



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

FACULTAD DE INGENIERÍA

**VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ESTADO
DE CAMPECHE**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO COMO:
INGENIERO CIVIL Y ADMINISTRACIÓN**

**AUTOR
YESENIA AVILA ORTEGA**

San Francisco de Campeche, Campeche, México 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

FACULTAD DE INGENIERÍA

**VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ESTADO
DE CAMPECHE**

TESIS

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO COMO:
INGENIERO CIVIL Y ADMINISTRACIÓN**

AUTOR

YESENIA AVILA ORTEGA

DIRECTORA DE TESIS

DRA. BEATRIZ EDITH VEGA SERRATOS

San Francisco de Campeche, Campeche, México 2023



Facultad de Ingeniería

Oficio No. 1311-FDI-2023
Expediente: 01/ICA/22-23
Asunto: Aprobación de Tesis.

Ciudad Universitaria, a 26 de abril del 2023.

C. YESENIA AVILA ORTEGA

Pasante de la Licenciatura como Ingeniero
Civil y Administración.
Presente.

Por medio del presente me permito informarle que el Trabajo sobre Tesis Profesional denominada **"VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ESTADO DE CAMPECHE"**, que usted nos entregó para su revisión y así poder presentar su Examen Profesional en opción al Título de Licenciado como Ingeniero Civil y Administración, ha sido aprobada según dictamen que rindió la comisión revisora asignada por esta Dirección.

Por tanto, habiendo cumplido con lo establecido en el artículo No. 75 fracción I del Reglamento General de Alumnos, podrá proceder a la impresión de dicha Tesis, teniendo en cuenta que deberá entregar a esta Facultad nueve ejemplares y dos cd.

Terminada la impresión de su Tesis Profesional, deberá dirigirse al H. Consejo Universitario solicitando la autorización correspondiente para poder presentar su Examen Profesional, anexando a dicha solicitud un ejemplar de su Trabajo impreso, cinco se proporcionan al Jurado Examinador y tres a la Biblioteca.

Atentamente



Mtro. Francisco Javier Barrera Lao

Director Académico de la Facultad de Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
SAN FRANCISCO DE
CAMPECHE, CAMP. MEX

c.c.p. MAC Gabriela Patricia Aldana Narváez. - Coordinadora de la Licenciatura de ICA.- Presente.
c.c.p. Expediente del alumno.
c.c.p. Archivo



FJBL/GPAN/csps

Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas y Unidad Habitacional Ecológica Ambiental
Siglo XXIII, Col. Ex -Hacienda Kalá C.P. 24085
San Francisco de Campeche, Campeche, México

T. (981) 811 9800 Ext. 3030100/3030102
www.fi.uacam.mx / fidirecc@uacam.mx



DEDICATORIAS

A mi papá por creer siempre en mí, por apoyarme en cada una de mis decisiones y brindarme todas las herramientas necesarias para poder lograr cada uno de mis objetivos.

A mi mamá por sus oraciones, consejos, paciencia y por ser una de las personas que más me ha motivado a ser la persona que soy hoy en día.

A mis tíos Raúl y Robertha por todo el apoyo y cariño que me han brindado en todos estos años que estuve estudiando la licenciatura y adoptarme como una hija más para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho la oportunidad para agradecer a cada una de las personas que me han apoyado en todo momento para poder realizar la siguiente tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por regalarme la dicha de vivir y las bendiciones que me brinda día a día para poder salir adelante en mis objetivos.

A la Dra. Beatriz Edith Vega Serratos por la confianza y todo el apoyo que me ha brindado en todo momento al ser mi directora de tesis para poder terminar satisfactoriamente.

Al Dr. Gregorio Posada Vanegas por su amabilidad y su confianza dada para poder realizar mis prácticas profesionales en el Área de Procesos Costeros e Hidrológicos del Instituto EPOMEX.

A mi papá por apoyarme siempre en mis decisiones y por todos los consejos brindados para poder ser la persona que soy hoy en día.

A mi mamá por creer siempre en mí y motivarme en todo momento.

A mis tíos Raúl y Robertha por la confianza y por todo el cariño que me han brindado siempre.

A mi familia en general por todas sus motivaciones y cariño que me brindan.

A Juan, Felipe e Ismenia del Área de Procesos Costeros e Hidrológicos del Instituto EPOMEX por apoyarme y hacer que mis días fueran más alegres inclusive en los días que no eran tan buenos.

Y de manera general a todas aquellas personas que siempre han creído en mí y me mandan buenas vibras para poder terminar satisfactoriamente.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	11
LISTA ABREVIATURAS	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
1 ANTECEDENTES	16
2 JUSTIFICACIÓN	22
3 OBJETIVOS.....	23
3.1 Objetivo general.....	23
3.2 Objetivos específicos	23
4 MARCO TEORICO	24
4.1 Precipitación	24
4.2 Tipos de precipitación.....	24
4.2.1 Precipitaciones convectivas.....	24
4.2.2 Precipitaciones orográficas.....	25
4.2.3 Precipitación por convergencia	25
4.3 Medición de la precipitación.....	25
4.4 Factores meteorológicos	26
4.5 Variabilidad climática.....	27
4.5.1 Eventos climáticos	28
4.5.2 Calentamiento global.....	29
4.5.3 Efecto invernadero y GEI en la atmósfera	30
4.5.4 Escenarios de cambio climático.....	31
4.6 Impactos y vulnerabilidad de la sociedad ante el cambio climático.....	32
4.6.1 Ecosistemas y biodiversidad.....	33
4.6.2 Sistemas alimentarios, seguridad alimentaria y silvicultura	33
4.6.3 Sistemas de agua y seguridad de agua	33
4.6.4 Salud y bienestar.....	34

4.6.5	Migración y desplazamiento	34
4.6.6	Vulnerabilidad humana.....	35
4.6.7	Ciudades asentamiento e infraestructura.....	35
4.6.8	Sectores económicos	35
4.7	México y el cambio climático	36
4.8	Análisis de precipitación para incrementar resiliencia ante eventos extremos.....	37
4.8.1	Precipitación media.....	37
4.8.2	Estimación de datos faltantes	39
5	AREA DE ESTUDIO.....	42
5.1	Localización.....	42
5.2	Estructura geológica.....	44
5.3	Tipos de clima	45
5.4	Orografía.....	46
5.5	Suelos.....	46
5.6	Hidrografía	48
6	MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
6.1	Servicio Meteorológico Nacional	50
6.2	Procesamiento de la base de datos	55
6.2.1	Análisis de la calidad de información	55
6.2.2	Criterio de selección de estaciones.....	59
6.3	Análisis estadístico de la precipitación por estación climatológica	60
6.3.1	Precipitación mensual y anual.....	60
6.3.2	Estimación de eventos excedentes a los umbrales.....	62
7	RESULTADOS	64
7.1	Tendencias de precipitación anual.....	66
	Tendencias de precipitación mensual.....	67
7.2	Eventos excedentes a los umbrales de precipitación	68
7.3	Presentación de resultados por medio de ArcGis	77
8	DISCUSIÓN	79
8.1	Precipitación anual.....	79
8.2	Precipitación mensual.....	80
8.3	Eventos excedentes de los umbrales de precipitación	80

9 CONCLUSIONES 85

10 RECOMENDACIONES..... 87

11 BIBLIOGRAFÍA 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pluviómetro y pluviógrafo. Adaptado de Aparicio,1992	26
Figura 2. División política de la República Mexicana.....	42
Figura 3. División política del estado de Campeche	43
Figura 4. Climas del estado de Campeche.....	45
Figura 5. Tipos de suelos en el estado de Campeche	47
Figura 6. Regiones hidrológicas del estado de Campeche.....	49
Figura 7. Proceso de la metodología propuesta	50
Figura 8. Estaciones climatológicas del estado de Campeche.....	51
Figura 9. Procesamiento de base de datos de precipitación	55
Figura 10. Precipitación mensual.....	58
Figura 11. Registro mensual por año de registro en Excel.....	61
Figura 12. Precipitación mensual del registro histórico	62
Figura 13. Estimación de eventos excedente de los umbrales establecidos.....	63
Figura 14. Precipitación mensual histórica de las estaciones del estado de Campeche.	68
Figura 15. Eventos excedentes del umbral de 40 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica	71
Figura 16 Eventos excedentes del umbral de 50 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica.	73
Figura 17. Eventos excedentes del umbral de 60 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica.	76
Figura 18. Estaciones climatológicas analizadas en zona costera y por zona altimétrica.	76
Figura 19. Sistema de Información Geográfico (SIG) construido en ArcGIS 10.8 (ESRI, 2023)	77
Figura 20. Botón "Identify" en ArcGis 10.8 (ESRI,2023).....	78
Figura 21. Gráficas de las estaciones climatológicas en ArcGIS 10.8 (ESRI, 2023).	78
Figura 22. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica baja.	82
Figura 23. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica media.	82
Figura 24. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica alta.	83

Figura 25. Comportamiento de la precipitación en el estado de Campeche..... 84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proyecciones del cambio climático de la precipitación en el estado de Campeche (1981-2010)	20
Tabla 2. Proyecciones del cambio climático de la temperatura media (°C) en el estado de Campeche (1981-2010)	21
Tabla 3. Escenarios RCP's con su forzamiento radiactivo, valor de concentración de CO ² y trayectoria de CMIP5	32
Tabla 4. División geoestadística municipal	43
Tabla 5. Porcentaje de los tipos de climas	45
Tabla 6. Estaciones climatológicas del estado de Campeche	52
Tabla 7. Información de cada una de las estaciones meteorológicas del estado de Campeche	56
Tabla 8. Estaciones meteorológicas seleccionadas	59
Tabla 9. Estaciones climatológicas ubicadas en la zona costera	64
Tabla 10. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca baja	64
Tabla 11. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca media	65
Tabla 12. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca alta	65

LISTA ABREVIATURAS

CLICOM	Base de datos Climatológicos Nacional
CMIP5	Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5
CONAGUA	Servicio Meteorológico Nacional del Agua
ENOS	Niño-Oscilación del Sur
GCMs	Modelos de Circulación General
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático
OMM	Organización Mundial Meteorológica
RCPs	Trayectorias de Concentraciones Representativas

SIG Sistema de Información Geográfica
SMN Sistema Meteorológico Nacional

RESUMEN

El cambio climático cada vez está más presente en nuestras vidas provocando que en diversas partes del mundo se presenten diversos fenómenos meteorológicos, un claro ejemplo de ellos son los eventos extremos de precipitación y sequía. El estado de Campeche, a lo largo de los años, ha sufrido los efectos de las inundaciones asociadas a lluvias extremas, lo que ha provocado daños significativos en zonas vulnerables. Este trabajo presenta el análisis de la precipitación para identificar, a partir de los registros históricos de precipitación acumulada en 24 h CLICOM, publicados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA) para el periodo 1960-2020, cambios a mediano y largo plazo, en los patrones de lluvia. Se consideraron tres umbrales de lluvia acumulada a partir de los cuales se presentan problemas de inundaciones que afectan a la población (40, 50 y 60 mm), se construyeron gráficos para indicar el número de veces que estos umbrales han sido superados, agrupando los resultados en intervalos de 1, 5 y 10 años. Se observó que la cantidad de lluvia anual, en promedio, se mantiene constante; los resultados indican 3 patrones diferentes: en el primero se asocian estaciones, ubicadas sobre la línea de costa o muy cercanas a ella, con tendencia a un aumento en el número de veces que los umbrales de lluvia acumulada son superados; un segundo grupo de estaciones presentan un patrón con una tendencia negativa en la cantidad de veces para el umbral de la precipitación, ubicadas a una altura superior a 250 m.s.n.m y finalmente, el tercer patrón que está asociado a una tendencia neutral, sin variación en la cantidad de eventos que exceden el umbral. Se concluye que en la mayoría de las estaciones hay un aumento en el número de días con lluvias por arriba del umbral, lo que implica que en los días restantes del año tiende a llover menos, esto nos sugiere un cambio en la distribución temporal de la lluvia.

Palabras clave: Precipitación, Variabilidad, Umbral.

ABSTRACT

Climate change is present in our lives, causing various meteorological phenomena than occur in various parts of the world, an example of them are extreme precipitation events and droughts. The state of Campeche, over the years, has suffered the effects of flooding associated with extreme rainfall, which has caused significant damage in vulnerables areas. This work presents a precipitation analysis to identify, from the historical records of accumulated precipitation in 24 h CLICOM, published by the National Meteorological Service (SMN-CONAGUA) for the period 1960-2020, changes to medium and long term, in rainfall patterns. Three accumulated rainfall thresholds were considered (40, 50 and 60 mm), graphs were constructed to indicate the number of times these thresholds have been exceeded, grouping the results into intervals of 1, 5, and 10 years. It was observed that the amount of annual rainfall tends to stay constant; The results indicate 3 different patterns: the first, stations are located on the coastline or very close to it, with a tendency to an increase in the number of times that the accumulated rainfall thresholds are exceeded; a second group of stations present a pattern with a negative trend in the number of times for the precipitation threshold, located at a height higher than 250 m.s.n.m and finally, the third pattern that is associated with a neutral trend, with no variation in the number of events that exceed the threshold. The principal conclusion is that in many stations there is an increase in the number of days with rainfall above the threshold, which implies that in the remaining days of the year it tends to rain less, this suggests a change in the temporal distribution of the rain.

Keywords: Precipitation, Variability, Threshold.

INTRODUCCIÓN

Cada día los impactos del cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos están presentes de manera cotidiana en nuestras vidas, las pérdidas y los daños generalizados en los sistemas humanos y naturales, inducidos por el hombre, han aumentado la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos como son la sequía, precipitación, ciclones, inundaciones e incendios forestales, llegando en algunos casos a superar la resiliencia de algunos sistemas ecológicos y humanos, desafiando la capacidad de adaptación.

Los efectos del cambio climático han ocasionado alteraciones permanentes en el ciclo hidrológico, provocando cambios en la distribución espacial de la precipitación, con aumentos en algunas áreas y disminuciones en otras (Casas et al. 2019). Estos cambios en las precipitaciones conducen a una mayor incidencia de eventos extremos, como inundaciones y sequías que causan efectos directos sobre la economía, la agricultura, la estructura urbana y la salud humana (Nascimento et al. 2020).

En todo el mundo las personas cada vez experimentan con mayor frecuencia más patrones de precipitación desconocidos y episodios de precipitación extrema (IPCC, 2022), aumentando los riesgos en los ambientes y sociedades más expuestas. En el contexto del cambio climático, la identificación de tendencias y variabilidades del indicador permitirá desarrollar mecanismos de adaptación y mitigación para reducir los riesgos y vulnerabilidades de los ambientes más sensibles y las sociedades más expuestas ante eventos de precipitación intensas (Blanco, 2020)

En el estado de Campeche con el paso de los años, la precipitación extrema se ha intensificado a causa del cambio climático de hoy en día, provocando que muchas zonas del estado sean vulnerables a las inundaciones y como consecuencia que las comunidades costeras se vean más afectadas por el incremento del nivel del mar. (Rivera et al. 2019).

En el presente trabajo de investigación se determina la tendencia de la precipitación registrada en cada una de las estaciones climatológicas del estado de Campeche con el objetivo de establecer una línea base en la estimación de las amenazas naturales, para diferentes escenarios del cambio climático, a las que la población y sus bienes, ecosistemas y el desarrollo de las actividades socioeconómicas del estado se encuentran expuestos.

1 ANTECEDENTES

El cambio climático es un tema del que se viene hablando desde hace varios años, en 1951 la Organización Mundial Meteorológica (OMM) comenzó a realizar estudios sobre los efectos del dióxido de carbono y no fue hasta a principios de los años setenta que cobro mayor importancia debido al incremento de estas concentraciones que se estaban registrando (Avalos, 2004). Como consecuencia de este incremento se detectó que éste era uno de los principales impulsores de que la tierra se estuviera calentando, fue así como en base a este problema años más tarde en 1988 se creó la Organización Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Este es un organismo que se encarga de crear reportes acerca de los componentes del cambio climático, suele estar formado por tres diferentes grupos de trabajo. El grupo I es el encargado de evaluar las bases científicas, analizando observaciones del pasado y haciendo simulaciones de los cambios a futuro, el grupo de trabajo II se encarga de evaluar los posibles impactos del clima a futuro en distintas regiones e identificando la vulnerabilidad y posibles medidas de adaptación y, el grupo III presenta las opciones de mitigación necesarias ante un aumento climático próximo.

Actualmente este organismo cuenta con seis informes de evaluación acerca del cambio climático donde se ha informado sobre los impactos que se generarán en un futuro si no se toman medidas para reducir las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), igual ha dejado en claro que una de las causas principales del incremento de los GEI es la actividad humana, generando consecuencias graves hoy en día. Algunas de las consecuencias que se proyectan en un futuro son que las sequías se presentaran de manera más severa en diferentes partes del planeta, que inclusive hoy en día ya hay varios lugares que sufren este problema y otro de los principales que se proyectan, son un incremento en los patrones de precipitación. Este problema de la precipitación se ha venido estudiando desde hace muchísimos años en diferentes partes del mundo ya que estudios han demostrado que desde hace unas décadas atrás se han registrado comportamientos extraños en la precipitación.

En México este problema ha ocasionado consecuencias graves entre ellas las inundaciones que son una de las causantes de grandes pérdidas económicas y humanas. A continuación, se presentan algunos estudios que se han realizado para el análisis de precipitación.

Palacio et al. (2005), realizaron un análisis de precipitación en el estado de Campeche, México para conocer las zonas que son susceptibles a riesgos de inundación en las estaciones del

Observatorio Meteorológico de Campeche, China y Pocyaxum, donde requirió de registros de lluvias a cada hora, 24 horas y mensuales. El análisis consistió en obtener la magnitud de la precipitación para diferentes periodos de retorno con diferentes duraciones por medio de la función de Doble Gumbel, donde se indicó que en la zona se presentan dos tipos de precipitaciones que pueden llegar a ocasionar inundaciones, que son las normales y las extraordinarias. En sus resultados obtuvo que la estación del observatorio en San Francisco de Campeche se apreciaban valores máximos diarios en los años de 1995 y 2002 y estaban muy cerca de las precipitaciones de periodos de retorno de 50 y 100 años, también se obtuvieron resultados de que en un día se presentaban valores superiores a los 150 mm y en hora hasta 80 mm lo que podría generar inundaciones en la ciudad. Por otro lado, en las estaciones de China y Pocyaxum se obtuvieron valores extrapolados para los diferentes periodos de retornos muy grandes.

Mardero et al (2012), realizó un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en el sur de la península de Yucatán a través de anomalías y tendencias de la precipitación anual y estacional. Utilizó tendencias de regresión lineal anuales y estacionales para analizar la variabilidad en el periodo de 1953-2007, sus resultados mostraron una considerable variación espacial y temporal, con valores mayores de precipitación y anomalías en la costas que va disminuyendo gradualmente hacia el Este-Oeste de la zona de estudio, se encontró una disminución de la precipitación anual y de la estación húmeda y en estaciones como la de Zoh Laguna Campeche mostraron un aumento en los años de sequía.

