánimas 30087

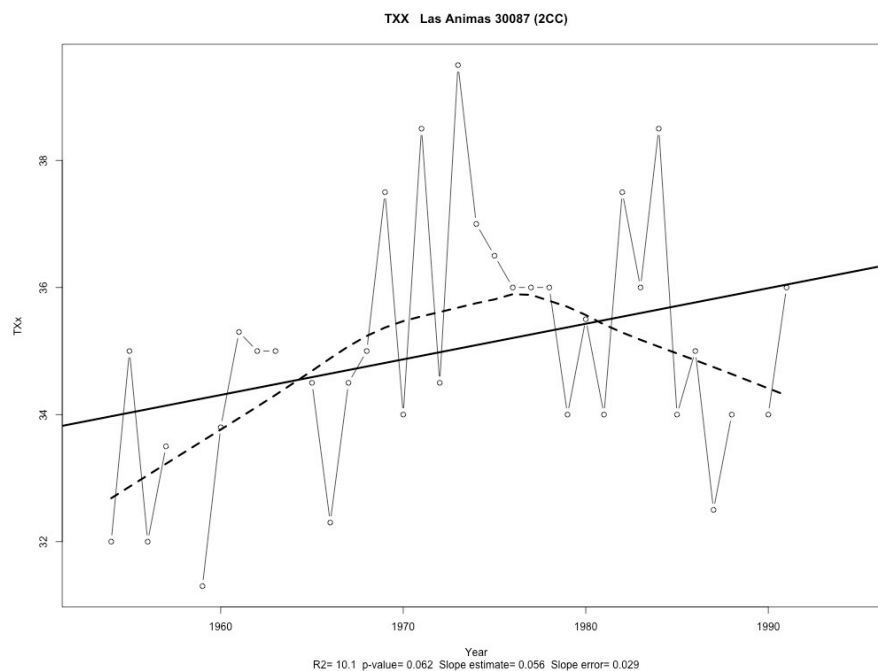
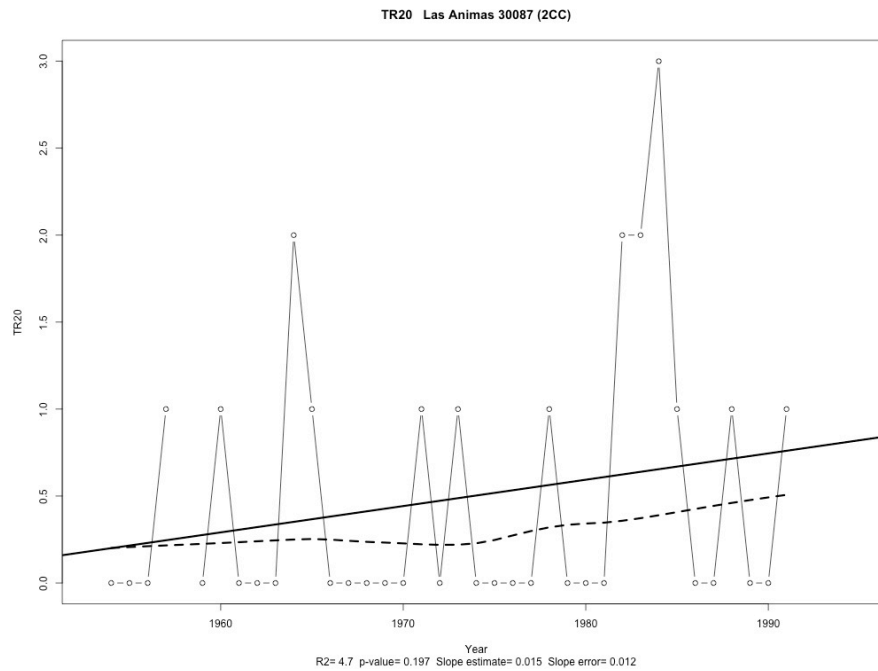
Los resultados de la evaluación de los Índices de Cambio Climático se encuentran dentro de las carpetas “índices”, “trend” y “plots”. La primera carpeta muestra el cálculo de cada uno de los índices seleccionado por año, ya sea un promedio anual o por matrices mensuales e incorporando un promedio anual. En el caso de la carpeta “trend” muestra un resumen de los resultados de cada uno de los índices sobre su tendencia para el período de análisis:

Tabla A. 3. Pendiente de los índices de cambio climático para la estación de Las Ánimas 30087.