Posada et al. (2013) realizaron una investigación dedicada a los peligros naturales del estado de Campeche, donde crearon un atlas con los diagnósticos de los riesgos de los eventos que pueden tener consecuencias desastrosas en el estado. Para ello calcularon niveles anuales de sequía hidrológica y temperaturas máximas y mínimas para el estado. Para cuantificar los niveles de sequía utilizaron el Índice de Precipitación Estandarizado ya que permite evaluar con respecto a las condiciones normales de precipitación, el déficit o exceso de lluvia para una región durante un periodo de tiempo específico. Los datos de precipitación se obtuvieron a partir de la base de datos CLICOM para la precipitación diaria registrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). En sus resultados se presentó que el año de 1994 fue un indicativo de sequía para los municipios de Champotón y Calakmul y por el contrario en 1995 debido al paso de los huracanes Opal y Roxanne se obtuvieron valores positivos de

precipitación en casi toda la entidad y nuevamente en 2007 los valores volvieron a ser negativos.

González y Muñoz (2013) evaluaron los cambios de precipitación anual, estacional y mensual en la ciudad de Valdivia, Chile en el periodo de 1901-2005 donde se construyeron series de precipitación acumulada anual y estacional, en donde también fueron evaluados forzantes climáticos a gran escala sobre los patrones de precipitación. En sus resultados se obtuvieron registros decrecientes de precipitación anual, mensual y estacional.

Cortez et al. (2016), realizaron un análisis de la variabilidad espacio temporal de la precipitación a partir de datos promedios y anuales diarios para el periodo de 1971-2000 de las estaciones meteorológicas en el estado Guárico de Venezuela, donde el estudio permitió caracterizar su variabilidad y distribución espacial. El comportamiento fue un periodo lluvioso y uno seco bien definido.

Álvarez y Escalante (2016) estimaron eventos de lluvia acumulada anual en el noroeste de la república mexicana asociados a diferentes periodos de retorno y escenarios futuros, utilizando registros diarios de las estaciones climatológicas del área de estudio ubicadas en la base de datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional del Agua (CONAGUA), donde se consideraron estaciones con al menos el 90% de registros completos en el periodo de 1950 a 2013. Mediante la prueba de Grubbs y Beck (1972) se identificaron valores de lluvia anual que se desviaban de manera considerable de la distribución de los datos que fueron comparados con los registros de estaciones aledañas para corroborar su magnitud. Para los datos faltantes utilizaron el método de interpolación de la distancia inversa ponderada, en el cual se consideraron dos estaciones de apoyo y un exponente de distancia igual a dos. En sus resultados los valores más bajos de precipitación se encontraron en la península de Baja California con menos de 200 mm de precipitación al año en comparación de Sonora, Sinaloa, Chihuahua y Durango que tienen una precipitación mayor a los 1000 mm.

Hernández et al. (2016), determinaron si los datos meteorológicos del periodo de 1961-2010 registraban anomalías en la temperatura máxima, mínima, media y de precipitación a nivel regional en el estado de Tabasco, para eso se dieron a la tarea de generar escenarios de cambio climático a nivel regional para diferentes escenarios y horizontes de tiempo, generando mapas de anomalías de la temperatura y precipitación, por lo cual se utilizaron 23 modelos ensamblados de Circulación General de la Atmósfera y océano acoplados que toman en

consideración los factores forzantes que determinan los posibles escenarios futuros. Sus resultados a nivel regional tuvieron decrementos significativos en la región Sierra e incrementos en la región Centro; a nivel estatal, hubo un incremento en la precipitación total promedio anual de 0.5% con fluctuaciones en diferentes regiones.

López et al. (2018), realizaron un análisis de los eventos de lluvias registrados en Baja California, México con la finalidad de determinar patrones y características en las series de precipitación a partir de valores espaciales y temporales del exponente de Hurts, así como su relación con la temperatura y precipitación media anual, altitud y distribución climatológica. Utilizaron series de precipitación de 92 estaciones climatológicas con longitudes de registros de más de 30 años.

Navarro et al. (2019), analizaron la posible influencia del fenómeno ENOS en la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia a partir de registros en las estaciones en el periodo de 1970-2015. Para ello emplearon tres bases de datos para el análisis de la variabilidad espacio-temporal del régimen de precipitación en Colombia durante los eventos de El Niño, El Niño Modoki, La Niña y la Niña Modoki.

Casas et al (2019), mencionan que incluso un pequeño desplazamiento en el valor medio de la precipitación podría acarrear cambios importantes en la distribución de valores extremos y posibles variaciones en la frecuencia de episodios extremos de precipitación. En su trabajo que realizó, analizaron series de precipitación diaria que fueron simuladas para el siglo XXI para las ciudades de Madrid y Barcelona. Esas series futuras fueron obtenidas a partir de Modelos de Circulación General, para diferentes escenarios de cambio climático.

Rivera et al. (2020), mencionan que en el estado de Campeche los patrones de lluvia se han comportado diferente de un año a otro y los episodios repentinos de precipitación extrema han provocado inundaciones en la ciudad en diversas ocasiones, amenazando a la población y la infraestructura de la ciudad, en su trabajo describió un marco conceptual y enfoque metodológico utilizado por el gobierno municipal de Campeche para la implementación de un plan de manejo costero integrado para que conduzca a una mayor resiliencia y a mejorar la calidad de agua ante la lluvia extrema en la zona costera. En este trabajo se realizó un análisis histórico de las inundaciones de la ciudad de Campeche, la caracterización de las cuencas urbanas de la ciudad y un análisis de la precipitación histórica registrada en la estación

climatológica Campeche (Obs), dando como uno de los resultados que si bien la precipitación promedio anual se mantiene constante, la intensidad de los episodios se ha modificado.

Posteriormente, Rivera et al. (2023) realizaron un análisis de las estaciones climatológicas de México que se encuentran ubicadas en la costa, con un registro mayor a 40 años, identificando los eventos de lluvia acumulada en 24 h con una magnitud igual o mayor a 40 mm y considerando intervalos de análisis de 1, 5 y 10 años. En los resultados se observaron tres comportamientos sobresalientes, en el primero la tendencia indica un aumento en los episodios que exceden el umbral establecido; en el segundo patrón, el comportamiento indica una disminución o tendencia negativa en los episodios de la precipitación y por último existe un conjunto de estaciones en el que el comportamiento de la precipitación se mantiene constante.

El INECC (2022) evaluó escenarios de cambio climático para todo el territorio mexicano, a una escala estatal. Para el caso del estado de Campeche realizó proyecciones, de la precipitación y temperatura, a corto, mediano y largo plazo considerando un periodo de registro de dichas variables que va de 1981 a 2010. Las proyecciones se realizaron en tres periodos de tiempo y cuatro escenarios de cambio climático donde muestran una representación de cómo podrían ser las condiciones a futuro (Tabla 1). Las proyecciones de la precipitación muestran en el escenario más favorable (SSP1 RCP2.6) una variación ligera en la precipitación en todos los periodos y en el escenario más pesimista (SSP5 RCP8.5) se muestra una disminución gradual de la precipitación hasta llegar a un 20.7% por debajo con respecto al periodo de 1981-2010.

Tabla 1. Proyecciones del cambio climático de la precipitación en el estado de Campeche (1981-2010)

Periodo	SSP1 RCP2.6	SSP2 RCP4.5	SSP3 RCP7.0	SSP5 RCP8.5
2021-2040	0.5%	0.3%	-1.2%	-1.0%
2041-2060	-0.3%	-1.1%	-5.6%	-6.0%
2081-2100	-0.3%	-3.2%	-15.1%	-20.7

Fuente: Adaptado de INECC 2022

Para la proyección de las temperaturas (Tabla 2) muestran en todos los escenarios de cambio climático un incremento gradual de la temperatura a 1.3 en el escenario más favorable y de 1.1 a 4.4°C en el escenario más pesimista. El Informe especial del IPCC (2018) menciona que si la temperatura aumenta de 1.5°C a 2°C provocaría daños irreversibles en el planeta.

Tabla 2. Proyecciones del cambio climático de la temperatura media (°C) en el estado de Campeche (1981-2010)

Periodo	SSP1 RCP2.6	SSP2 RCP4.5	SSP3 RCP7.0	SSP5 RCP8.5
2021-2040	1.0	1.0	1.0	1.1
2041-2060	1.3	1.5	1.7	2.0
2081-2100	1.3	2.3	3.5	4.4

Fuente: Adaptado de INECC 2022

2 JUSTIFICACIÓN

Cada día los impactos del cambio climático han aumentado la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos como son la sequía, precipitación, ciclones, inundaciones e incendios forestales, llegando en algunos casos a superar la resiliencia de algunos sistemas ecológicos y humanos, desafiando la capacidad de adaptación (IPCC, 2022). Dentro de las consecuencias más notables, del efecto del cambio climático, se encuentra la alteración del ciclo hidrológico, provocando una alteración en la distribución temporal y espacial de la precipitación, así como en su magnitud.

México por su situación geográfica y condición socioeconómica es uno de los países que es especialmente vulnerable a este fenómeno, por lo tanto, el estado de Campeche no queda exento de sufrir el impacto del aumento de las altas temperaturas que afectan el nivel del mar y el comportamiento en la precipitación en los últimos años. Para el estado se han realizado estudios generales del comportamiento de la precipitación, en Rivera et al. (2020) se analizó la precipitación de la estación climatológica Campeche (Obs) para la implementación del plan de manejo de las inundaciones en la ciudad de San Francisco de Campeche; posteriormente Rivera et al. (2022) realizó un análisis del comportamiento de la lluvia a nivel de todo el país que consideró los registros de todas las estaciones climatológicas costeras considerando sólo 3 estaciones para el estado de Campeche. Por otro lado, el INECC en 2022 llevó a cabo proyecciones de cambio climático a corto, mediano y largo plazo en toda la República Mexicana considerando un periodo de registro de precipitación y temperatura de 1991 a 2010.

Por lo anterior, se justifica en este trabajo llevar a cabo un análisis actualizado del comportamiento de la precipitación en el estado de Campeche, es decir, considerando los registros de las estaciones climatológicas al 2022. Lo anterior permite tener resultados en las predicciones y análisis de riesgo más apegados a la realidad.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de las precipitaciones en el estado de Campeche de manera estacional y en diferentes intervalos de tiempo para identificar la tendencia a mediano y largo plazo.

3.2 Objetivos específicos

1. Generar un estado de arte relacionado con el análisis de las precipitaciones del estado de Campeche y su relación con el cambio climático
2. Revisar y analizar la información de los registros de precipitación del estado de Campeche en el Sistema meteorológico Nacional (SMN).
3. Generar de una base de datos de cada una de las estaciones del Estado de Campeche.
4. Determinar el comportamiento y tendencia de la precipitación para diferentes intervalos de observación.
5. Generar un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita la consulta de los resultados obtenidos.

4 MARCO TEORICO

4.1 Precipitación

La precipitación forma parte de una de las fases del ciclo hidrológico y se conoce como la caída de agua proveniente de la atmosfera hacia la superficie terrestre. Chereque (1989), la define como toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie en forma de lluvia, lloviznas, granizadas y nevadas. Para que se produzca es necesario que las pequeñas gotas de las nubes se unan para formar gotas más grandes que venzan la resistencia del aire y caigan (Ayllón, 2003).

Aparicio (1992) explica que para que se formen las nubes, el agua que se evapora de la superficie terrestre debe elevarse hasta que la presión y la temperatura sean necesarias para que exista una condensación. En otras palabras, para que se forme la precipitación se necesita que una masa de aire ascienda hasta a la atmósfera y sea sujeta a una presión de manera que esta se vaya expandiendo y pueda disminuir su temperatura lo suficiente como para quedar por debajo de un punto de rocío para que se pueda producir.

En resumen, se puede decir que la precipitación es toda forma de agua en estado líquido o sólido que cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo, neblina o nieve y para que esta pueda formarse se necesitan de ciertas condiciones mínimas como el incremento de las gotas en las nubes y el incremento de temperatura cercana a un punto de rocío.

4.2 Tipos de precipitación

La precipitación se clasifica en tres tipos dependiendo de las condiciones del levantamiento del aire, estas pueden ser del tipo convectivas, orográficas y de convergencia.

4.2.1 Precipitaciones convectivas

Las precipitaciones convectivas son aquellas que suelen ser puntuales y su intensidad varía, es decir, que pueden ser simples lloviznas o aguaceros. Este tipo de precipitación es causada cuando una masa de aire que se dirige a la superficie de terreno aumenta su temperatura haciendo que su densidad disminuya, haciendo que la masa de aire trate de ascender y ser remplazada por otra que sea más densa.

4.2.2 Precipitaciones orográficas

Este tipo de precipitación se presenta cuando una masa de aire cálido se dirige hacia una cadena montañosa.

4.2.3 Precipitación por convergencia

La mayoría de los autores agrupan a la precipitación en convectivas, orográficas y ciclónicas. Pero hay que hacer énfasis en que las precipitaciones ciclónicas forman parte de la precipitación por convergencia.

Este tipo de precipitación se presenta cuando dos masas de aire que viajan en una dirección contraria, con un mismo nivel y aproximadamente la misma temperatura, chocan provocando que ambas se eleven. Pueden ser de tipo ciclónica y de frentes.

Los ciclones se producen cuando una masa de aire circular con baja presión, gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, suele tener un ojo en su centro y su presión es baja comparada con la masa de aire. (Monsalve, 1999).

Por otro lado, un frente se forma cuando una masa de aire en movimiento se encuentra con otra masa de aire con diferente temperatura, a partir de aquí se pueden formar los frentes fríos en dado caso que una masa de aire con una temperatura fría se encuentre con una con temperatura superior y un frente cálido en caso contrario.

4.3 Medición de la precipitación

Llevar un control de registro de la cantidad de lluvia que cae un lugar determinado es de fundamental importancia, porque en base a esos registros se pueden realizar análisis para poder conocer la cantidad de lluvia acumulada que cae al año, de manera mensual o estacional, o simplemente la cantidad de lluvia que cae durante un evento específico. De igual manera se sabe que la cantidad de lluvia que cae en un lugar determinado no será la misma a la que cae en otro ya que dependerá de las condiciones hidrográficas del lugar (Aparicio, 1992).

Son dos los tipos de instrumentos que se utilizan para medir la precipitación, estos son los pluviómetros y los pluviógrafos.

Los pluviómetros suelen estar formados por un recipiente cilíndrico al que se descarga un embudo que capta el agua de lluvia. El área de captación del embudo debe de ser diez veces

mayor al área del recipiente de manera que por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. Por otro lado, los pluviógrafos a diferencia de los pluviómetros registran de manera continua la cantidad de precipitación que cae. Estos suelen estar formados por un tambor que gira a velocidad constante en el cual se coloca un papel graduado. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de la precipitación (Figura 1).

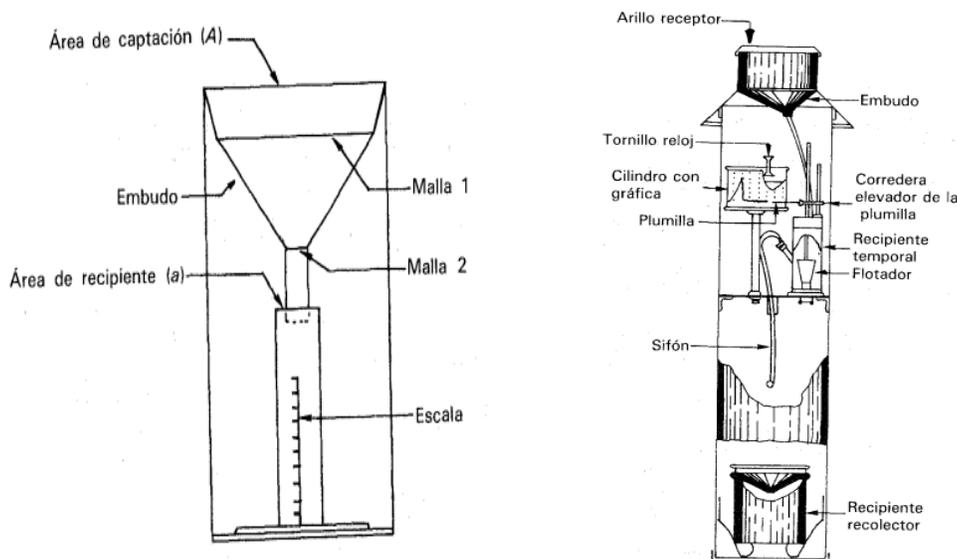


Figura 1. Pluviómetro y pluviógrafo. Adaptado de Aparicio, 1992

4.4 Factores meteorológicos

Las características hidrológicas de una región están formadas por su estructura geográfica, geológica y por su clima. Los factores climatológicos suelen afectar las condiciones hidrográficas de una región (Linsley, 1977), estos factores pueden ser presentados por medio de la cantidad de precipitación que cae en un lugar, por los efectos del viento, la temperatura y la evapotranspiración.

Conocer los factores meteorológicos que se forman en aquella capa gaseosa que forma parte de nuestro planeta tierra es importante ya que en base a su estudio se pueden conocer las condiciones adecuadas de sobrevivencia para no alterar sus mecanismos de equilibrio ni su composición, ya que hacerlo traería grandes consecuencias a nuestro planeta (Ayllón, 2003).

Enfocándonos al tema de la precipitación, Breña y Jacobo (2006), clasifican a los sistemas meteorológicos en tres escalas:

1. Sistemas meteorológicos de pequeña escala. Los fenómenos más comunes en este sistema son aquellos formados por las nubes que se asocian a las tormentas, lloviznas, granizos y nevadas.
2. Sistemas meteorológicos de gran escala en latitudes medias. Aquí las altitudes medias son aquellas que se encuentran acotadas por los trópicos y los círculos polares ártico y antártico. En esta zona es común que los frentes se forman debido a las masas de aire de diferente condición, también es común que formen las depresiones tropicales conocidas como ciclones extra tropicales.
3. Sistemas meteorológicos de gran escala en latitudes bajas. En este sistema se presenta una zona denominada de convergencia intertropical que rodea a la tierra y abarca una franja que se mueve estacionalmente de un hemisferio a otro alrededor del ecuador. En esta zona la precipitación suele ser intensa la mayor parte del año. En otros puntos del Océano Pacífico y Atlántico de 5° a 20° de latitud se forman los ciclones, las tormentas y las depresiones tropicales. Aquí en este mismo sistema se forma una anomalía climática producto de otra, este fenómeno es conocido como El Niño y la Oscilación del Sur, (ENOS, por sus siglas en inglés).

4.5 Variabilidad climática

El tiempo y el clima son dos estados de la atmósfera que resulta de la combinación de diversos procesos físicos y depende de ciertos factores como: la actividad solar, los cambios en la radiación de la tierra, la circulación de aire, las condiciones de salinidad y temperatura del mar; el uso de suelo y vegetación; la interacción de los seres vivos con los ecosistemas y los cambios en el ciclo del agua. Se entiende por variabilidad climática a todos aquellos cambios que existen en los componentes climatológicos de una región, como la temperatura y la precipitación. Magaña (2004), menciona que cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y el océano, o por forzamientos externos como algún cambio en la intensidad de la radiación solar o cambios en las características del planeta. En su más reciente informe el IPCC (2022), reafirma que uno de los principales causantes del cambio climático y de que la superficie del planeta se esté calentando cada día más a causa de los gases de efecto invernadero es debido a las actividades antropogénicas, es decir, las producidas por los humanos, ocasionando que en diversas partes

del planeta se vayan presentando eventos extremos trayendo un sinnúmero de consecuencias. Desde el quinto informe el IPCC (2014), se ha dejado en claro que desde los últimos decenios los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos, cada vez son más las regiones donde la variación de la precipitación y la temperatura alteran a los sistemas hidrológicos afectando a los recursos hídricos en términos de cantidad y calidad.