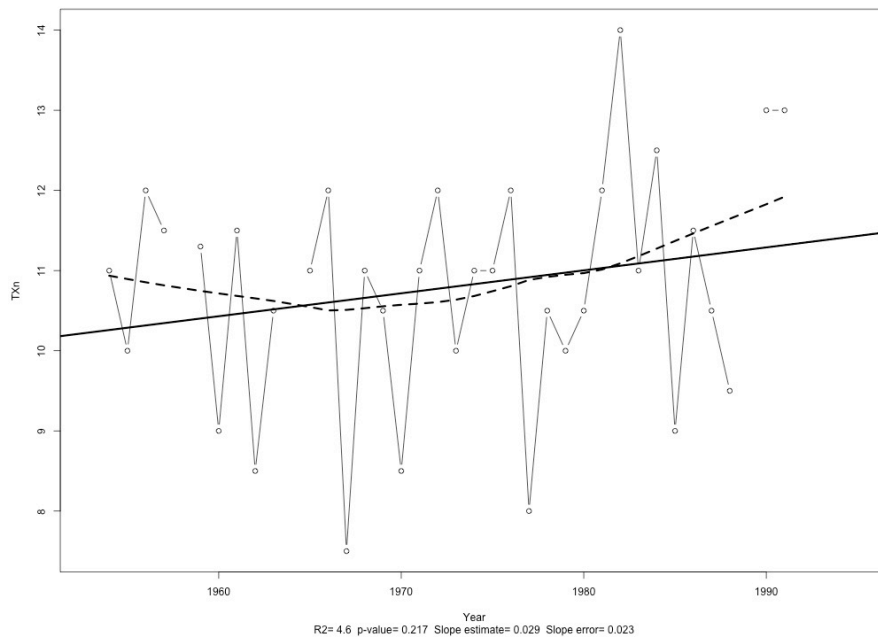
| Indices | SYear | EYear | Slope | STD_of_Slope | P_Value |
|---------|-------|-------|--------|--------------|---------|
| su25 | 1953 | 1995 | 1.788 | 0.458 | 0 |
| id0 | 1953 | 1995 | 0 | 0 | NaN |
| tr20 | 1953 | 1995 | 0.015 | 0.012 | 0.197 |
| fd0 | 1953 | 1995 | 0 | 0 | NaN |
| gsl | 1953 | 1995 | 0.026 | 0.015 | 0.095 |
| txx | 1953 | 1995 | 0.056 | 0.029 | 0.062 |
| txn | 1953 | 1995 | 0.029 | 0.023 | 0.217 |
| tnx | 1953 | 1995 | 0.01 | 0.017 | 0.56 |
| tnn | 1953 | 1995 | 0.064 | 0.025 | 0.015 |
| tx10p | 1953 | 1995 | -0.103 | 0.05 | 0.046 |
| tx90p | 1953 | 1995 | 0.187 | 0.062 | 0.005 |
| tn10p | 1953 | 1995 | -0.262 | 0.071 | 0.001 |
| tn90p | 1953 | 1995 | 0.074 | 0.068 | 0.285 |
| wsvi | 1953 | 1995 | 0.062 | 0.074 | 0.412 |
| csdi | 1953 | 1995 | -0.13 | 0.085 | 0.137 |

Donde se puede observar que de los 13 índices calculados solamente cinco presentan un cambio significativo en la pendiente, los cuales se describen a continuación: Días de verano (SU25) tiene una pendiente positiva la cual se relación con mayor número de días con temperatura máxima por arriba de los 25°C; Temperatura mínima extrema (TNN) presenta un pendiente positiva lo cual se relaciona con un incremento de la temperatura al presentar en el eje Y °C; Frecuencia de días frescos (Tx10p) tiene una pendiente negativa quiere decir que es menos frecuente tener temperaturas máximas frías; Frecuencia de días calurosos (Tx90p) tiene un tendencia al incremento por lo tanto la ocurrencia de días cálidos es mayor, por último se tiene la Frecuencia de noches frías (Tmin<10p) con una pendiente negativa lo cual se asocia con que las temperaturas mínimas más frías se están calentado.