El clima es uno de los elementos que determina el éxito o el fracaso de muchas actividades económicas ya que fenómenos meteorológicos como las sequías, lluvias extremas, granizadas, heladas, ondas de calor y otros tipos de condiciones extremas pueden provocar impactos como la disminución del agua disponible en el planeta, inundaciones, incendios y problemas agrícolas. (Landa et al. 2010).

Estudiar la variabilidad climática de una región es de vital importancia ya que de ahí se puede planificar el manejo de los recursos naturales de un país (Méndez et al. 2007) y/o predecir impactos socioeconómicos.

4.5.1 Eventos climáticos

El cambio climático es por definición un problema global que afecta en diversas intensidades y maneras a cada rincón del planeta, provocando daños muchas veces irreversibles en la biodiversidad y en las personas. (Susana y Roth, 2017).

Es importante que hoy en día conozcamos cuales son aquellos eventos extremos provocados por la variabilidad climática, el conocer de qué manera impactan en la actualidad y de qué manera impactaran en un futuro nos permitirá desarrollar mecanismos de adaptación y mitigación para reducir riesgos.

Algunos fenómenos producto de la variabilidad climatológica según Landa et. al 2010, son los siguientes:

- **Ciclones y huracanes.** Los ciclones o huracanes son fenómenos naturales que suelen provocar grandes desastres y pérdidas materiales cuando estos se presentan. Esos daños se producen a causa de los vientos fuertes, las lluvias intensas, tornados y las mareas de tormentas que estos fenómenos suelen provocar.
- **Lluvias intensas.** Las lluvias intensas son un problema meteorológico que muchas veces suele traer consecuencias como inundaciones a causa de desbordamientos de ríos.

- **Sequías.** Las sequías son un factor meteorológico de gran importancia debido a la manera de como impacta a la sociedad, suele definirse como la disminución o ausencia de la precipitación y cuando este problema se presenta suele provocar un desbalance hídrico en el ciclo del agua, debido a la falta de disponibilidad de este recurso. Suele clasificarse en sequía meteorológica, agrícola e hidrológica.

La sequía meteorológica es aquella que hace énfasis únicamente a la lluvia, ocurre cuando la disminución de las lluvias se encuentra por debajo de lo normal. Por otro lado, cuando se habla de sequía agrícola nos estamos refiriendo a cuando no existe humedad suficiente en los suelos y no satisface las necesidades hídricas de un cultivo. Finalmente, la sequía hidrológica ocurre cuando las fuentes de agua que se encuentran en la superficie y en el subsuelo comienzan a disminuir por debajo de lo normal, provocando que el nivel de los ríos y demás embalses comience a disminuir.

- **Fenómeno “El Niño”.** Este fenómeno es también conocido como “Oscilación del Sur” (ENSO, por sus siglas en inglés) y es otra consecuencia de la variabilidad climática, es el resultado de la interacción del océano con la atmósfera que causa anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical central y oriental. A su fase cálida se le conoce como El Niño y a su fase fría como la Niña. Este fenómeno es responsable de modificar el patrón normal de las condiciones meteorológicas provocando que en varias partes del mundo se presenten fenómenos extremos como lluvias intensas y sequías, entre otros. En nuestro país suele tener grandes repercusiones en el clima, estudios demostraron que los regímenes de lluvia se ven afectados en verano e invierno, provocando que, en eventos intensos de El Niño, los déficits de lluvia durante verano se puedan traducir como sequías y por el contrario en los eventos de La Niña, las lluvias parecen estar encima de lo normal, sin embargo, durante el invierno de El Niño las lluvias se intensifican y en el caso de la Niña tienden a disminuir. (Escobar et al. 2001)

4.5.2 Calentamiento global

Ruiz et al. (2020) define al cambio climático como aquellos cambios significativos a largo plazo en el clima global debido al aumento del promedio de la temperatura atmosférica, mientras que un promedio de la temperatura en la troposfera se conoce como calentamiento global.

El calentamiento global es un tema que se viene estudiando desde hace varias décadas atrás y aunque antes era solo una teoría, hoy en día el Panel Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático (IPCC, 2022) afirman que esto ya es un problema que se está viviendo en el presente y los escenarios previstos en cada grado adicional de aumento de temperatura muestran impactos cada vez más graves en el clima al punto que podrían amenazar seriamente nuestra existencia sobre el planeta. El IPCC en su quinto informe, explicó que más de la mitad del aumento observado de la temperatura media global en superficie ha sido causado por la combinación del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero y otros forzamientos antropógenos, también se estimó que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1.0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8°C a 1.2°C y es probable que llegue a 1.5°C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (Informe especial IPCC, 2018). Hoy en día es más evidente que el calentamiento global se está haciendo presente en nuestras vidas, desde los aumentos extremos de las temperaturas que han ocasionado que se presenten olas de calor intensas en diversas partes del mundo hasta los eventos extremos de precipitación que se han presentado trayendo como consecuencias inundaciones, aumento del nivel mar, desbordamiento de ríos, entre otros.

4.5.3 Efecto invernadero y GEI en la atmósfera

El efecto invernadero se conoce como la absorción que realiza la atmósfera de la radiación térmica emitida, por el sol, la tierra y los océanos, la cual es irradiada nuevamente hacia la tierra incrementando la temperatura de la superficie (De Armas et al. 2017). Este es un fenómeno natural que permite la vida en el planeta y es causado por los gases que forman parte de la atmósfera (Landa et al. 2010), estos gases son conocidos como gases de efecto invernadero (GEI). Este tipo de gases suele estar compuesto por el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O) y Ozono (O_3), sin embargo, se han encontrado otro tipo de gases antropógenos como los halocarburos u otras sustancias que contienen cloro y bromo que han provocado que la variación de las concentraciones de los gases de efecto invernadero hayan alterado el equilibrio energético del sistema climático, provocando que la tierra se calentara más de lo normal, haciendo que estos cambios se fueran manifestando en los cambios drásticos de las precipitaciones, en la ocurrencia de sequías prolongadas y severas, en la escasez de agua dulce, el incremento de enfermedades infecciones y mortalidad relacionadas

con el clima, el aumento del nivel mar y los cambios en el ciclo del agua. Varios estudios han demostrado que estos gases han aumentado significativamente desde la era preindustrial por efectos de la actividad humana, y que la mayor parte del aumento observado de la temperatura desde mediados del siglo XX se deben al aumento observado de la concentración de gases de efecto invernadero antropógenos y si esos gases siguen siendo presentes con la misma intensidad o mayor como hasta ahora, se cree que para mediados o finales de siglo XXI, la temperatura del planeta se haya calentado todavía más, generando consecuencias aún mayores a las que hoy en día nos afectan a causa de los eventos extremos del cambio climático.

4.5.4 Escenarios de cambio climático

Es más que evidente que los efectos del cambio climático se han ido presentado en nuestro entorno con el paso del tiempo, desde que este problema se ha hecho presente se han buscado alternativas para poder disminuir el problema o buscar estrategias para poder adaptarnos. La comunidad científica se ha encargado de realizar escenarios para poder predecir con aproximación como serán los impactos del cambio climático en un futuro. Estos escenarios son contruidos a base de modelos numéricos que tienen por objetivo representar los procesos del sistema climático. Son varios los modelos de cambio climático que existen los cuales se diferencian entre sí por su resolución, su tiempo de predicción y escala. Algunos de los más usados son los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) que son diseñados para representar los procesos interrelacionados del suelo, los océanos y la atmósfera, suelen brindar información sobre las temperaturas, precipitaciones y otras variables climáticas. Otro tipo de modelos son los escenarios de emisiones que tienen por objetivo describir las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y otros tipos de gases antropogénicos en la atmósfera. Estos modelos de emisiones sirven para poder evaluar como evolucionaran las emisiones en un futuro y poder ejecutar modelos climáticos sobre múltiples posibilidades de simulaciones del clima futuro. El IPCC en su quinto informe desarrolló escenarios que llamó como Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por sus siglas en ingles), las cuales son conjuntos consistentes de proyecciones solo de las componentes de forzamiento radiactivo que sirven como insumos para la modelación climática y son nombrados de acuerdo con el nivel de forzamiento radiactivo hasta el año 2100 (Tabla 3), incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5, RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de gases de efecto invernadero (RCP8.5), también

incluyen la trayectoria del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) que se utilizan para detectar efectos antropogénicos en registros de cambios climáticos antropogénicos y proyectar cambios climáticos futuros. Los escenarios sin esfuerzos adicionales para limitar a las emisiones dan lugar a trayectorias que se sitúan entre los RCP6.0 y RCP8.5, el RCP2.6 representa un escenario que tiene por objeto que sea probable mantener el calentamiento global a menos de 2°C por encima de las temperaturas industriales (IPCC, 2014). En todos estos escenarios evaluados, las proyecciones señalan que la temperatura en superficie continuara aumentando a lo largo del siglo XXI y que es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en muchas regiones.

Tabla 3. Escenarios RCP's con su forzamiento radiactivo, valor de concentración de CO₂ y trayectoria de CMIP5

Escenario	Forzamiento Radiactivo (W/m ²)	CO ₂ eq atmosférico (ppm)	Trayectoria
RCP8.5	8.5	>1370	Un aumento después del año 2100
RCP6.0	6.0	850	Estabilización después del año 2100
RCP4.5	4.5	650	Estabilización después del año 2100
RCP2.6	2.6	490	Hay un pico antes del año 2100

Fuente: Tomado y modificado de INECC (2022) y Van Vuuren et al. (2011)

4.6 Impactos y vulnerabilidad de la sociedad ante el cambio climático

La vulnerabilidad es definida como el grado en que los sistemas pueden verse afectados desfavorablemente por el cambio climático, es decir, en como una comunidad o grupos de personas expuestas a un peligro tiene la probabilidad de sufrir daños materiales o humanos según su grado de fragilidad en la que se encuentren. Es más que evidente que los impactos, las

pérdidas y los daños graves en los sistemas naturales y humanos están siendo provocados por los cambios climáticos inducidos por el hombre, provocando el aumento de la frecuencia, intensidad y duración de los fenómenos meteorológicos extremos, superando la resiliencia de algunos sistemas ecológicos humanos y desafiando la capacidad de adaptación de otros. El IPCC (2022), nos presenta algunos de los impactos más significativos que se han ido observando, a continuación, se presentaran cada uno de ellos.

4.6.1 Ecosistemas y biodiversidad

Las observaciones han mostrado que el cambio climático ha ido alterando a los ecosistemas marinos, terrestres y de agua dulce, ocasionando las pérdidas de especies locales, el aumento de enfermedades y eventos masivos de mortalidad de plantas y animales dando lugar a la extinción de las primeras especies a causa del clima, trayendo como consecuencias, cambios irreversibles en los ecosistemas y amenazando la biodiversidad marina.

4.6.2 Sistemas alimentarios, seguridad alimentaria y silvicultura

Desde hace tiempo se ha observado que los impactos del cambio climático han estado afectando negativamente a la agricultura, la silvicultura, la pesca y la acuicultura dificultando cada vez más los esfuerzos para satisfacer las necesidades humanas, también ha provocado que el aumento de las temperaturas se reflejara de manera negativa en los sistemas alimentarios y forestales ya que ha causado consecuencias graves en la calidad de los cultivos, ha provocado la mortalidad de árboles en varios lugares donde la temperatura es más cálida y seca, al mismo tiempo que ha ocasionado que los océanos se calentaran más de lo norma afectando a las especies acuáticas. Las sequías, las inundaciones, los incendios forestales y las olas de calor marinas son causantes de contribuir a la reducción de la disponibilidad de los alimentos y aumentar los precios de éstos, amenazando la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia de muchas de personas.

4.6.3 Sistemas de agua y seguridad de agua

Uno de los grandes problemas que se han venido observando es la escasez de agua que cada vez experimenta más de la mitad de la población mundial. El cambio climático ha afectado los aspectos físicos de la seguridad del agua al aumentar la escasez y exponer a más personas a eventos extremos relacionados con el agua, como inundaciones y sequías. Cada día muchas personas en todo el mundo están experimentando patrones de precipitación que sobrepasan el umbral, provocando inundaciones graves y cambios en el ciclo hidrológico, generando una gran afectación en la producción de alimentos y energía aumentando la cantidad de enfermedades provocadas por el agua.

4.6.4 Salud y bienestar

El cambio climático además de repercutir de manera directa y negativa con nuestro entorno, también se ha encargado de dañar la salud física y mental de las personas, haciendo que mujeres, niños, ancianos, pueblos indígenas, hogares de escasos recursos y grupos socialmente marginados sean los más vulnerables. Se ha observado que los eventos extremos provocados por el cambio climático como las inundaciones, sequías y las tormentas han sido unos de los causantes principales de muertes en varias partes del mundo, las olas de calor que se han presentado cada vez más intensas a las de años atrás ha provocado que los grupos altamente vulnerables sean aquellos que trabajan al aire libre provocando impactos en la salud por el estrés del calor. También se ha observado un aumento en los desafíos de salud mental con los traumas que los incrementos de las temperaturas ha ocasionado, de igual manera ya se ha registrado observaciones donde el cambio climático contribuye a muchos tipos enfermedades como las transmitidas por el agua a causa de inundaciones o eventos extremos de lluvias, los riesgos de las enfermedades de los alimentos relacionados con el clima como la salmonela o algunas micotoxinas relacionadas con el cáncer, al igual que el aumento de la desnutrición en varias partes del mundo.

4.6.5 Migración y desplazamiento

Desde el quinto informe de evaluación se indicó que los eventos climáticos como las sequías, los ciclones tropicales, huracanes, las precipitaciones extremas y las inundaciones han sido uno de los impulsores principales para la migración y los desplazamientos involuntarios de las personas. Estos desplazamiento o migraciones involuntarias muchas veces se deben a una mala

salud o bienestar, ocurren cuando las alternativas de adaptación están agotadas y crean altos niveles de exposición y vulnerabilidad.

El deterioro de las condiciones económicas y los medios de subsistencia han sido una de las vías principales para las migraciones provocadas por el clima.

4.6.6 Vulnerabilidad humana

La vulnerabilidad determina como las sociedades y las comunidades experimentan los impactos del cambio climático, lamentablemente hay muchos países en el mundo que se encuentran en un riesgo de vulnerabilidad alta debido a los problemas relacionados con la pobreza, la salud, la desigualdad de género, la falta de educación y la falta de capacidad de gobernanza e infraestructura, sobre todo afectando las formas de vida de los pueblos indígenas, si se ayudara a contribuir en el conocimiento indígena y respetando sus derechos, el conocimiento de ellos, junto con el conocimiento local, ayudarían a contribuir para reducir la vulnerabilidad.

4.6.7 Ciudades asentamiento e infraestructura

Cada vez más las ciudades y los asentamientos humanos han ido creciendo a un ritmo rápido y siguen siendo de mayor importancia como sitios de mayor exposición al riesgo y vulnerabilidad, la exposición a los impactos provocados por el clima como las olas de calor y las precipitaciones extremas en combinación con la rápida urbanización y la falta de planificación sensible al clima, está aumentando la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas marginadas y la infraestructura clave para el cambio climático. Las ciudades costeras cada vez se ven más afectadas debido al aumento del nivel mar, este problema suele ser más presente en las costas protegidas o hundidas presentando molestias debido a inundaciones crónicas durante las mareas altas, la salinización del nivel freático, aumento de la erosión y daños por inundaciones costeras.

4.6.8 Sectores económicos

Se han identificado impactos adversos en el crecimiento económico a partir de fenómenos meteorológicos extremos con grandes efectos en los países en desarrollo. Estos impactos han provocado que se debiliten los medios de vida económicos sobre todo en las poblaciones más vulnerables. Cada vez se observan pérdidas económicas para los sectores con alta exposición al clima, como las pérdidas regionales en la agricultura, la silvicultura, la pesca, la energía y el turismo y los pequeños estados insulares en desarrollo han notificado pérdidas económicas y una amplia variedad de daños causados por ciclones tropicales y aumentos del nivel del mar.

4.7 México y el cambio climático

México es altamente vulnerable al cambio climático debido a su posición geográfica y su condición socioeconómica ya que por sus características muchas veces es impactado por fenómenos hidrometeorológicos, a lo largo del tiempo estos fenómenos han provocado que muchas personas vulnerables en el país perdieran la vida y tuvieran altos costos económicos y sociales y ha ocasionado el riesgo de las poblaciones y la biodiversidad en varios puntos del país. Ante este fenómeno de cambio climático, se ha buscado crear iniciativas y medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad en los asentamientos humanos y naturales. Según Sosa (2015), hay una proyección de que los impactos del cambio climático como inundaciones, aumento del nivel del mar, pérdida de biodiversidad, sequías y lluvias torrenciales afectarán de manera heterogénea al país, debido a los distintos tipos de clima, distribución de recursos naturales, infraestructura, desarrollo económico y concentración demográfica. Con el fin de desarrollar y establecer las medidas necesarias para reducir la vulnerabilidad, en el país se han desarrollado diversos programas e investigaciones donde se han identificado las problemáticas que están relacionadas con los fenómenos provocados por el cambio climático, al igual que los análisis para medir el grado de vulnerabilidad a los que está expuesto el país y así predecir los impactos y tomar las medidas necesarias de adaptación.

4.8 Análisis de precipitación para incrementar resiliencia ante eventos extremos

Son diversas amenazas a las que estamos sujetos a causa del cambio climático, desde que este problema ha existido se han propuesto diversas formas de estudiarlo con el objetivo de proponer estrategias de adaptación o mitigación y enfrentar sus efectos. Son varios los modelos climáticos que ya existen y se han utilizado para predecir los impactos futuros de los efectos del cambio climático en nuestra vida. Uno de los principales problemas a los que suele enfrentarse el mundo es al aumento de los cambios en los patrones de precipitación que traen consecuencias graves como inundaciones, sequías y otras consecuencias relacionadas con el estrés hídrico.

Actualmente, México cuenta con una red de estaciones climatológicas que almacenan información de diversas variables ambientales como son la temperatura y precipitación principalmente, su monitoreo continuo permite realizar el análisis y estudiar su comportamiento a lo largo del tiempo. El registro instrumental de dichas variables climáticas nos permite tener datos sobre cambios en temperatura y precipitación durante periodos variables (Lozano, 2004). Algunos especialistas en el clima consideran que se precisa de por lo menos 30 años de datos y observaciones para hablar con seguridad del clima esperado y de la historia de las variaciones posibles en el estado de una región (Conde, 2011). La variabilidad de la precipitación y el régimen asociado son uno de los pasos más importantes, no solo en mejorar las habilidades de pronósticos a largo plazo, sino también para evaluar los impactos regionales del cambio futuro (Corte et al. 1998). De acuerdo con el INEEC (2019), las variables principales para poder conocer la frecuencia de las inundaciones y el índice de estacionalidad de la precipitación son:

- **Precipitación acumulada anual.** Se conoce como la precipitación acumulada anual, a la suma de la precipitación mensual de los 12 meses del año, que proporciona información de la cantidad de lluvia que cae en una región determinada al año.
- **Precipitación mensual.** El cálculo de la precipitación mensual nos permite conocer como es la distribución de la lluvia a través del año, para conocer cuáles son los meses en los que se presenta mayor precipitación y cuáles son esos meses en los que la precipitación disminuye. También este cálculo sirve como insumo para conocer el promedio anual de precipitación.

4.8.1 Precipitación media

Se sabe que la altura de la lluvia que cae en un sitio difiere de la que cae en los alrededores (Aparicio, 1992), por lo cual es necesario calcular la precipitación media de una cuenca o una región en estudio, para eso es necesario contar con valores puntuales de lluvia. Existen tres métodos para poder calcular la precipitación media de una cuenca.

- a) **Método aritmético.** Este método consiste en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada para el análisis. La fórmula es la siguiente:

$$h_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi} \quad (9.1)$$

Donde:

h_p = Altura de la precipitación media.

h_{pi} = Altura de la precipitación registrada en la estación i .

n = Número de estaciones.

- b) **Polígonos de Thiessen.** Este método consiste en unir mediante líneas rectas dibujadas en un plano, las estaciones más próximas entre sí, formando triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas. Después en se trazan líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos, por lo cual cada estación quedara rodeada por esas líneas formando los polígonos de Thiessen. El área encerrada por los polígonos y el parteaguas serán el área de influencia de las estaciones correspondientes. Finalmente, la precipitación se calcula como el promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia.

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi} \quad (9.2)$$

Donde:

A_i = Área de influencia.

A_T = Área total de la cuenca.

- c) **Método de Isoyetas.** Este método consiste en trazar líneas que se unan con puntos que tengan la misma altura de precipitación, de manera similar a las curvas de nivel. La fórmula para el calcular la precipitación media es la siguiente:

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} h_{pi} A'_i \quad (1.3)$$

Donde:

n' = Número de áreas A'_i consideradas.

4.8.2 Estimación de datos faltantes

Un problema al que siempre nos vamos a enfrentar a la hora de realizar análisis de precipitación, es que siempre nos vamos a enfrentar con registros de precipitación que les haga falta datos, debido a la ausencia del operador o a fallas en las lecturas. Para este problema existen métodos para estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión y uniformemente repartidas.

Aparicio (1992), menciona que se puede usar un método basado en la precipitación media, el cual consiste en dos tipos de criterios; el primero dice que, si la precipitación media anual en cada una de las estaciones circundantes difiere en menos del 10% de la registrada en la estación de estudio, los datos faltantes se estiman haciendo un promedio aritmético de las precipitaciones en las estaciones circundantes y el otro criterio dice que si la precipitación media difiere en más del 10%, se usa la formula:

$$h_{px} = \left[\frac{P_x}{P_1} h_{p1} + \frac{P_x}{P_2} h_{p2} + \dots + \frac{P_x}{P_n} h_{pn} \right] \quad (1.4)$$

Donde:

h_{p1} = Altura de precipitación registrada el día en cuestión en la estación auxiliar i.

h_{px} = Altura de precipitación faltante en la estación en estudio.

P_1 = Precipitación media anual en la estación auxiliar i.

P_x = Precipitación media anual en la estación en estudio.

n =Número de estaciones auxiliares.

Chereque (1989), menciona que también se pueden estimar los datos faltantes por medio del método de promedios que consiste en escoger una estación (A) cuya precipitación anual media es x_A y si la estación del problema es la estación x , se halla su correspondiente precipitación anual media \bar{x} y se establece la proporción:

$$\frac{x}{x_A} = \frac{\bar{x}}{\bar{x}_A} \quad (1.5)$$

En donde se puede despejar x que es el dato faltante.

También existen otros métodos para la estimación de datos faltantes, Medina (2007), en su trabajo de investigación de posgrado, menciona que también existen los siguientes métodos:

- a) **Método por análisis de regresión.** Este método consiste en seleccionar una serie de datos con un comportamiento similar, dentro de la misma área de referencia, a la serie que tiene los datos faltantes. La serie con los registros de referencia debe tener datos completos en los periodos en donde faltan datos en las series de estudios. Para caracterizar esos registros, se toman aquellos periodos en los cuales los datos en ambas series están presentes, obteniendo la media y desviación estándar para cada serie. Los valores de la serie de referencia se denotan como X_i y los datos de la serie de estudio que no están completas como Y_i . Finalmente, al final se estiman los coeficientes de la regresión de Y con respecto a X para los periodos donde los datos en ambas series están completos, es decir:

$$\hat{y}_i = a + bx_i$$

siendo $b = \frac{COV_{xy}}{S_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}$; $a = \bar{y} - b\bar{x}$ (1.6)

Donde:

a y b = constantes de regresión.

COV_{xy} = es la covarianza entre X_i y Y_i .

- b) **Método de la razón.** Este método consiste en obtener la razón q , a partir de un par de estaciones meteorológicas, de tal manera que sus valores mensuales, anuales o medios tiendan a ser constantes. El procedimiento consiste en identificar en dos estaciones seleccionadas A y B los datos comunes, para después obtener la razón q como el cociente entre la sumatoria de los datos de la estación de los datos faltantes B, con la sumatoria de los datos de la estación que tiene todos los datos A. Es decir:

$$\frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (1.7)$$

Donde:

N = Número de registros en cada estación.

b_i = Registro de la precipitación i en la estación B.

a_i = Registro de la precipitación i en la estación A.

Por último, una vez estimada la razón q , se obtienen el valor faltante de la precipitación por medio de la fórmula:

$$b_j = qa_j \quad (1.8)$$

Donde:

b_j = Precipitación estimada para el día faltante j .

a_j = Precipitación registrada en la estación de referencia el día j .

- c) **Estimación de datos faltantes mediante la media.** Es uno de los métodos más sencillos para estimar datos faltantes. Sigue el modelo $y = \alpha$, donde y , es la estimación de dato faltante y α , es el promedio obtenido con los registros de la variable de interés en otros tiempos.

5 AREA DE ESTUDIO

5.1 Localización

El estado de Campeche se ubica al sur de la República Mexicana y forma parte de la península de Yucatán, sus coordenadas geográficas extremas son: latitud Norte $20^{\circ}50'54''$ y $17^{\circ}48'46''$, longitud oeste $89^{\circ}07'16''$ y $92^{\circ}28'08''$. Colinda al norte con el Golfo de México y Yucatán, al este con Yucatán, Quintana Roo y Belice, al sur con la Republica de Guatemala y Tabasco; al oeste con Tabasco y el Golfo de México (Figura 2).



Figura 2. División política de la República Mexicana

La extensión territorial del estado de Campeche es de $57,487.9 \text{ km}^2$, representa el 2.9% de la superficie del país, se divide en 13 municipios (Figura 3) y su población es de 928, 363 habitantes (INEGI, 2020). En la Tabla 4, se detalla cada uno de los municipios del estado de Campeche.

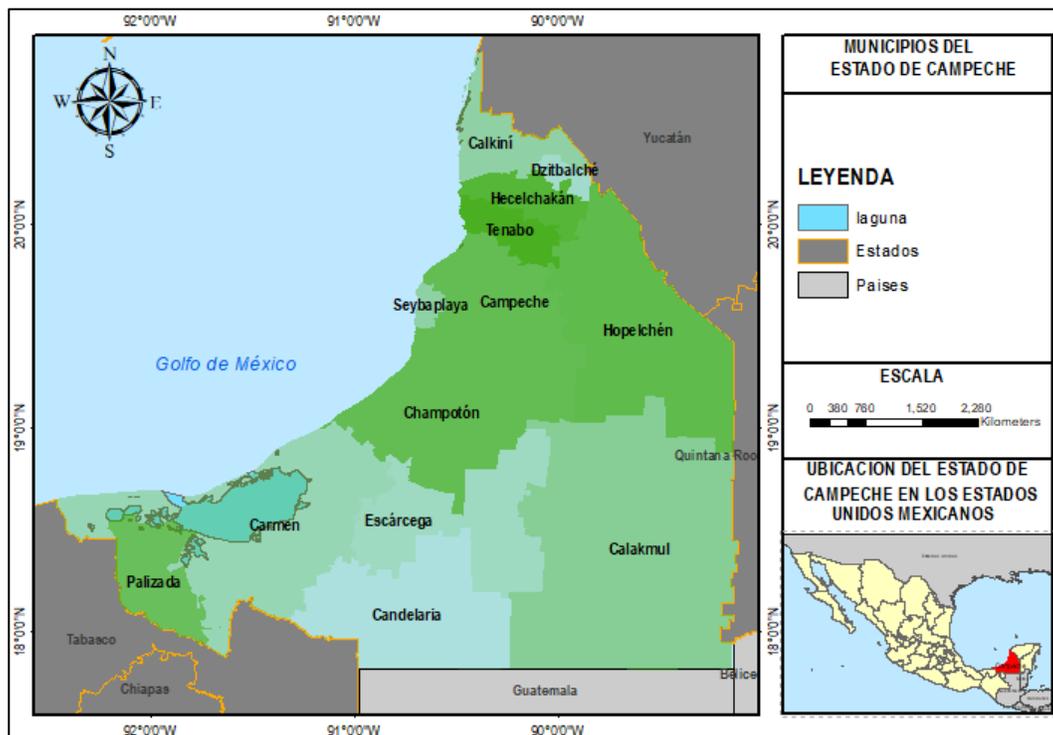


Figura 3. División política del estado de Campeche

Tabla 4. División geoadministrativa municipal

Clave	Municipio	Cabecera municipal	Latitud Norte	Longitud oeste	Altura
010	Calakmul	Xpujil	18°30'19"	89°23'50"	263
001	Calkiní	Calkiní	20°22'16"	90°03'03"	13
002	Campeche	San Francisco de Campeche	19°50'41"	90°32'23"	05
011	Candelaria	Candelaria	18°11'00"	91°02'47"	46
003	Carmen	Ciudad del Carmen	18°38'16"	91°50'11"	00
004	Chamotón	Chamotón	19°21'22"	90°43'26"	10
013	Dzilbalché	Dzilbalché	20°19'15"	90°03'25"	13
009	Escárcega	Escárcega	18°36'16"	90°43'55"	84
005	Hecelchakán	Hecelchakán	20°10'37"	90°08'04"	14
006	Hopelchén	Hopelchén	19°44'44"	89°50'42"	89
007	Palizada	Palizada	18°15'13"	92°05'27"	00

012	Seybaplaya	Seybaplaya	19°38'21"	90°41'18"	03
008	Tenabo	Tenabo	20°02'23"	90°13'33"	08

Fuente: INEGI. Editado de marco geoestadístico 2021

5.2 Estructura geológica

El estado de Campeche y estados vecinos de Yucatán y Quintana Roo de acuerdo con la nomenclatura de Ortega (1991), forman parte de la Provincia Geológica Plataforma de Yucatán (Pireiño, 2007), donde aflora una secuencia de rocas sedimentarias marinas cenozoicas, principalmente calcárea, que no presentan deformaciones significativas y están formadas por capas que conservan una actitud horizontal. Las rocas que forman parte del estado de Campeche comprenden un intervalo geocronológico que abarca del Paleoceno al Holoceno. La afloración rocosa perteneciente a la península de Yucatán son: la formación Icaiché, Chichén Itzá, Carrillo Puerto, Coquina de Bioclastos y sedimentos cuaternarios (Pireiño, 2007).

La formación Icaiché está constituida por una secuencia de caliza microcristalina, estratificada, de facies a limos y lutitas; su edad corresponde al Paleoceno. La formación Chichén Itzá consiste en una secuencia de caliza estratificada, pertenecen al Eoceno y son una de las rocas más abundantes de la Península de Yucatán, también son de interés geológico económico como agregados pétreos. La formación Carrillo Puerto está conformada por caliza fosilífera y bancos de coquina; pertenece a la edad del Mioceno Superior-Plioceno. La Coquina de Bioclastos aflora al Pleistoceno, donde se observan pequeños afloramientos de conglomerado polimíctico y arenisca que se han considerado como formación Tierra Colorada. Por último, los sedimentos cuaternarios se presentan entre depósitos aluviales conformados por arcillas, limo, arena y grava; depósitos lacustres constituidos por sedimentos finos y fangos calcáreos, depósitos en lagunas someras, depósitos de litoral constituidos por sedimentos no consolidados sujetos al oleaje y mar, constituidos por arena fina a gruesa, fragmentos de gravas y conchas, y por último también está constituido por depósitos palustres conformados de arcilla, limo, arenas, sales y materia orgánica en descomposición.

5.4 Orografía

La superficie del estado de Campeche forma parte de las provincias fisiográficas: llanura costera del Golfo Sur y Península de Yucatán. La provincia fisiográfica de Yucatán ocupa aproximadamente el 80% de la superficie estatal (Piñeiro, 2007) y se localiza en la porción central de la entidad. La provincia llanura costera del Golfo Sur se extiende desde el extremo sur occidental del estado de Veracruz que pasa por el estado de Tabasco y penetra la entidad por la zona de Palizada, comprende la totalidad de la Laguna de Términos y la isla del Carmen. Consiste en una serie de pequeñas cadenas de lomas que sobrepasan los 300 metros de elevación y llegan a presentar pendientes que varían de fuertes a suaves. El relieve del estado de Campeche es plano, con ondulaciones y baja altitud, se destaca por una gran planicie que se extiende desde el oeste hasta el sur y cuenta con algunos valles y llanuras que se inunda con cierta frecuencia, áreas pantanosas y formación de ríos. Entre los valles que más destacan son el Edzná, Yohaltún y Pool Pal. La región montañosa y lomeríos se localiza al norte y este del estado, donde se ubica la cordillera de Dzilbalchén y la Sierra Alta proveniente del estado de Yucatán. La parte más elevada del relieve se encuentra en el sureste cerca de los límites con Guatemala y Quintana Roo en la meseta de Zoh Laguna (Martinez, 2019).

5.5 Suelos

El estado de Campeche cuenta con varios tipos de suelos (Figura 5), el 32.2% de suelos del estado pertenecen a los Leptosoles que antes eran conocidos como litosoles, actualmente representan a suelos con menos de 25 cm de espesor o con más del 80% de su volumen ocupado por piedras o gravas y son muy susceptibles a la erosión por las diversas actividades humanas. El 28.19% le pertenece a los vertisoles que son suelos pesados bajo condiciones alternadas de saturación-sequía, con grietas anchas, abundantes y profundas cuando están secos y con más de 30% de arcillas expandibles, son bastantes fértiles para la agricultura por su alta capacidad de retención de humedad y sus propiedades de mineral con las plantas. El Gleysol es otro tipo de suelo que es bien común en el estado son propios de humedales y bajo condiciones naturales están afectados por agua subterránea en los 50 cm de profundidad. Los Phaeozem pertenecen al 13.55%, son suelos de climas secos y subhúmedos de color superficial de pardos a negros, fértiles en magnesio y potasio, se desarrollan en lugares planos o undulados. En un porcentaje menor también se encuentran el Luvisol que son suelos rojos, grises o pardos, susceptibles a la

erosión especialmente aquellos que tienen alto contenido de limos. El Nitisol es un suelo común de los trópicos húmedos y por su profundidad y capacidad de enraizamiento son moderadamente estables ante la erosión; contrariamente a estos el suelo Lixisol que es otro de los que pertenecen al estado son fuertemente susceptibles a la erosión por deforestación y se requiere de continua aplicación de fertilizantes si se utilizan para la actividad agrícola. También se encuentran los suelos tipo Histosol que son suelos de alto valor ecológico debido a sus propiedades de absorción de humedad y regulación de los factores naturales. El Cambisol son un tipo de suelos jóvenes, en el subsuelo tienen una capa más parecida a suelo que a roca, tiene acumulaciones moderadas de calcio, hierro, manganeso y arcilla. Por último los otros que se encuentran en un porcentaje de 0.38 y 0.35 son los suelos tipo arenosol y Fluvisol, el primero incluyen arenas recién depositadas en dunas o playas, también de arenas residuales formadas por meteorización de sedimentos o rocas ricas en cuarzo, no tiene buenas propiedades de almacenamiento de agua y nutrientes, pero ofrecen facilidad de labranza. Y los suelos Fluvisol son aquellos con abundantes sedimentos fluviales, marinos o lacustres en periodos recientes y están ubicados sobre planicies, abanicos de ríos o marismas costeras.

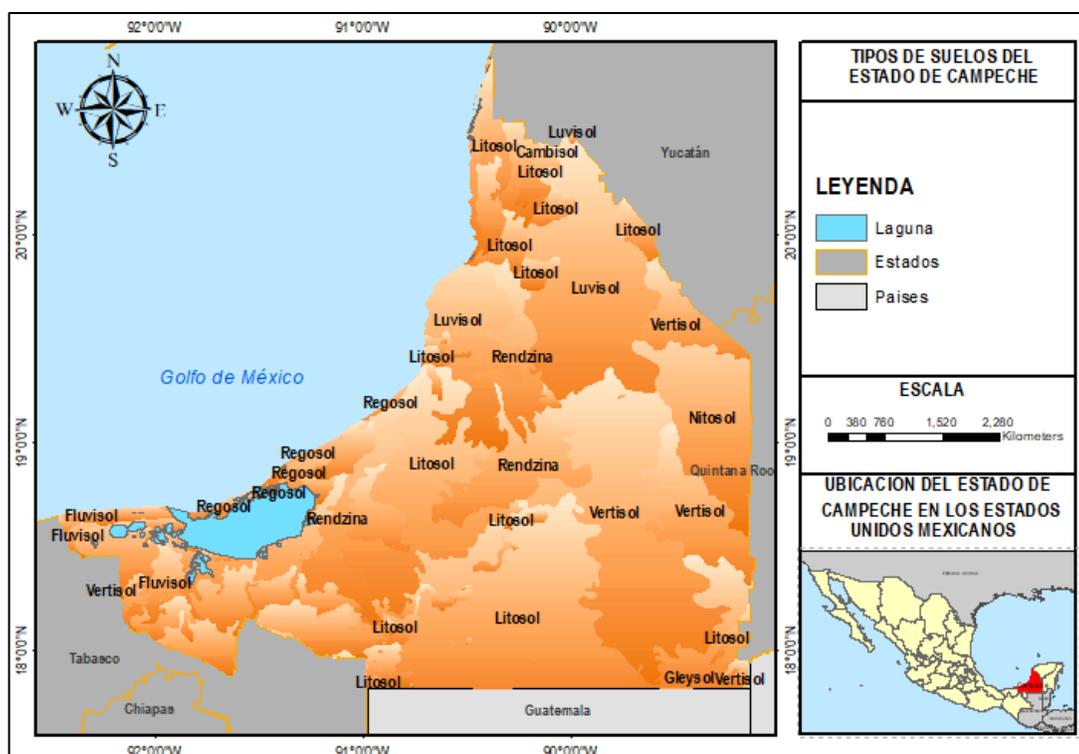


Figura 5. Tipos de suelos en el estado de Campeche

5.6 Hidrografía

El estado de Campeche cuenta con 4 regiones hidrológicas de las cuales la RH30 Grijalva-Usumacinta y la RH31 Yucatán Oeste son las más importantes (Posada et al. 2013) y 7 cuencas, así también como con 2200 km² de lagunas costeras (Figura 6). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), denominó región hidrológica XII a la península de Yucatán, la cual el 98% del territorio de Campeche se divide en la sub-región de Poniente y Candelaria. La sub-región de Candelaria es una de las zonas que cuenta con mayor precipitación con valores altos entre los 1700 y 1800 mm, con un promedio de precipitación anual de 1169 mm (CONAGUA, 2006b), sus corrientes superficiales de estas zonas pertenecen a distintas cuencas, siendo la de mayor extensión la del sistema Grijalva-Usumacinta, seguidas por las cuencas de los ríos Candelaria, Chumpán y Mamantel (Rebolledo, 2010).