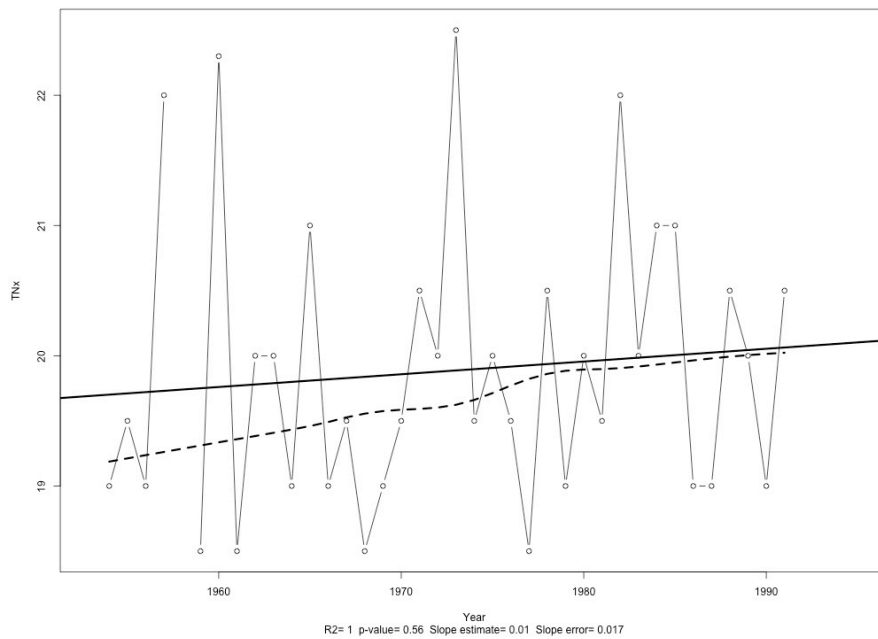
Para el resto de los índices que no presentan un cambio significativo en la pendiente se muestran las gráficas de cada uno (carpeta plots), en el cual se observa el comportamiento de los datos observados y el de la línea punteada que presenta un mejor ajuste, el cambio en la variable se muestra en el apartado “Capítulo 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN” de la tesis.



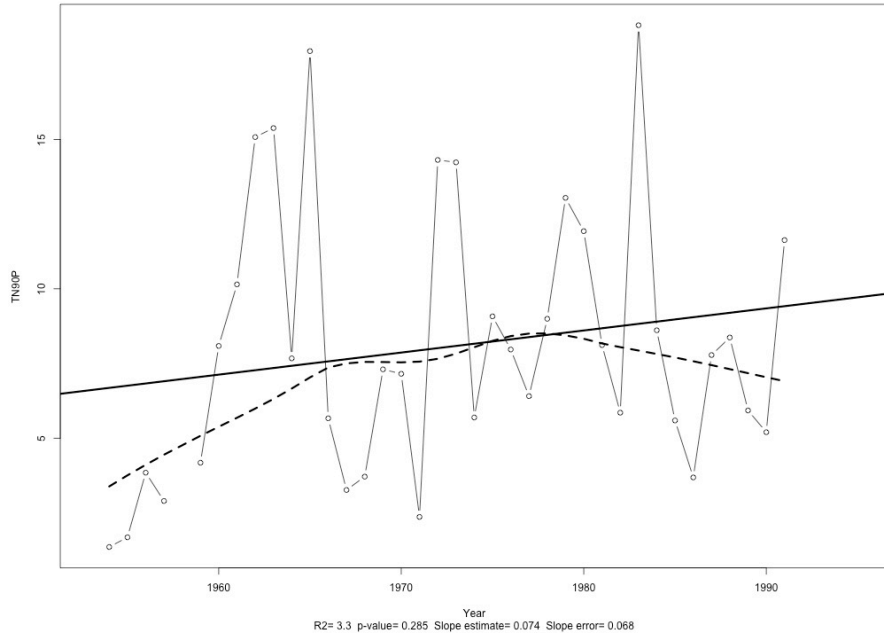
TXN Las Animas 30087 (2CC)



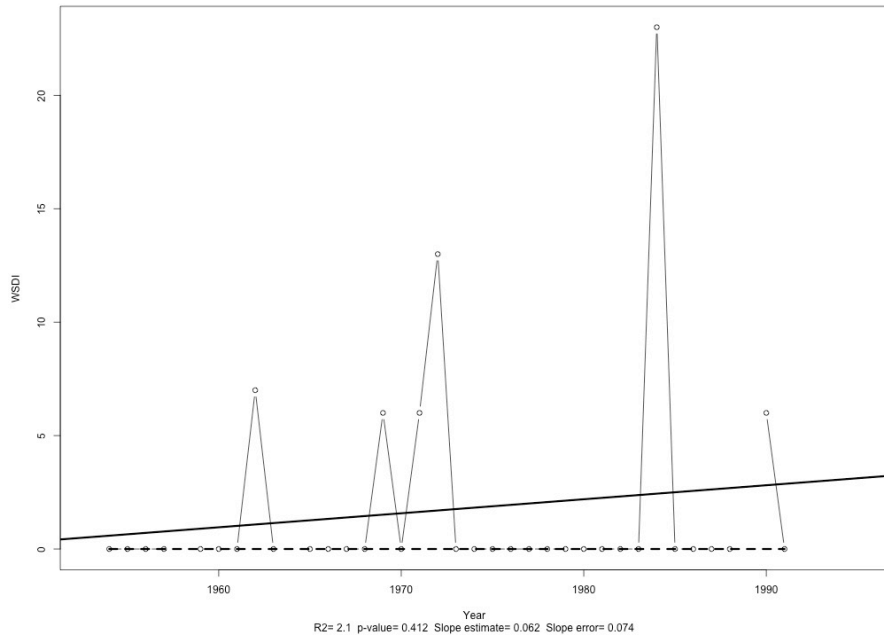
TNX Las Animas 30087 (2CC)



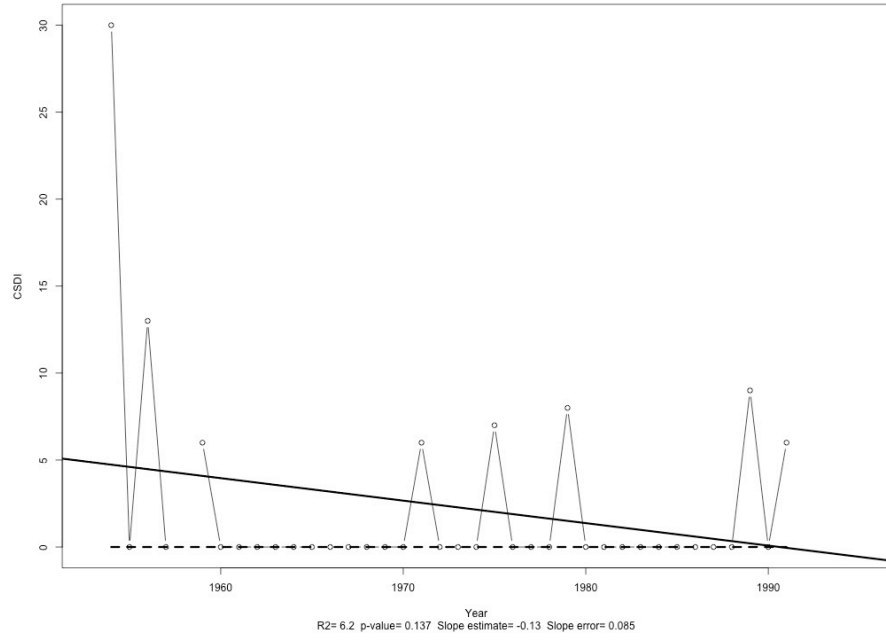
TN90P Las Animas 30087 (2CC)



WSDI Las Animas 30087 (2CC)



CSDI Las Animas 30087 (2CC)



Estación: Xalapa 30228

Los resultados de la evaluación de los Índices de Cambio Climático se encuentran dentro de las carpetas “índices”, “trend” y “plots”. La primera carpeta muestra el cálculo de cada uno de los índices seleccionado por año, ya sea un promedio anual o por matrices mensuales e incorporando un promedio anual. En el caso de la carpeta “trend” muestra un resumen de los resultados de cada uno de los índices sobre su tendencia para el período de análisis:

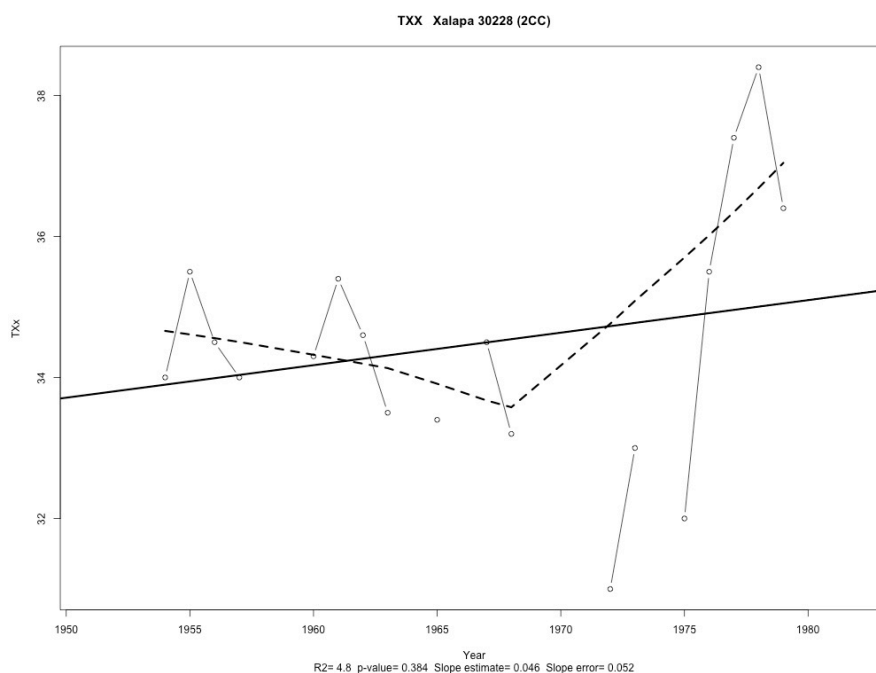
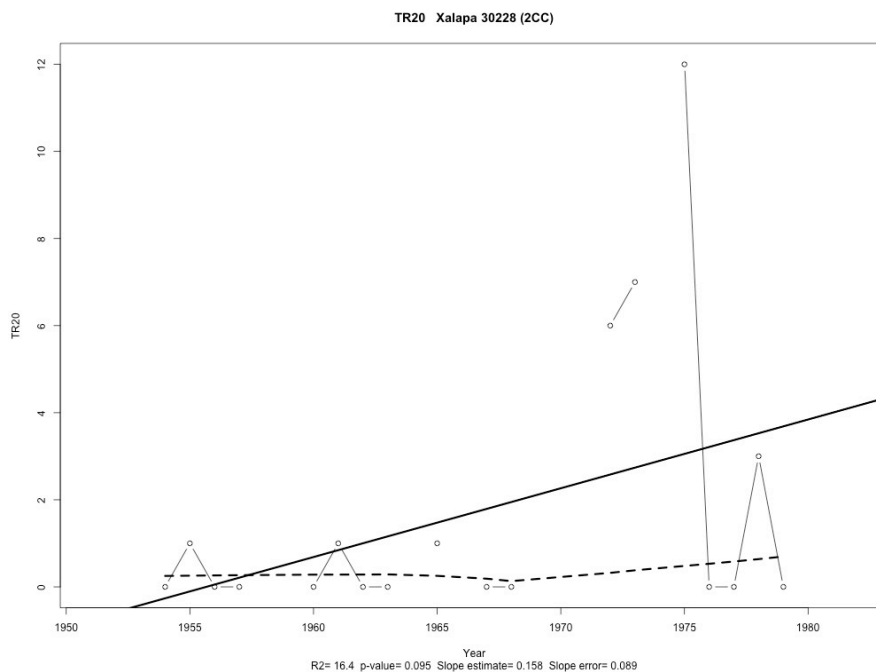
Tabla A. 4. Pendiente de los índices de cambio climático para la estación de Xalapa 30228.