El río Palizada es uno de los brazos del Usumacinta y recibe las aguas del arroyo Blanco, desemboca en la laguna del Este, donde también desembocan pequeñas corrientes de los ríos del este que salen a la laguna de términos por la Barra de Boca chica. El río de Chumpán se forma por la unión de los arroyos, Salsipuedes, San Joaquín y Piedad y desemboca en la laguna de términos por la Boca de Balchacah. El río Candelaria se forma en la región del Petén, en Guatemala, con orientación de sur a norte, recibe al río Caribe y desemboca en la laguna de Pargos. El río Mamantel desemboca en la laguna de Panlau y presenta un caudal pequeño sobre la superficie del terreno. Otra de las cuencas más importantes del estado es la del río de Champotón que encuentra al Norte de la Laguna de términos, fluye sobre suelos calcáreos con un curso corto y sin afluentes, desembocando en el Golfo de México. (Posada et al. 2013). Finalmente, el resto de las corrientes del estado son temporales pues solo en tiempo de lluvia llevan agua.

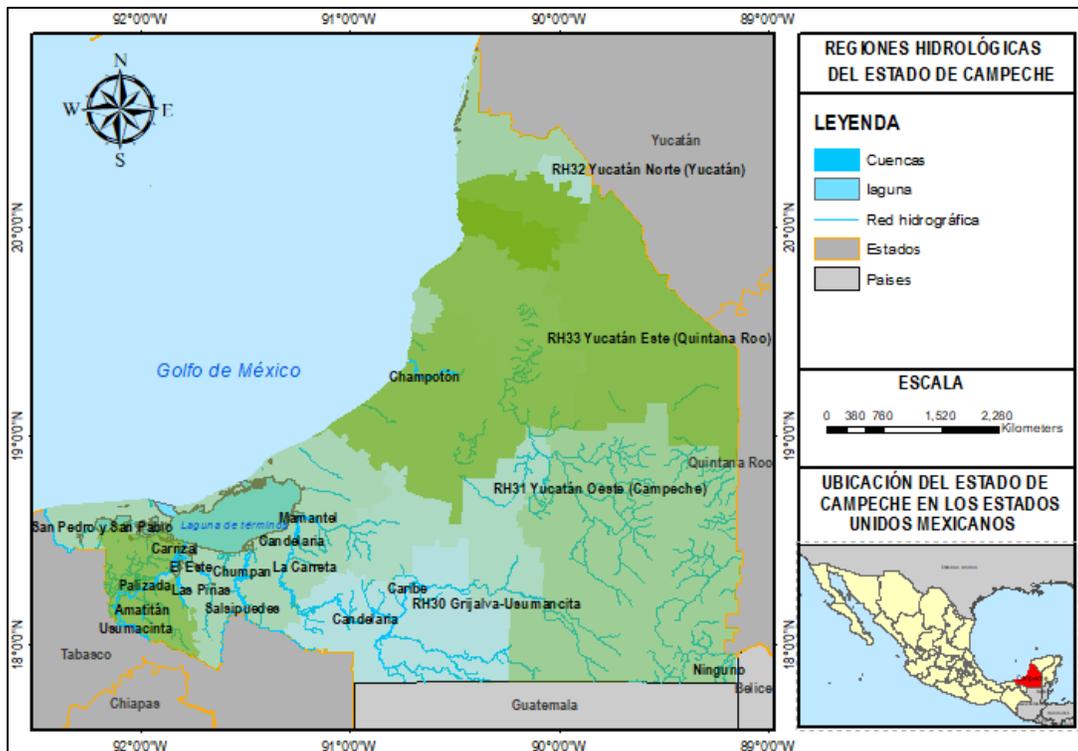


Figura 6. Regiones hidrológicas del estado de Campeche

6 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se presenta a continuación tiene como punto de partida la construcción de una base de datos que contenga los registros históricos de la precipitación en el estado de Campeche, posteriormente el análisis estadístico mediante el programa Excel y finalmente la construcción de un sistema de Información Geográfico (SIG), para identificar las tendencias del comportamiento de la precipitación temporal y espacialmente, Figura 7.



Figura 7. Proceso de la metodología propuesta

6.1 Servicio Meteorológico Nacional

Con el fin de conocer el comportamiento de la precipitación en el estado de Campeche, en el presente trabajo, se utilizó la información publicada en el portal del Sistema Meteorológico Nacional (SMN), que pertenece a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con dirección del sitio (<https://smn.conagua.gob.mx/es/>). En la sección “Información estadística climatológica” se permite consultar información histórica de las estaciones climatológicas convencionales que conforman la Red Nacional de la CONAGUA. Dicha información comprende desde el primer dato registrado hasta el dato más reciente disponible en las bases de datos del SMN reportado por los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales de la CONAGUA.

Se pone a disposición información de poco más de 5,400 estaciones climatológicas, de las cuales aproximadamente 2,800 reportan datos, mientras que el resto dejó de operar temporalmente o ya no existen, sin embargo, mantienen un considerable acervo de información. Las principales variables climatológicas que se pueden consultar son: Temperaturas extremas (máxima y mínima), precipitación acumulada en 24 horas, algunos fenómenos como la tormenta eléctrica,

niebla, granizo, la cobertura del cielo, evaporación y las normales climatológicas. Se presentan dos modalidades de consulta:

- A través de un mapa interactivo, y
- Mediante la descarga de un archivo KMZ, el cual se podrá visualizar en el aplicativo “Google Earth”.

Ambas modalidades funcionan realizando un “zoom” al sitio de interés y seleccionando la estación de preferencia (SMN, 2022).

Para el caso el estado de Campeche se identificaron un total 87 estaciones climatológicas con claves comprendidas desde la 4001 a la 4087 (Figura 8). Del total indicado, se identificó que las estaciones 4022, 4048, 4049, 4069, 4074 se encuentran deshabilitadas y sin registros y por otro lado, al momento de bajar la información se encontraron 56 estaciones operando y 26 estaciones suspendidas.

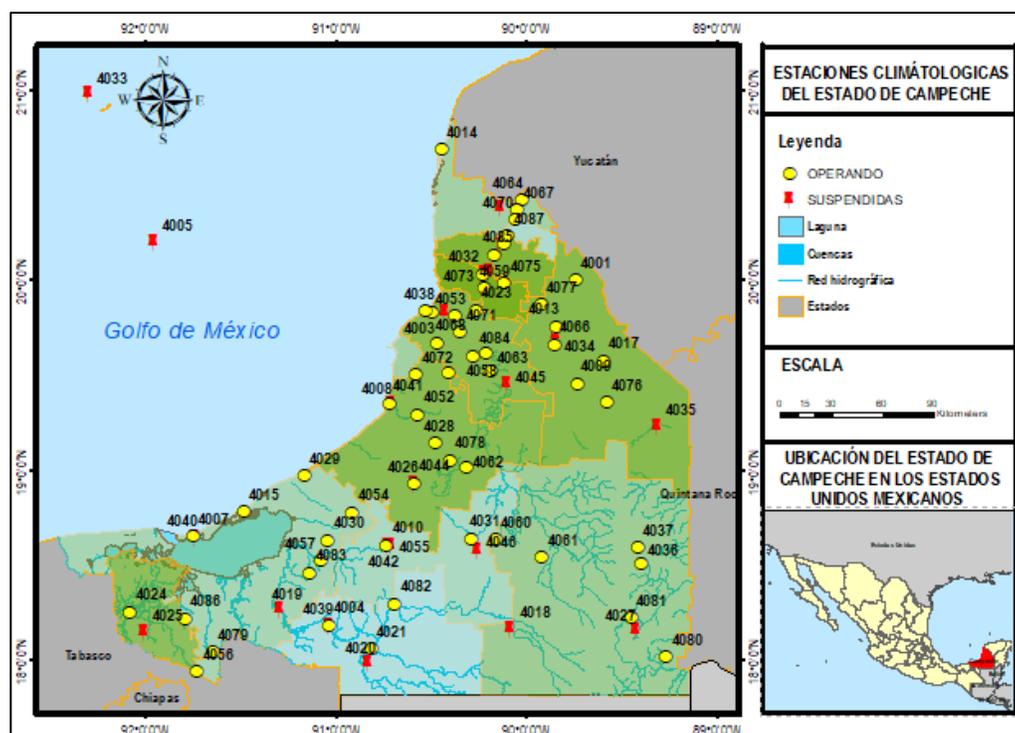


Figura 8. Estaciones climatológicas del estado de Campeche

La Tabla 6 indica las características principales de las estaciones climatológicas consideradas en el presente trabajo, las cuales hacen referencia a la clave de la estación, nombre, situación

actual, coordenadas de ubicación, elevación con respecto al nivel del mar y las fechas de registro.

Tabla 6. Estaciones climatológicas del estado de Campeche

Clave	Nombre	Situación	Latitud	Longitud	Altura (msnm)	Fechas de Registro
4001	Bolonchén	Operando	020.004°	-089.748°	120	01/01/1953-28/02/2021
4002	Calkiní	Suspendida	020.360°	-090.054°	15	01/05/1950-31/12/2018
4003	Campeche	Operando	019.833°	-090.500°	10	01/08/1942-28/02/2021
4004	Candelaria	Operando	018.184°	-091.046°	40	08/06/1944-31/12/2021
4005	Cayo Arcas	Suspendida	020.204°	-091.962°	6	11/08/1929-31/05/1987
4006	Cayo Arenas	Suspendida	022.115°	-091.399°	3	01/08/1929-28/02/2021
4007	El Carmen	Operando	018.653°	-091.761°	5	01/12/1926-28/02/2021
4008	Chamotón	Suspendida	019.350°	-090.717°	10	01/01/1921-31/12/1998
4009	Dzibalchén	Operando	019.459°	-089.738°	110	01/01/1952-31/12/2018
4010	Escárcega	Operando	018.604°	-090.741°	80	01/11/1943-28/02/2021
4011	Hecelchakán	Suspendida	020.183°	-090.133°	15	01/02/1900-31/12/2018
4012	Hool	Operando	019.513°	-090.411°	25	01/06/1962-31/12/2018
4013	Hopelchén	Operando	019.758°	-089.843°	100	11/02/1944-28/02/2021
4014	Isla arenas	Operando	020.690°	-090.453°	1	01/02/1970-31/12/2018
4015	Isla aguada	Operando	018.782°	-091.494°	1	13/03/1959-31/12/2018
4016	Isla Pérez	Suspendida	022.388°	-089.671°	3	01/01/1930-30/10/1983
4017	Iturbide	Operando	019.578°	-089.601°	80	01/04/1944-31/12/2018
4018	La esperanza	Suspendida	018.167°	-090.083°	290	01/01/1965-31/08/1981
4019	Nanzal	Suspendida	018.264°	-091.303°	10	01/01/1965-31/08/1976
4020	Miguel Hidalgo	Suspendido	017.983°	-090.833°	67	17/10/1964-31/12/1989
4021	Monclova	Operando	018.057°	-090.821°	100	01/01/1961-28/02/2021
4023	Nilchi	Operando	019.845°	-090.270°	10	19/06/1964-31/12/2018

4024	Palizada	Operando	018.253°	-092.092°	4	01/11/1944-28/02/2021
4025	Palmar de Vista Alegre	Suspendida	018.151°	-092.016°	3	09/08/1967-31/12/2018
4026	Pixoyal	Suspendida	018.934°	-090.599°	40	01/01/1953-31/12/2018
4027	Placeres	Suspendida	018.156°	-089.423°	230	01/02/1969-31/05/1974
4028	Pustunich	Operando	019.145°	-090.479°	30	01/02/1952-31/12/2018
4029	Sabancuy	Operando	018.973°	-091.176°	5	01/11/1953-28/02/2021
4030	San isidro	Operando	018.632°	-091.050°	10	12/04/1958-31/12/2018
4031	Silvituc	Operando	018.638°	-090.298°	75	01/04/1958-31/12/2018
4032	Tenabo	Operando	020.033°	-090.233°	7	01/05/1950-31/12/2013
4033	Triángulo oeste	Suspendida	020.983°	-092.304°	1	10/08/1929-31/10/1987
4034	Xcupíl	Suspendida	019.717°	-089.850°	80	21/01/1944-31/12/1998
4035	Xmabén	Suspendida	019.235°	-089.314°	130	09/02/1966-31/12/1976
4036	Xpujil	Operando	018.508°	-089.395°	250	01/07/1971-28/02/2021
4037	Zoh laguna	Operando	018.592°	-089.417°	265	26/06/1949-31/12/2018
4038	Campeche	Operando	019.842°	-090.532°	10	01/01/1952-28/02/2021
4039	Candelaria	Suspendida	018.183°	-091.046°	50	01/01/1961-31/12/1988
4040	El Carmen	Suspendida	018.650°	-091.750°	3	01/01/1955-28/02/2021
4041	Chamotón	Operando	019.356°	-090.723°	10	01/01/1954-28/02/2021
4042	Escárcega	Suspendida	018.600°	-090.733°	85	01/01/1961-31/05/1990
4043	Hecelchakán	Operando	020.197°	-090.122°	50	06/04/1944-31/12/2017
4044	Pixoyal	Operando	018.933°	-090.599°	40	19/06/1944-31/12/2017
4045	Edzna I	Suspendida	019.458°	-090.104°	125	21/07/1972-31/12/1998
4046	Altamira	Suspendida	018.581°	-090.258°	100	01/01/1968-31/12/1975
4047	Castamay	Suspendida	019.838°	-090.431°	25	01/04/1978-30/04/1987
4050	E.t.a.006 Tenabo	Suspendida	020.050°	-090.200°	7	15/02/1973-28/02/1979
4051	E.t.a. 086 Calkiní	Suspendida	020.367°	-090.050°	15	01/09/1973-31/12/1982

4052	Canasayab	Operando	019.294°	-090.576°	37	01/07/1975-28/02/2021
4053	Santa cristina	Operando	019.815°	-090.381°	10	22/11/1976-30/09/2018
4054	Chicbul	Operando	018.778°	-090.923°	25	01/07/1977-31/12/2018
4055	Campo experimental El Tormento	Suspendida	018.600°	-090.717°	50	01/06/1977-31/12/2000
4056	Molino Chumpan	Operando	017.939°	-091.736°	10	01/05/1978-31/12/2018
4057	Mamantel	Operando	018.525°	-091.089°	12	01/01/1978-31/12/2018
4058	Noh yaxché	Operando	019.615°	-090.217°	30	01/08/1978-28/02/2021
4059	Tinún	Operando	019.961°	-090.228°	50	01/07/1978-31/12/2018
4060	Xbonil	Operando	018.636°	-090.166°	70	01/01/1977-31/12/2018
4061	Conhuas	Operando	018.539°	-089.922°	170	01/03/1979-31/12/2018
4062	Yohaltún	Operando	019.017°	-090.317°	30	01/06/1980-31/12/2018
4063	Edzna II	Operando	019.527°	-090.188°	30	01/01/1981-31/12/2018
4064	Becal	Operando	020.426°	-090.031°	16	01/05/1974-31/12/2018
4065	Nunkini	Suspendida	020.388°	-090.143°	25	01/06/1982-31/01/1998
4066	Xcupíl	Operando	019.664°	-089.859°	60	01/01/1962-28/02/2021
4067	Calkiní	Operando	020.374°	-090.052°	15	01/01/1982-30/11/2013
4068	China	Operando	019.673°	-090.474°	10	24/04/1983-31/12/2018
4070	Dzitbalche	Operando	020.321°	-090.059°	30	01/06/1982-31/12/2018
4071	Pocyaxun	Operando	019.730°	-090.351°	20	07/11/1982-31/12/2018
4072	Siho chac	Operando	019.506°	-090.584°	15	01/09/1982-31/12/2018
4073	Tenabo	Suspendida	020.040°	-090.225°	10	01/07/1982-31/08/1985
4075	Cankí	Operando	019.988°	-090.118°	50	01/01/1989-31/12/2018
4076	Chunchintok	Operando	019.359°	-089.581°	150	01/01/1989-31/12/2018
4077	San Juan Bautista	Operando	019.874°	-089.927°	90	01/01/1997-31/12/2018
4078	Chac Cheito	Operando	019.051°	-090.407°	90	01/01/1996-31/12/2018

4079	Vista Alegre	Operando	018.043°	-091.658°	10	01/01/1996-31/12/2017
4080	Alvarado	Operando	018.017°	-089.270°	170	09/04/1997-31/12/2018
4081	Cristóbal Colón	Operando	018.222°	-089.454°	250	01/01/1998-30/01/2018
4882	Pablo t. Burgos	Operando	018.297°	-090.697°	50	01/01/1998-30/06/2018
4083	Entre Hermanos	Operando	018.457°	-091.142°	40	01/01/1998-30/12/2018
4084	Tixmucuy	Operando	019.602°	-090.282°	34	01/01/1984-31/12/2018
4085	Pomuch	Operando	020.137°	-090.175°	10	01/01/1996-31/12/2018
4086	El zapote	Operando	018.216°	-091.801°	10	01/01/1996-31/12/2018
4087	Pocboc	Operando	020.237°	-090.103°	10	01/01/2002-31/12/2017

6.2 Procesamiento de la base de datos

Para llevar a cabo el análisis de la precipitación acumulada en 24 h, de las estaciones climatológicas indicadas en la Tabla 6 se siguió la secuencia de pasos indicada en el diagrama de la Figura 9, cuyo desarrollo se sigue a través de los siguientes apartados.

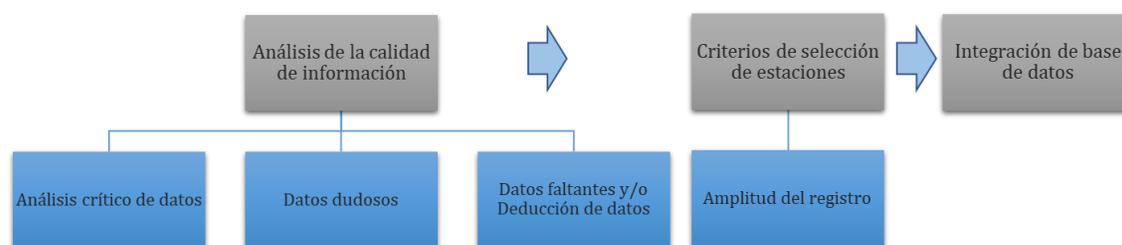


Figura 9. Procesamiento de base de datos de precipitación

6.2.1 Análisis de la calidad de información

A partir de la selección de las estaciones a utilizar, se recopiló la información de los registros de las precipitaciones diarias, generando para cada estación un archivo en formato de texto e importándolo en el programa Excel. Cada registro se sometió a un análisis crítico, que consistió en detectar valores dudosos o erróneos, ya sea por tener una magnitud muy grande o un valor

repetitivo que indicara un mal funcionamiento de la estación. Para el caso de valores dudosos se confirmó su existencia por medio de una comparación con las magnitudes, que para tal fecha fueron registradas en las estaciones cercanas, con lo cual se confirmó, corrigió o en todo caso se eliminaron tales valores.