| Indices | SYear | EYear | Slope | STD_of_Slope | P_Value |
|---------|-------|-------|--------|--------------|---------|
| su25 | 1951 | 1982 | 1.872 | 0.804 | 0.033 |
| id0 | 1951 | 1982 | 0 | 0 | NaN |
| tr20 | 1951 | 1982 | 0.158 | 0.089 | 0.095 |
| fd0 | 1951 | 1982 | 0 | 0 | NaN |
| gsl | 1951 | 1982 | -0.001 | 0.014 | 0.963 |
| txx | 1951 | 1982 | 0.046 | 0.052 | 0.384 |
| txn | 1951 | 1982 | 0.002 | 0.052 | 0.974 |
| tnx | 1951 | 1982 | 0.062 | 0.037 | 0.11 |
| tnn | 1951 | 1982 | 0.126 | 0.049 | 0.021 |
| tx10p | 1951 | 1982 | 0.069 | 0.061 | 0.278 |
| tx90p | 1951 | 1982 | 0.719 | 0.17 | 0.001 |
| tn10p | 1951 | 1982 | -0.471 | 0.115 | 0.001 |
| tn90p | 1951 | 1982 | 0.723 | 0.332 | 0.044 |
| wsvi | 1951 | 1982 | 0.509 | 0.203 | 0.023 |
| csdi | 1951 | 1982 | 0.158 | 0.226 | 0.495 |
| dtr | 1951 | 1982 | -0.029 | 0.029 | 0.33 |

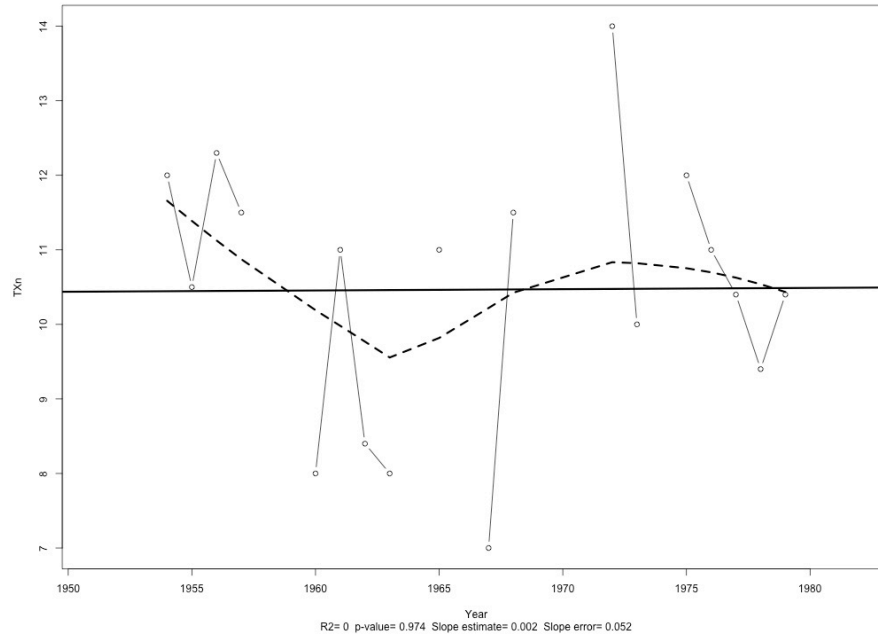
Donde se puede observar que de los 13 índices calculados solamente seis presentan un cambio significativo en la pendiente, los cuales se describen a continuación: Días de verano (SU25) tiene una pendiente positiva la cual se relación con mayor número de días con temperatura máxima por arriba de los 25°C; Temperatura mínima extrema (TNn) presenta un pendiente positiva lo cual se relaciona con un incremento de la temperatura al presentar en el eje Y °C; Frecuencia de días calurosos (Tx90p) tiene un tendencia al incremento por lo tanto la ocurrencia de días cálidos es mayor; Frecuencia de noches frías (Tmin<10p) con una pendiente negativa lo cual se asocia con que las temperaturas mínimas más frías se están calentado; Frecuencia de noches cálidas (Tmin >90p) con una pendiente positiva indica que la temperatura mínima más alta se están calentando y por último Duración de los períodos cálidos con una pendiente positiva lo cual se asocia

a que cada vez es mayor la ocurrencia de 6 días consecutivos con temperaturas por arriba del percentil 90.

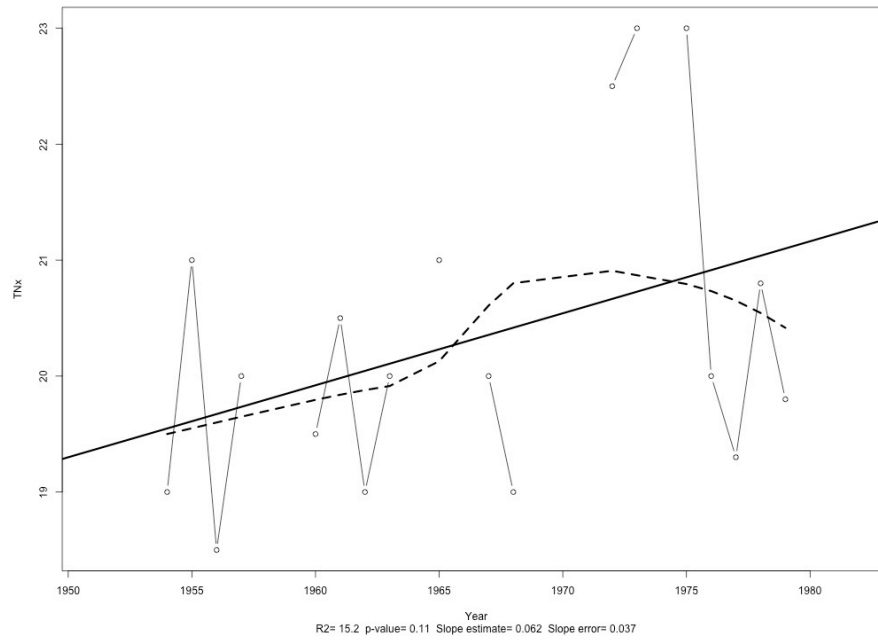
Para el resto de los índices que no presentan un cambio significativo en la pendiente se muestran las gráficas de cada uno (carpeta plots), en el cual se observa el comportamiento de los datos observados y el de la línea punteada que presenta un mejor ajuste, el cambio en la variable se muestra en el apartado “Capítulo 5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN” de la tesis.



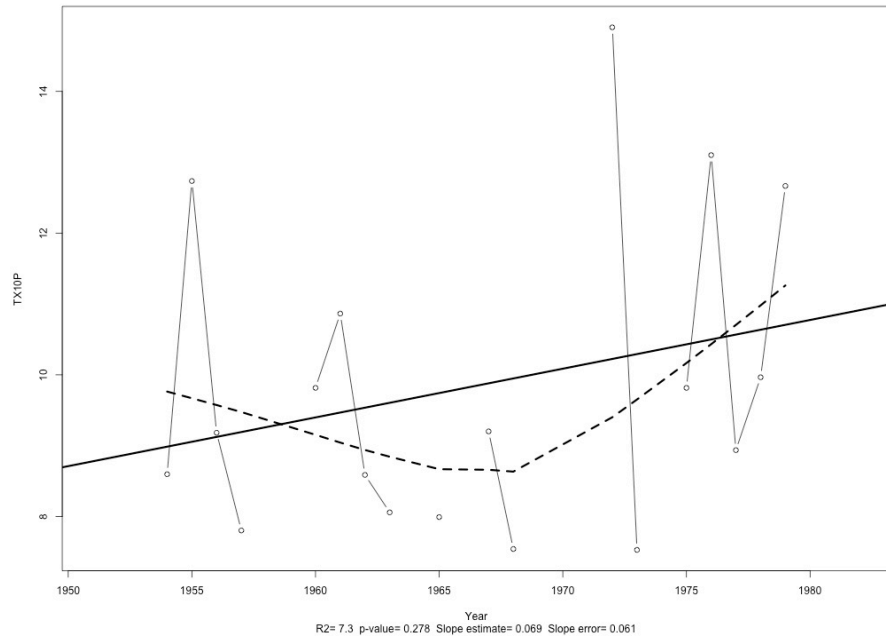
TXN Xalapa 30228 (2CC)