Para lo anterior, fue necesario realizar un control de cada estación, tomando en cuenta las fechas totales de registro a diciembre de 2022, el total de años registrados, los años completos faltantes y el total de días sin registro, incluyendo los días de los años faltantes que se están considerando (Tabla 7).

Tabla 7. Información de cada una de las estaciones meteorológicas del estado de Campeche

Estación	Situación	Registro	Años registrados	Años faltantes	Datos faltantes
4001	Operando	01/01/1953-28/02/2021	69	0	652
4002	Suspendida	01/05/1950-31/12/2018	46	22	8491
4003	Operando	01/08/1942-28/02/2021	65	15	6683
4004	Operando	08/06/1944-31/12/2021	75	3	1775
4005	Suspendida	11/08/1929-31/05/1987	51	8	4734
4006	Suspendida	01/08/1929-28/02/2021	54	37	15649
4007	Operando	01/12/1926-28/02/2021	82	14	7152
4008	Suspendida	01/01/1921-31/12/1998	71	7	3446
4009	Operando	01/01/1952-31/12/2018	60	7	3851
4010	Operando	01/11/1943-28/02/2021	79	0	497
4011	Suspendida	01/02/1900-31/12/2018	52	67	25533
4012	Operando	01/06/1962-31/12/2018	57	0	673
4013	Operando	11/02/1944-28/02/2021	69	9	3919
4014	Operando	01/02/1970-31/12/2018	49	0	233
4015	Operando	13/03/1959-31/12/2018	60	0	330
4016	Suspendida	01/01/1930-30/10/1983	50	4	2403
4017	Operando	01/04/1944-31/12/2018	54	22	8353
4018	Suspendida	01/01/1965-31/08/1981	17	0	44
4019	Suspendida	01/01/1965-31/08/1976	11	1	1263
4020	Suspendida	17/10/1964-31/12/1989	26	0	761
4021	Operando	01/01/1961-28/02/2021	59	2	1999
4023	Operando	19/06/1964-31/12/2018	55	0	647
4024	Operando	01/11/1944-28/02/2021	75	3	1888
4025	Suspendida	09/08/1967-31/12/2018	6	47	16802
4026	Suspendida	01/01/1953-31/12/2018	38	29	11087
4027	Suspendida	01/02/1969-31/05/1974	6	4	1707
4028	Operando	01/02/1952-31/12/2018	67	0	697
4029	Operando	01/11/1953-28/02/2021	69	0	458
4030	Operando	12/04/1958-31/12/2018	54	7	5146
4031	Operando	01/04/1958-31/12/2018	58	3	1620
4032	Operando	01/05/1950-31/12/2013	25	39	16478
4033	Suspendida	10/08/1929-31/10/1987	30	19	10032
4034	Suspendida	21/01/1944-31/12/1998	51	4	2277

4035	Suspendida	09/02/1966-31/12/1976	10	1	426
4036	Operando	01/07/1971-28/02/2021	16	35	13175
4037	Operando	26/06/1949-31/12/2018	65	5	3296
4038	Operando	01/01/1952-28/02/2021	69	1	412
4039	Suspendida	01/01/1961-31/12/1988	28	0	159
4040	Suspendida	01/01/1955-28/02/2021	27	40	15282
4041	Operando	01/01/1954-28/02/2021	68	0	189
4042	Suspendida	01/01/1961-31/12/1990	30	0	230
4043	Operando	06/04/1944-31/12/2017	55	19	2023
4044	Operando	19/06/1944-31/12/2017	64	10	4547
4045	Suspendida	21/07/1972-31/12/1998	19	8	3749
4046	Suspendida	01/01/1968-31/12/1975	4	4	1492
4047	Suspendida	01/04/1978-30/04/1987	10	0	136
4050	Suspendida	15/02/1973-28/02/1979	7	0	94
4051	Suspendida	01/09/1973-31/12/1982	10	0	735
4052	Operando	01/07/1975-28/02/2021	33	14	5760
4053	Operando	22/11/1976-30/09/2018	41	2	1949
4054	Operando	01/07/1977-31/12/2018	42	0	467
4055	Suspendida	01/06/1977-31/12/2000	22	2	1046
4056	Operando	01/05/1978-31/12/2018	33	2	2185
4057	Operando	01/01/1978-31/12/2018	41	0	490
4058	Operando	01/08/1978-28/02/2021	44	0	73
4059	Operando	01/07/1978-31/12/2018	41	0	674
4060	Operando	01/01/1977-31/12/2018	41	1	2147
4061	Operando	01/03/1979-31/12/2018	28	2	2562
4062	Operando	01/06/1980-31/12/2018	16	23	9412
4063	Operando	01/01/1981-31/12/2018	38	0	112
4064	Operando	01/05/1974-31/12/2018	39	5	2925
4065	Suspendida	01/06/1982-31/01/1998	16	1	746
4066	Operando	01/01/1962-28/02/2021	56	4	2226
4067	Operando	01/01/1982-30/11/2013	32	0	220
4068	Operando	24/04/1983-31/12/2018	36	0	166
4070	Operando	01/06/1982-31/12/2018	37	0	858
4071	Operando	07/11/1982-31/12/2018	35	2	963
4072	Operando	01/09/1982-31/12/2018	37	0	94
4073	Suspendida	01/07/1982-31/08/1985	4	0	31
4075	Operando	01/01/1989-31/12/2018	30	0	545
4076	Operando	01/01/1989-31/12/2018	29	1	624
4077	Operando	01/01/1997-31/12/2018	22	0	206
4078	Operando	01/01/1996-31/12/2018	23	0	34
4079	Operando	01/01/1996-31/12/2017	20	2	831
4080	Operando	09/04/1997-31/12/2018	22	0	432
4081	Operando	01/01/1998-30/01/2018	20	1	617
4882	Operando	01/01/1998-30/06/2018	20	1	783
4083	Operando	01/01/1998-30/12/2018	20	1	1297
4084	Operando	01/01/1984-31/12/2018	35	0	332
4085	Operando	01/01/1996-31/12/2018	23	0	35
4086	Operando	01/01/1996-31/12/2018	22	1	925
4087	Operando	01/01/2002-31/12/2017	16	0	69

En las estaciones en donde se identificaron datos faltantes se utilizó el método de promedios que menciona Medina (2007) en su trabajo de investigación de posgrado, considerando los criterios de aplicación. El método de los promedios es un método muy sencillo para estimar datos faltantes el cual sigue el modelo $y = a$, donde y , es la estimación del dato faltante y a , es el promedio obtenido con los registros de la variable de interés en otros tiempos. En este caso para poder obtener la estimación del dato faltante, se tomó el promedio de la precipitación mensual acumulada a un año anterior del dato que falta con la sumatoria del registro de un año posterior al faltante tal y como se muestra en la Figura 10, en las casillas de color azul que es donde no se encontraba el dato de registro. Cabe aclarar que esta metodología fue empleada en el caso de la precipitación mensual acumulada para la estimación de la precipitación anual.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1961	34	19	59	4	8	62	172	49	150	68	4	26
1962	25	0	2	42.4	15	69	131	89	181	68	18	0
1963	2	5	9	9.3	0	97.75	138.8	253.1	322.8	89	45	44.5
1964	45	3	8.5	0.5	198.5	126.5	187.5	122	153.5	61	201	52
1965	27	24	3	25	11	189.5	204	201.2	237	146	115	31.5
1966	36	0	55	40.5	79.5	149.8	205.5	130.5	215	177	63	11.5
1967	127.3	47.5	58.5	59.5	43.5	196.5	125.3	133	181	279.5	36	19
1968	136	11	20.5	36	123.5	165.8	195	195.5	193	157	94.5	100.5
1969	0	0	64.5	6	187.5	130.5	242	0	0	165	0	0
1970	33	8.5	0	29.5	86.5	299.5	229	261.5	196.5	212.5	36	33
1971	13	3.5	3	0	7	197	207.5	386.5	256	82	101.5	30
1972	144	41.5	0	24.5	35.5	418	299	232	152	94.5	135	60.5
1973	44.5	22	1	1.5	160.5	143.5	284	353.5	191	209	104.5	24.5
1974	40.5	55	6.5	65.6	56	208.5	170.5	214.5	201.5	271.5	89.5	27.9
1975	34	63.5	38	0	63	188.5	250.2	248	403	384	46.5	41.5
1976	59.5	27	0	55.8	228	340	272	200	195.5	76	159	70.5
1977	0	0	0	0	0	57.5	0	0	0	0	0	0
1978	53.5	47.8	105.1	4.5	145.5	301.3	143.8	253.5	302	132.5	93	73
1979	18.5	21	37.5	25	74	132	171.5	142.5	341.5	159	88	39.5
1980	81	31	4	30	115	386	170.1	136.3	251.9	62.6	157.1	34.5
1981	22.7	72.6	9.1	0	153.2	454.6	391.5	390.2	106	134.9	50.3	54.2
1982	12.3	7	9.3	7.1	101	95.4	148.3	248.7	212.5	61.5	63.6	9
1983	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79
1984	69	16	12.5	0	404.9	75	89	121.4	168	41.5	83.5	31
1985	31.5	47	57	24	26	215.3	226	137	241.5	150	138.2	28.5
1986	118	9	15	0	244	125	140	145	31	145	210.1	68
1987	0	11	91	21	23	282.8	279.9	293	101	498.1	4	28
1988	90.5	13	0	5	34	300	198	201	403.5			
PROMEDIO	46.35	21.64	23.89	18.45	93.70	193.12	188.26	183.50	192.42	145.37	79.12	37.69
P MÁXIMA	144	72.6	105.1	65.6	404.9	454.6	391.5	390.2	403.5	498.1	210.1	100.5

Figura 10. Precipitación mensual

6.2.2 Criterio de selección de estaciones

Los datos o valores faltantes de un registro de lluvias son bastante frecuentes y se deben a una gran variedad de causas, entre algunas se encuentran desperfectos en el equipo de mediciones, ausencia del personal responsable de las observaciones, por interrupciones debidas a limitaciones presupuestales, vandalismo, etc. (Motavelle et al. 2022, Campos, A. 1998).

Como se comentó en el apartado anterior, se procedió con la generación de datos mensuales faltantes a través del método indicado por Medina (2007); sin embargo, en aquellos casos en donde no fue posible aplicar la metodología, el siguiente criterio para seleccionar las estaciones está relacionado con la longitud de registro, estableciendo 20 años como límite mínimo de registros continuos, de tal forma que las estimaciones estadísticas mensuales y anuales fueran confiables (Campos, A. 1998). En la Tabla 8, se presentan las estaciones que cumplen con los criterios de selección.

Tabla 8. Estaciones meteorológicas seleccionadas

Estación	Nombre	Municipio	Situación	Registro
4001	Bolonchén	Hopelchén	Operando	01/01/1953-31/12/2020
4004	Candelaria	Candelaria	Operando	01/01/1948-31/12/2020
4007	El Carmen	Carmen	Operando	01/01/1985-31/12/2020
4010	Escárcega	Escárcega	Operando	01/01/1944-31/12/2020
4012	Hool	Chamotón	Operando	01/06/1962-31/12/2018
4013	Hopelchén	Hopelchén	Operando	01/01/1953-31/12/2020
4015	Isla aguada	Calkini	Operando	13/03/1959-31/12/2018
4017	Iturbide	Hopelchén	Operando	01/01/1968-31/12/2018
4020	Miguel hidalgo	Candelaria	Suspendida	01/01/1965-31/12/1987
4021	Monclova	Candelaria	Operando	01/01/1965-30/12/2020
4023	Nilchi	Campeche	Operando	19/06/1964-31/12/2018
4024	Palizada	Palizada	Operando	01/01/1953-30/12/2020
4028	Pustunich	Chamotón	Operando	01/02/1952-31/12/2018
4029	Sabancuy	Carmen	Operando	01/01/1954-31/12/2020
4031	Silvituc	Escárcega	Operando	01/04/1958-31/12/2018
4037	Zoh laguna	Calakmul	Operando	01/01/1984-31/12/2018
4038	Campeche	Campeche	Operando	01/01/1952-31/12/2020
4041	Chamotón	Chamotón	Operando	01/01/1954-31/12/2020
4043	Hecelchakán	Hecelchakán	Operando	01/01/1986-31/12/2017
4054	Chicbul	Carmen	Operando	01/01/1978-31/12/2018
4056	Molino chumpan	Palizada	Operando	01/01/1982-31/12/2018
4057	Mamantel	Carmen	Operando	01/01/1978-31/12/2018
4058	Noh yaxché	Campeche	Operando	01/01/1979-31/12/2020
4059	Tinún	Tenabo	Operando	01/01/1979-31/12/2018

4061	Conhuas	Calakmul	Operando	01/01/1995-31/12/2018
4063	Edzna II	Campeche	Operando	01/01/1981-31/12/2018
4064	Becal	Calkiní	Operando	01/01/1983-31/12/2018
4066	Xcupíl	Hopelchén	Operando	01/01/1972-31/12/2020
4067	Calkiní	Calkiní	Operando	01/01/1982-30/11/2013
4068	China	Campeche	Operando	24/04/1983-31/12/2018
4070	Dzitbalché	Dzilbalché	Operando	01/01/1983-31/12/2018
4071	Pocyaxun	Campeche	Operando	01/01/1984-31/12/2018
4072	Siho chac	Champutón	Operando	01/01/1983-31/12/2018
4075	Cankí	Tenabo	Operando	01/01/1990-31/12/2018
4076	Chunchintok	Hopelchén	Operando	01/01/1989-31/12/2018
4077	San juan bautista	Hopelchén	Operando	01/01/1997-31/12/2018
4078	Chac cheito	Champutón	Operando	01/01/1996-31/12/2018
4079	Vista alegre	Carmen	Operando	01/01/1996-31/12/2017
4080	Alvarado	Calakmul	Operando	01/02/1998-31/12/2018
4081	Cristóbal colón	Calakmul	Operando	01/01/1998-31/12/2018
4082	Pablo t. Burgos	Candelaria	Operando	01/01/1998-31/12/2018
4083	Entre hermanos	Carmen	Operando	01/01/1998-31/12/2018
4084	Tixmucuy	Campeche	Operando	01/01/1984-31/12/2018
4085	Pomuch	Hecelchakán	Operando	01/01/1996-31/12/2018
4086	El zapote	Carmen	Operando	01/01/1996-31/12/2018

6.3 Análisis estadístico de la precipitación por estación climatológica

A partir de los registros históricos seleccionados es necesario determinar los valores de los parámetros estadísticos básicos. Para lo anterior se utilizó el programa Excel creando tablas dinámicas.

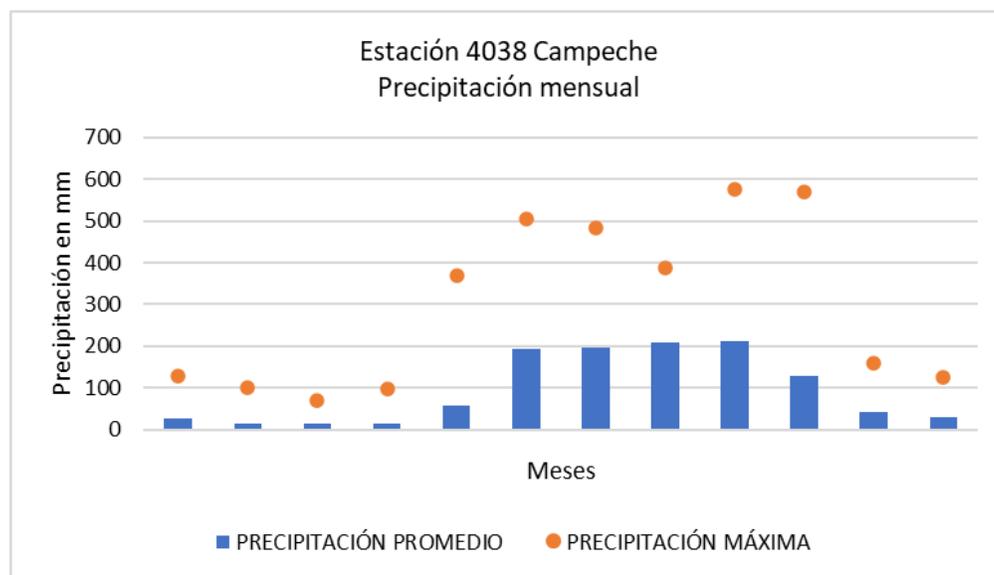
6.3.1 Precipitación mensual y anual

A partir de los registros de lluvias diarias (acumuladas en 24 h) se estimó la precipitación mensual, la precipitación anual, así como sus valores promedio (Figura 11) para caracterizar su ciclo anual, el cual nos permite conocer la distribución de la lluvia en las diferentes estaciones climáticas, es decir, cuáles son los meses más secos y húmedos.