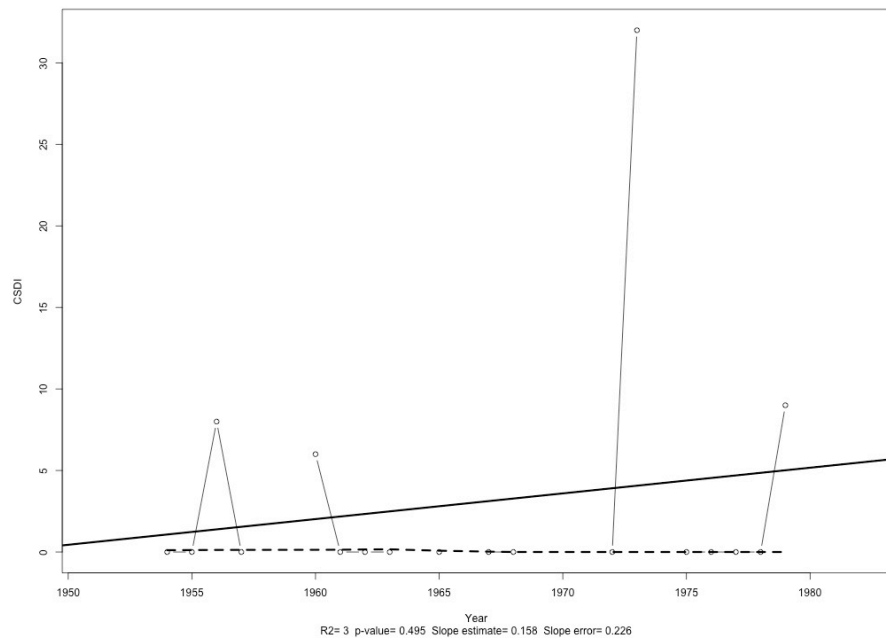
TXN Xalapa 30228 (2CC)



TX10P Xalapa 30228 (2CC)



CSDI Xalapa 30228 (2CC)

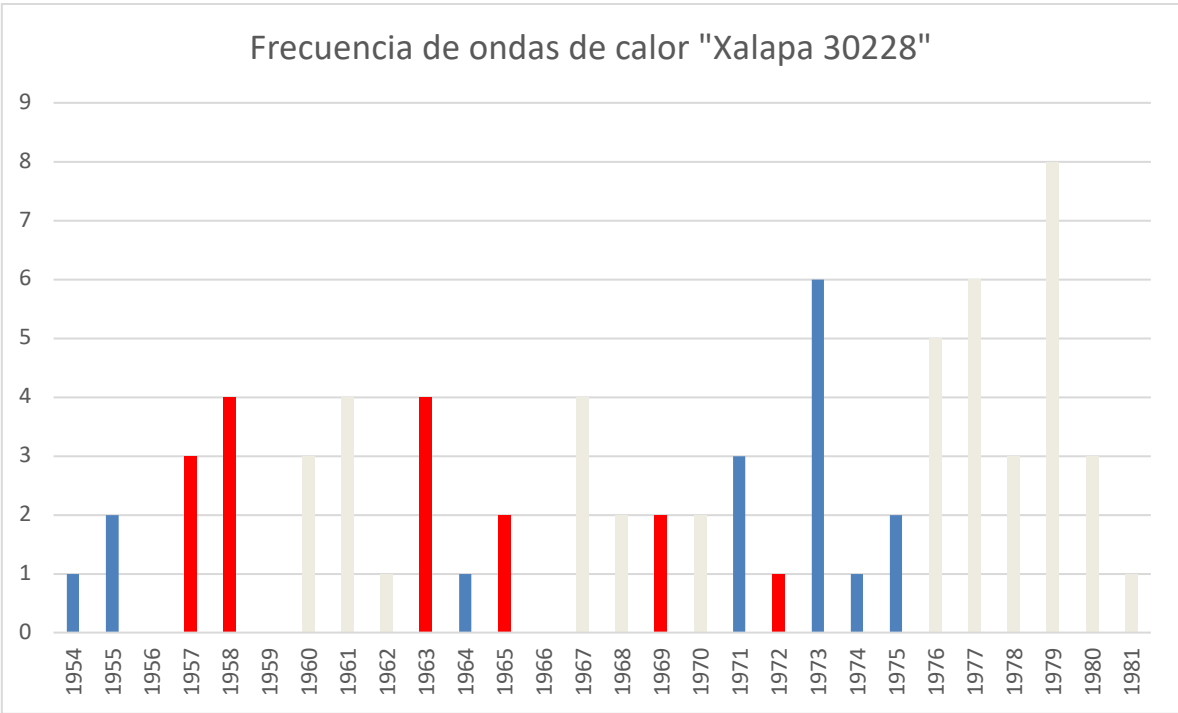


Anexo VI.- Ondas de Calor

Estación: Xalapa 30228

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------|-------------------|------------------|-------------|
| 1954 | 1 | 3 | Mayo |
| 1955 | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 13 | Mayo |
| 1957 | 1 | 6 | Mayo |
| | 1 | 5 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1958 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1960 | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| 1961 | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Septiembre |
| 1962 | 1 | 6 | Mayo |
| 1963 | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Junio |
| 1964 | 1 | 15 | Abril-Mayo |
| 1965 | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1967 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1968 | 1 | 5 | Junio |
| | 1 | 3 | Septiembre |
| 1969 | 1 | 6 | Mayo |
| | 1 | 4 | Junio |
| 1970 | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1971 | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 5 | Mayo |
| 1972 | 1 | 3 | Diciembre |
| 1973 | 1 | 9 | Marzo |
| | 1 | 6 | Marzo-Abril |
| | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Septiembre |
| 1974 | 1 | 6 | Mayo |
| 1975 | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 8 | Mayo |
| 1976 | 1 | 4 | Marzo |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 5 | Mayo-Junio |

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------|-------------------|------------------|--------------|
| 1977 | 1 | 8 | Marzo-Abril |
| | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 6 | Julio-Agosto |
| | 1 | 6 | Agosto |
| | 1 | 4 | Octubre |
| 1978 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 9 | Mayo |
| | 1 | 4 | Septiembre |
| 1979 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Julio |
| 1980 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 9 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| 1981 | 1 | 7 | Mayo |



Estación: Ánimas 30087

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------|-------------------|------------------|------------|
| 1954 | 1 | 3 | Mayo |
| 1955 | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| 1957 | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 5 | Mayo |
| 1958 | 1 | 6 | Junio |
| | 1 | 3 | Abril |
| 1959 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| 1960 | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| 1961 | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Abril |
| 1962 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Septiembre |
| | 1 | 3 | Febrero |
| | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 6 | Abril |
| | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1963 | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 5 | Junio |
| | 1 | 6 | Junio |
| | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 3 | Abril |
| 1964 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 6 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 13 | Mayo |
| 1965 | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 6 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| 1967 | 1 | 4 | Junio |
| | 1 | 6 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| 1968 | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 5 | Junio |
| 1969 | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 7 | Junio |
| 1970 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 6 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------|-------------------|------------------|------------|
| 1971 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 6 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 5 | Junio |
| 1972 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Abril |
| 1973 | 1 | 8 | Junio |
| | 1 | 11 | Abril |
| | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 4 | Junio |
| 1974 | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 10 | Mayo |
| 1975 | 1 | 4 | Junio |
| | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 17 | Abril-Mayo |
| | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1976 | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 5 | Mayo-Junio |
| 1977 | 1 | 4 | Junio |
| | 1 | 5 | Marzo |
| 1978 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 7 | Mayo |
| 1979 | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Abril |
| 1980 | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 13 | Mayo |
| 1982 | 1 | 7 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1983 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 9 | Mayo |
| | 1 | 6 | Mayo |
| | 1 | 6 | Junio |

| Año | Presencia de onda | Días de duración | Mes |
|------------|--------------------------|-------------------------|-------------|
| 1984 | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 5 | Octubre |
| 1985 | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1986 | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1987 | 1 | 5 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 3 | Septiembre |
| 1988 | 1 | 5 | Abril |
| | 1 | 3 | Abril |
| 1989 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 8 | Mayo |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 7 | Junio |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1990 | 1 | 3 | Abril |
| | 1 | 3 | Mayo |
| | 1 | 4 | Mayo |
| | 1 | 5 | Mayo |
| 1991 | 1 | 3 | Marzo |
| | 1 | 4 | Abril |
| | 1 | 14 | Abril-Mayo |
| | 1 | 3 | Junio |
| 1992 | 1 | 5 | Junio |
| | 1 | 5 | Junio-Julio |
| 1993 | 1 | 6 | Junio |