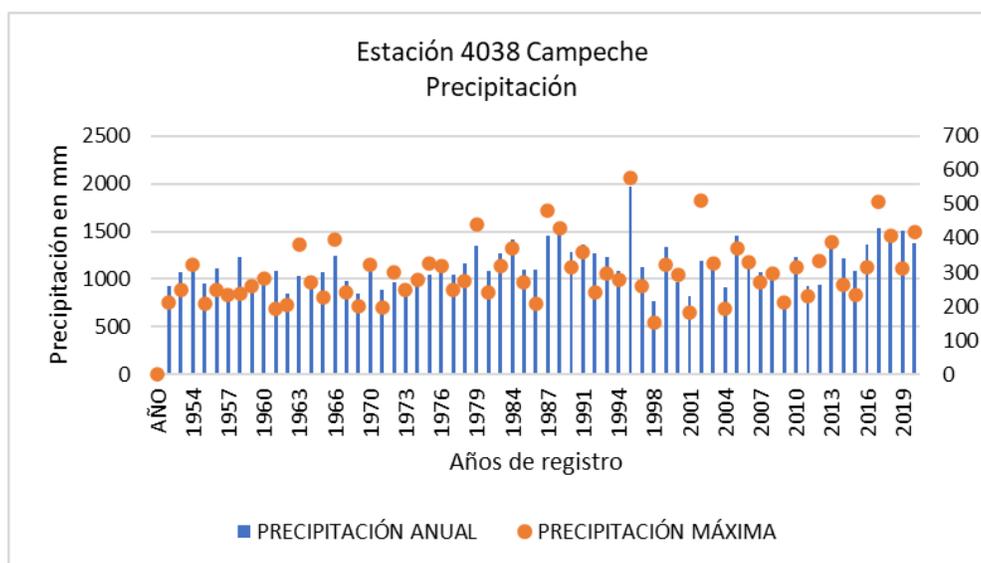
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Precipitación anual
45	2000	2.9	0	2.1	0	50.2	261.6	109.8	291.4	190.8	49.4	2	5	965.2
46	2001	4.4	26	0	5.3	8.8	171.7	180.1	141.4	70.5	137.3	42.1	34.5	822.1
47	2002	83.8	58.1	12.3	0	53.6	43.8	141.9	147.1	511.5	75.9	13.6	45.3	1186.9
48	2003	1	0	25.2	75	12.1	201.5	249.8	325	94.3	156.2	41.2	10.4	1191.7
49	2004	0	41.3	0	0	177	89.3	138.3	193.4	93.3	92.8	69.2	12.3	906.9
50	2005	0	0	1	30	49.4	368.9	146.8	276.7	234.6	319.8	24.7	3.2	1455.1
51	2006	19.5	10.5	1.5	0	104.3	146.4	216.6	328.2	121.4	239.1	25.3	31.8	1244.6
52	2007	40.8	92	8.7	4.1	2.9	82.1	147.3	241.3	172.9	270.5	2.2	0	1064.8
53	2008	20	101.6	1	0	84.7	296.1	24.2	171.1	202.3	225.6	0	1.3	1127.9
54	2009	16	6	0	3	11.3	77.5	125	212.5	122.8	90.5	81.8	9.5	755.9
55	2010	9	10.5	0	12.5	106	314	283.5	233.5	186	42	20	6	1223.0
56	2011	23	2.5	0	0.4	7	230	173	70.5	123.5	191.5	68	39	928.4
57	2012	7.5	9.5	8	0	41.5	333	124	100.3	230.5	84.5	0	0	938.8
58	2013	62	6	0	5	39.5	136.5	287.5	389	197	103	137.5	55.5	1418.5
59	2014	16	15.5	0	35	213	172	117	262.6	176.5	168	10.5	30.5	1216.6
60	2015	26	6	45.5	14.5	41	171.5	83	230.7	232	98.4	111	23	1082.6
61	2016	22.9	9.5	70.5	57	74	188.8	316	257	196	68.5	33	67	1360.2
62	2017	18	40	4	13	18.5	506	251	349	141	159.1	10	24	1533.6
63	2018	21.25	21.75	2.5	27.25	54	407.75	234.5	271.2	171.5	210.8	25	75.3	1522.8
64	2019	24.5	3.5	1	41.5	89.5	309.5	218	193.4	202	262.5	40		1512.0
65	2020	18	2	0	0.5	102	417.5	271.5	189.5	138	176.5	28.5	33	1377.0
68	PRECIPITACIÓN PROMEDIO	27.13	16.15	13.34	14.87	57.95	193.19	195.93	210.29	212.04	128.98	43.22	29.76	1142.86
69	PRECIPITACIÓN MÁXIMA	127.4	101.6	70.5	97.5	369	506	482.1	389	576.1	569.2	159	126.6	1965.8

Figura 11. Registro mensual por año de registro en Excel

Para la construcción de la gráfica se identificó la precipitación máxima mensual histórica, es decir, el que corresponde al acumulado extraordinario (Figura 12). La precipitación anual acumulada sirve para conocer la cantidad de lluvia que se registra a lo largo del año en una región determinada, según el INECC 2022 mientras mayor sea la precipitación anual acumulada, mayor será la exposición ante las inundaciones.



(a) Precipitación mensual



(b) Precipitación anual

Figura 12. Precipitación mensual del registro histórico

6.3.2 Estimación de eventos excedentes a los umbrales

Un umbral de precipitación es un valor crítico para la intensidad de lluvia, de tal manera que si este valor es superado es posible que se esperen talos efectos como desbordamiento de ríos e inundaciones. Por lo tanto, se realizó un análisis para evaluar la tendencia de la precipitación que excede tres umbrales diferentes de precipitación acumulada considerando la metodología expuesta en los trabajos de Rivera et al. 2020 y Rivera et al. 2023.

De acuerdo con Rivera et al. 2020, para un valor de precipitación acumulada a partir 40 mm en el estado de Campeche se inician los encharcamientos e inundación considerables. Por lo anterior, en este trabajo, el primer escenario consistió en evaluar el número de eventos en el que la intensidad de la precipitación supera un umbral de 40 mm en 1 día, para intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. El segundo y tercer escenarios consideraron los eventos excedentes de los umbrales de 50 mm y 60 mm respectivamente para los mismos intervalos de observación.

Para realizar este procedimiento en cada una de las estaciones, por medio del programa Excel, se procesaron los datos de precipitación diaria por medio de la programación de macros, al igual que la implementación de fórmulas preestablecidas en dicho software (Figura 13)

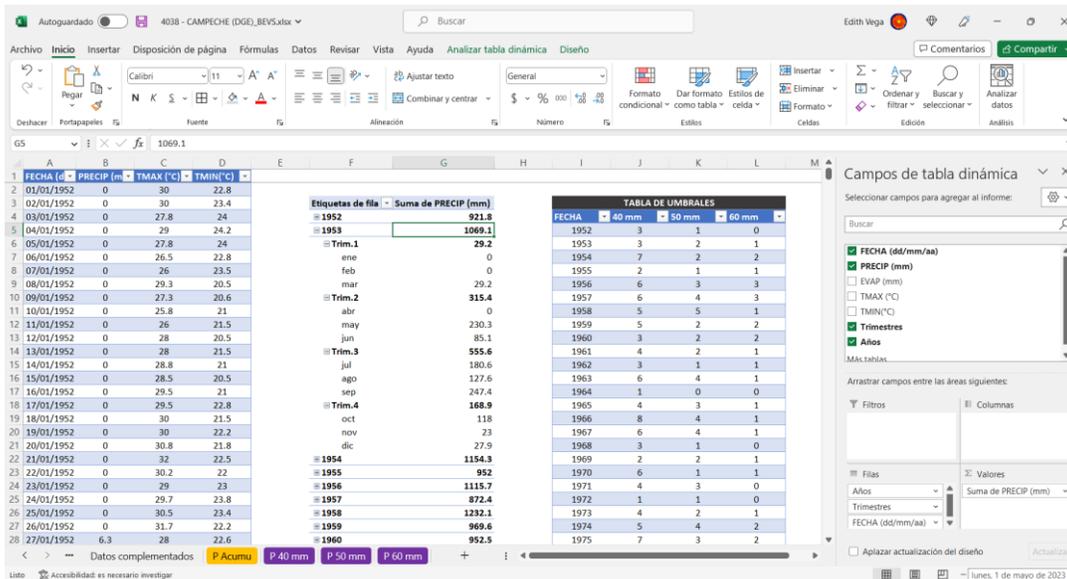


Figura 13. Estimación de eventos excedente de los umbrales establecidos

7 RESULTADOS

Para el análisis de resultados se ubicaron las estaciones climatológicas que se encuentran en la zona costera (Tabla 9) y por medio de las zonas altimétricas se clasificó en cuencas baja, media y alta a aquellas que se encuentran distribuidas en el interior de cada municipio del estado de Campeche. La Tabla 12 muestra cuales son las estaciones que forman parte de la cuenca baja; La Tabla 11 indica aquellas que forman parte de la cuenca media y la Tabla 10 indica las que forman parte de la cuenca alta.

Tabla 9. Estaciones climatológicas ubicadas en la zona costera

Estación	Nombre	Municipio	Registro
4007	El Carmen	Carmen	01/01/1985-31/12/2020
4015	Isla Aguada	Carmen	13/03/1959-31/12/2018
4029	Sabancuy	Carmen	01/01/1954-31/12/2020
4041	Chamotón	Chamotón	01/01/1954-31/12/2020
4038	Campeche	Campeche	01/01/1952-31/12/2020

Tabla 10. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca baja.

Estación	Nombre	Municipio	Registro
4058	Noh Yaxché	Campeche	01/01/1979-31/12/2020
4063	Edzna II	Campeche	01/01/1981-31/12/2018
4071	Pocyaxum	Campeche	01/04/1984-31/12/2018
4084	Tixmucuy	Campeche	01/01/1984-31/12/2018
4024	Nilchi	Campeche	01/01/1953-31/12/2020
4057	Mamantel	Carmen	01/01/1978-31/12/2018
4079	Vista Alegre	Carmen	01/01/1996-31/12/2017
4083	Entre Hermanos	Carmen	01/01/1998-30/12/2018
4086	El Zapote	Carmen	01/01/1996-31/12/2018
4054	Chicbul	Carmen	01/01/1978-31/12/2018
4024	Palizada	Palizada	01/01/1953-31/12/2020
4056	Molino Chumpan	Palizada	01/01/1982-31/12/2018

4031	Silvituc	Escárcega	01/04/1958-31/12/2018
4004	Candelaria	Candelaria	01/01/1948-31/12/2020
4020	Miguel Hidalgo	Candelaria	01/01/1965-31/12/1987
4021	Monclova	Candelaria	01/01/1965-31/12/2020
4082	Pablo T. Burgo	Candelaria	01/01/1998-30/06/2018

Tabla 11. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca media.

Estación	Nombre	Municipio	Registro
4064	Becal	Calkiní	01/01/1983-31/12/2018
4067	Calkiní	Calkiní	01/01/1984-30/11/2013
4028	Pustunish	Chamotón	01/02/1952-31/12/2018
4072	Sihochac	Chamotón	01/01/1982-31/12/2018
4078	Chaccheito	Chamotón	01/01/1996-31/12/2018
4043	Hecelchakán	Hecelchakán	01/01/1986-31/12/2017
4085	Pomuch	Hecelchakán	01/01/1996-31/12/2018
4001	Bolonchén	Hopelchén	01/01/1953-31/12/2020
4017	Iturbide	Hopelchén	01/01/1968-31/12/2018
4077	San Juan Bautista	Hopelchén	01/01/1997-31/12/2018
4059	Tinun	Tenabo	01/01/1979-31/12/2018
4075	Cankí	Tenabo	01/01/1990-31/12/2018
4010	Escárcega	Escárcega	01/01/1944-31/12/2020
4061	Xbonil	Calakmul	01/01/1995-31/12/2018
4070	Dzilbalché	Dzilbalché	01/01/1983-31/12/2018

Tabla 12. Estaciones climatológicas ubicadas en cuenca alta.

Estación	Nombre	Municipio	Registro
4012	Hool	Chamotón	01/06/1962-31/12/2018
4066	Xcupíl	Hopelchén	01/01/1972-31/12/2020
4076	Chunchintok	Hopelchén	01/01/1989-31/12/2018
4037	Zoh Laguna	Calakmul	01/01/1983-31/12/2018

4080	Alvarado	Calakmul	01/02/1998-31/12/2018
4081	Cristobal Colón	Calakmul	01/01/1998-30/01/2018
4013	Hopelchén	Hopelchén	01/01/1982-31/12/2020

7.1 Tendencias de precipitación anual

Conocer la precipitación anual acumulada nos da la magnitud de la lluvia que cae en una región. En los resultados obtenidos se encontraron valores máximos de precipitación que varían entre los 1700 y 2500 mm anuales; sin embargo, existen estaciones donde los registros de precipitación indican valores máximos anuales entre los 3000 y 4000 mm, ejemplos de ello es en 1940 con precipitación máxima de 3480.7 mm en la estación 4008 (Champotón) y de 4007.4 mm anuales en la estación 4012 (Hool) en el año de 1977. Por otro lado, los valores mínimos de precipitación fueron variando entre los 500 a 900 mm, asociados a aquellos años donde hubo mayores periodos de sequías en el estado de Campeche. La mayor parte de las estaciones registraron mayores incrementos de precipitación en los años de 1995, 2002 y 2013 asociados a los huracanes que impactaron al estado de Campeche como Opal y Roxana (1995), Isidore (2002), la tormenta tropical Barry y Fernand en 2013.

Aquellas estaciones que tienen un periodo de registro a partir del año de 1950 en adelante y terminan en 2020, como las estaciones de Bolonchén, Candelaria, El Carmen, Hopelchén, Monclova, Escárcega, Palizada, Campeche y Champotón también registraron valores altos de precipitación en el año de 1985 y 2020; cabe resaltar que en 1985 el estado fue impactado por el huracán Gilberto, mientras que en el año 2020 por el huracán Cristóbal y otros ciclones tropicales como el huracán Gamma, Delta, Zeta y Etta.

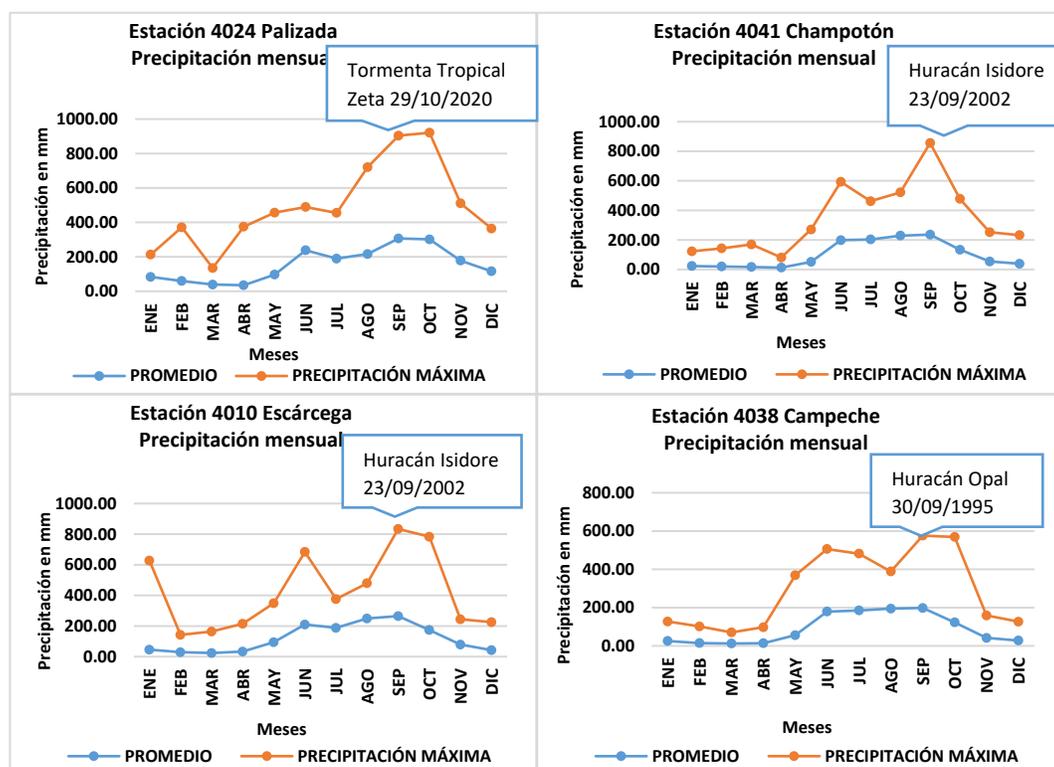
En general se observó que la precipitación anual ha ido variando de manera distinta en cada una de las estaciones a nivel regional, es decir, que se encontraron estaciones que presentaron un incremento en la línea de tendencia de precipitación anual acumulada en 5 y 10 años y otras en donde se observa un decremento; sin embargo, hubo estaciones que, a pesar de presentar incrementos o decrementos, la línea de tendencia anual de 1 año se mostró neutra.

La zona ubicada al sur del estado como los municipios de Calakmul, Palizada, Candelaria y Carmen presentaron una disminución en su tendencia, a excepción de las 4004 de Candelaria que si mostró un incremento al igual que las estaciones de Isla Aguada y Sabancuy ubicadas en

la zona de costera del municipio de Carmen. La zona central del estado donde se encuentran los municipios de Champotón y Hopelchén mostraron una tendencia negativa y para las estaciones ubicadas en la zona norte se notó mayormente un incremento.

Tendencias de precipitación mensual

Con base en el análisis de la precipitación mensual acumulada de cada una de las estaciones seleccionadas, se observó el comportamiento de la precipitación a lo largo de los meses (Figura 14). En la Figura 14, las gráficas muestran el promedio y la precipitación máxima en cada uno de los meses a lo largo del periodo de registro de cada estación, al igual que se muestra el fenómeno meteorológico al que está relacionado el mes que presenta el incremento. Como se puede observar las gráficas indican un aumento de precipitación en aquellos meses que corresponden a las épocas de lluvias (Mayo-Octubre), seguido de aquellos meses correspondientes a frentes fríos (Noviembre-Enero), mientras que en las épocas de secas (Febrero-abril) se nota una disminución.



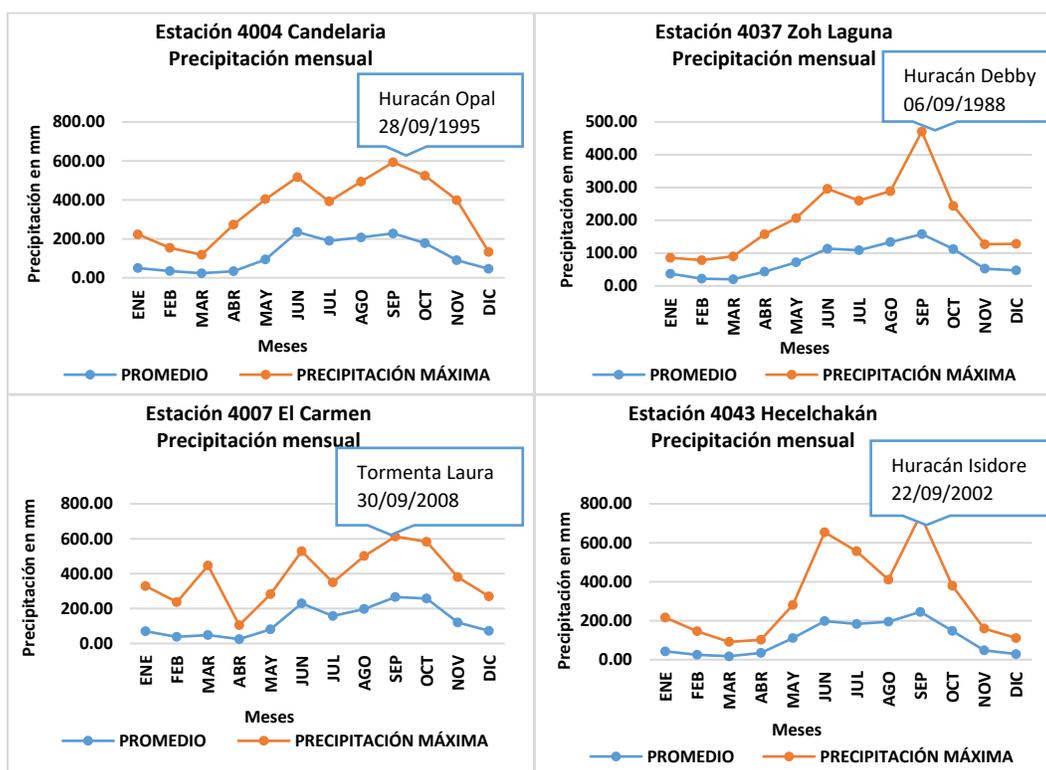
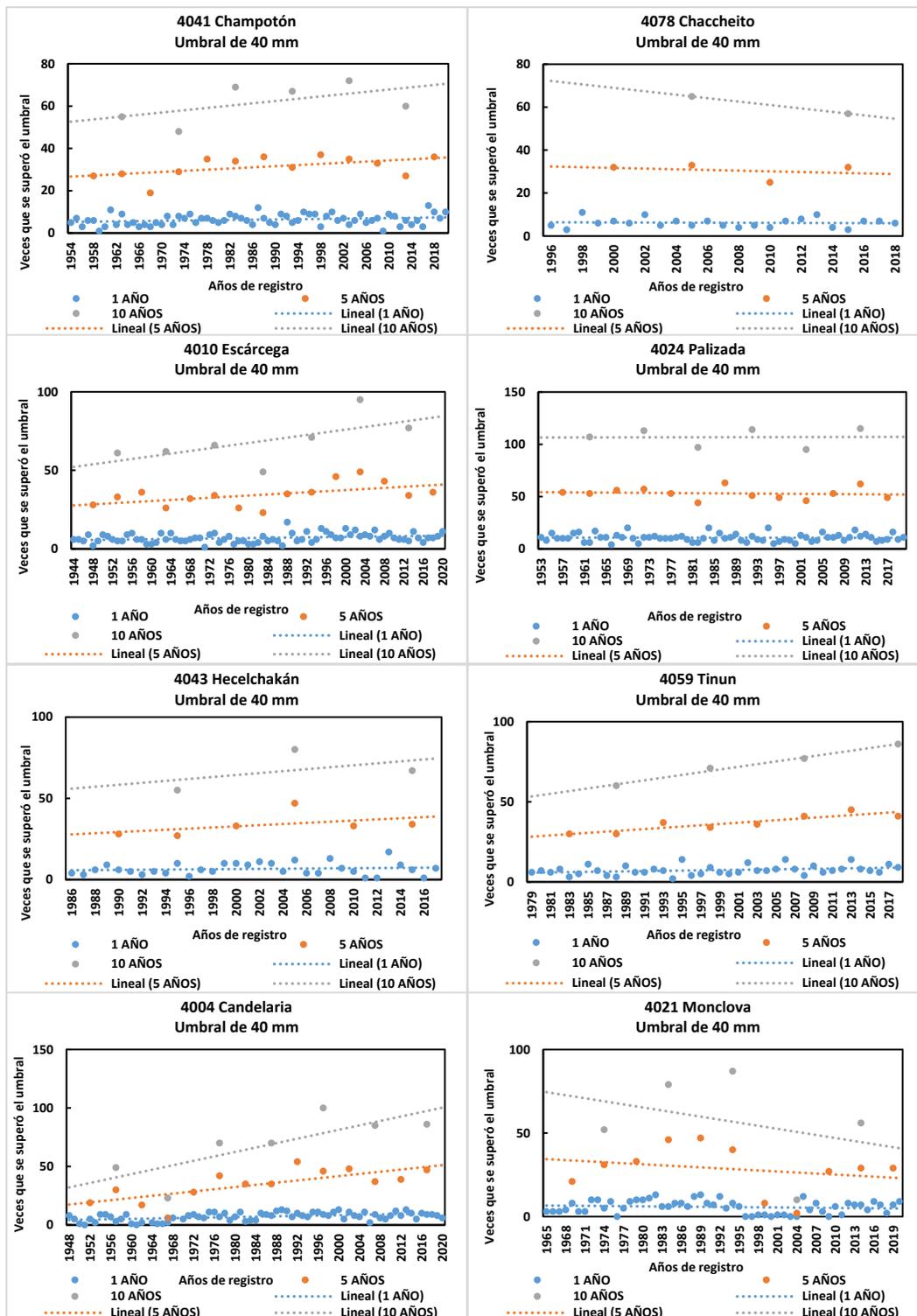
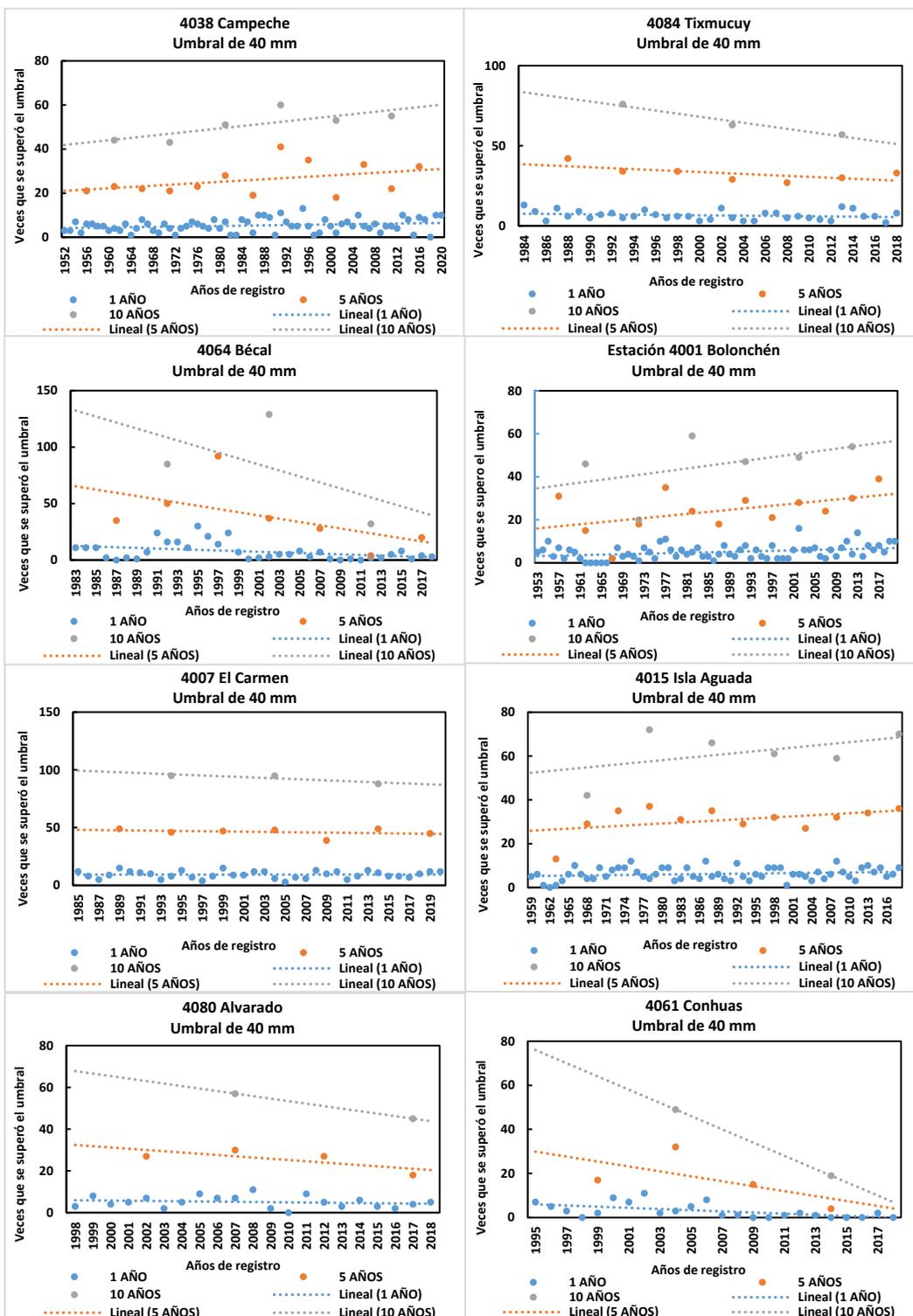


Figura 14. Precipitación mensual histórica de las estaciones del estado de Campeche.

7.2 Eventos excedentes a los umbrales de precipitación

Se trazaron las gráficas para conocer el comportamiento del número de eventos que excedieron los umbrales de 40, 50 y 60 mm, para intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. En la Figura 15, se observan las tendencias para las estaciones que superan los 40 mm; la Figura 16, presenta aquellas estaciones que superaron los 50 mm y la Figura 17, aquellas que superan los 60 mm de precipitación acumulada.





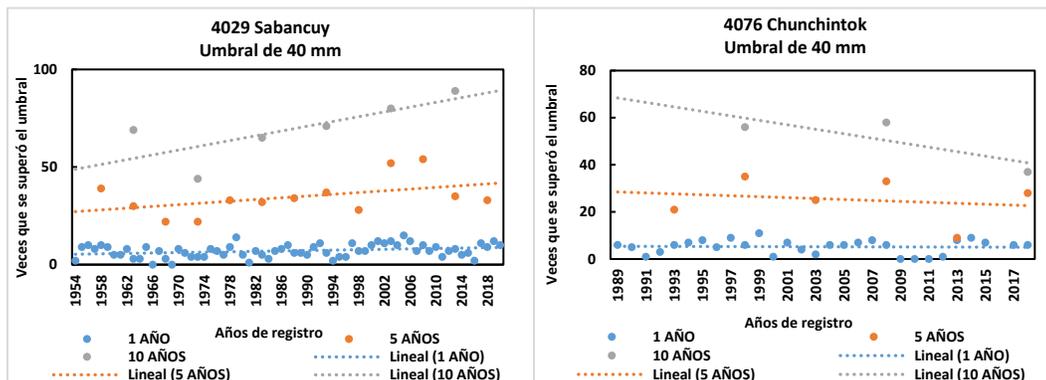
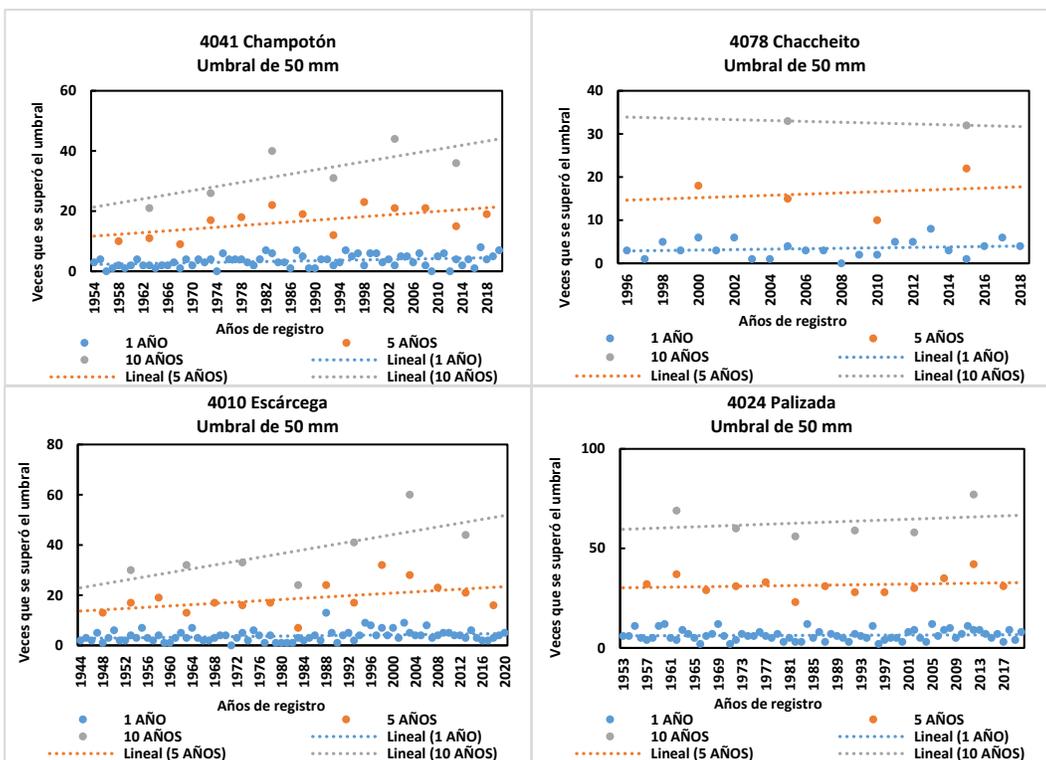
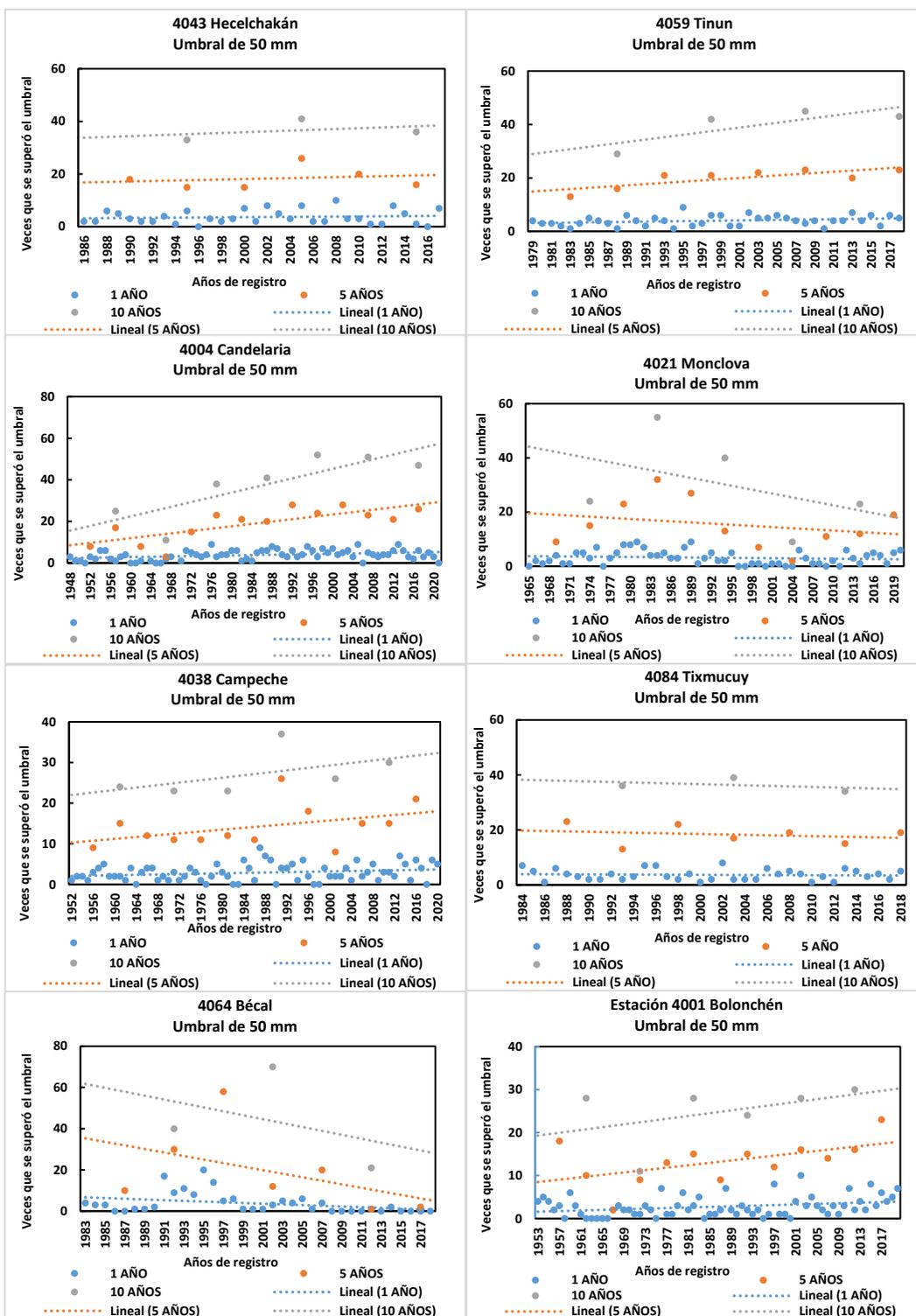


Figura 15. Eventos excedentes del umbral de 40 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica





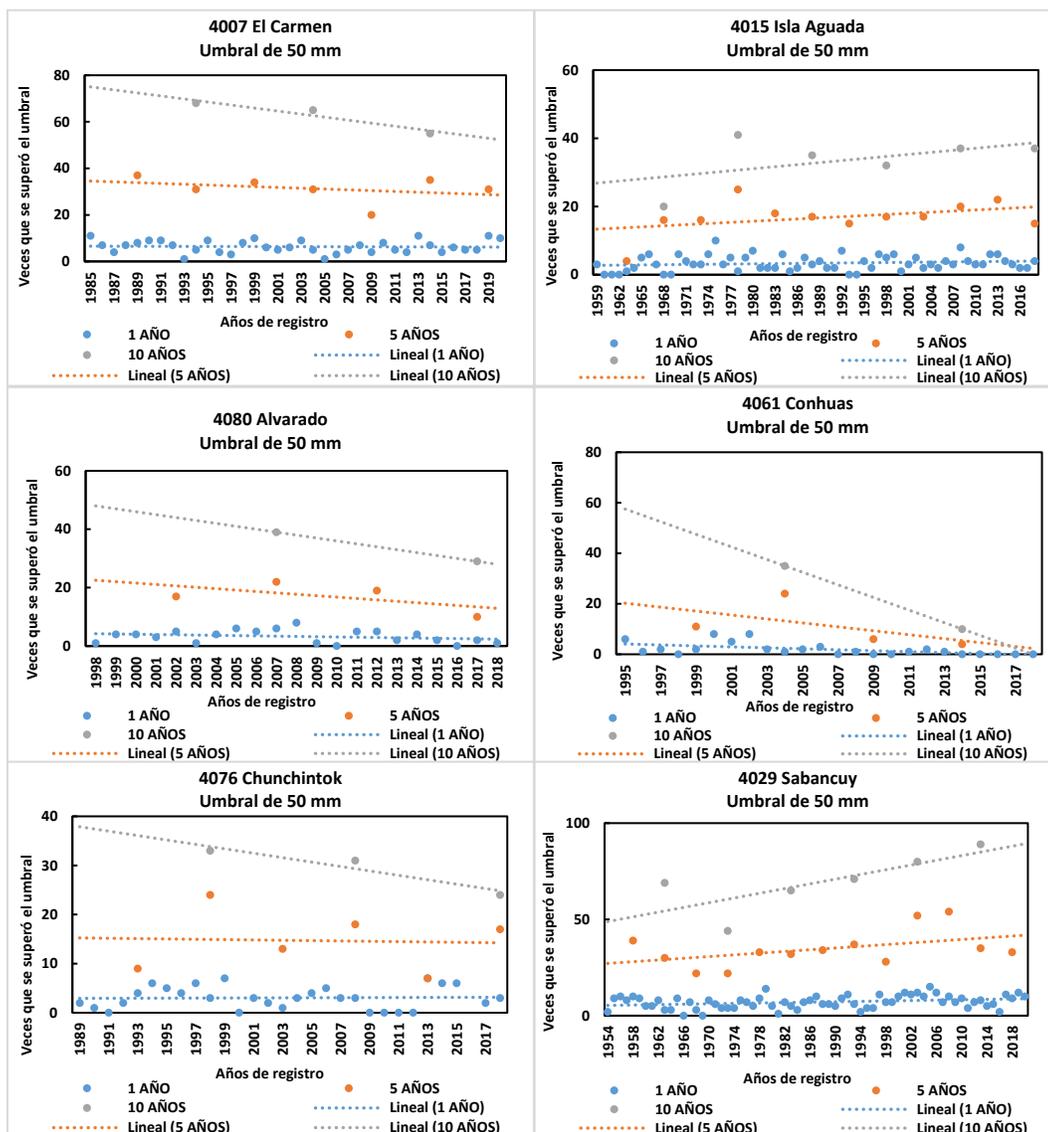
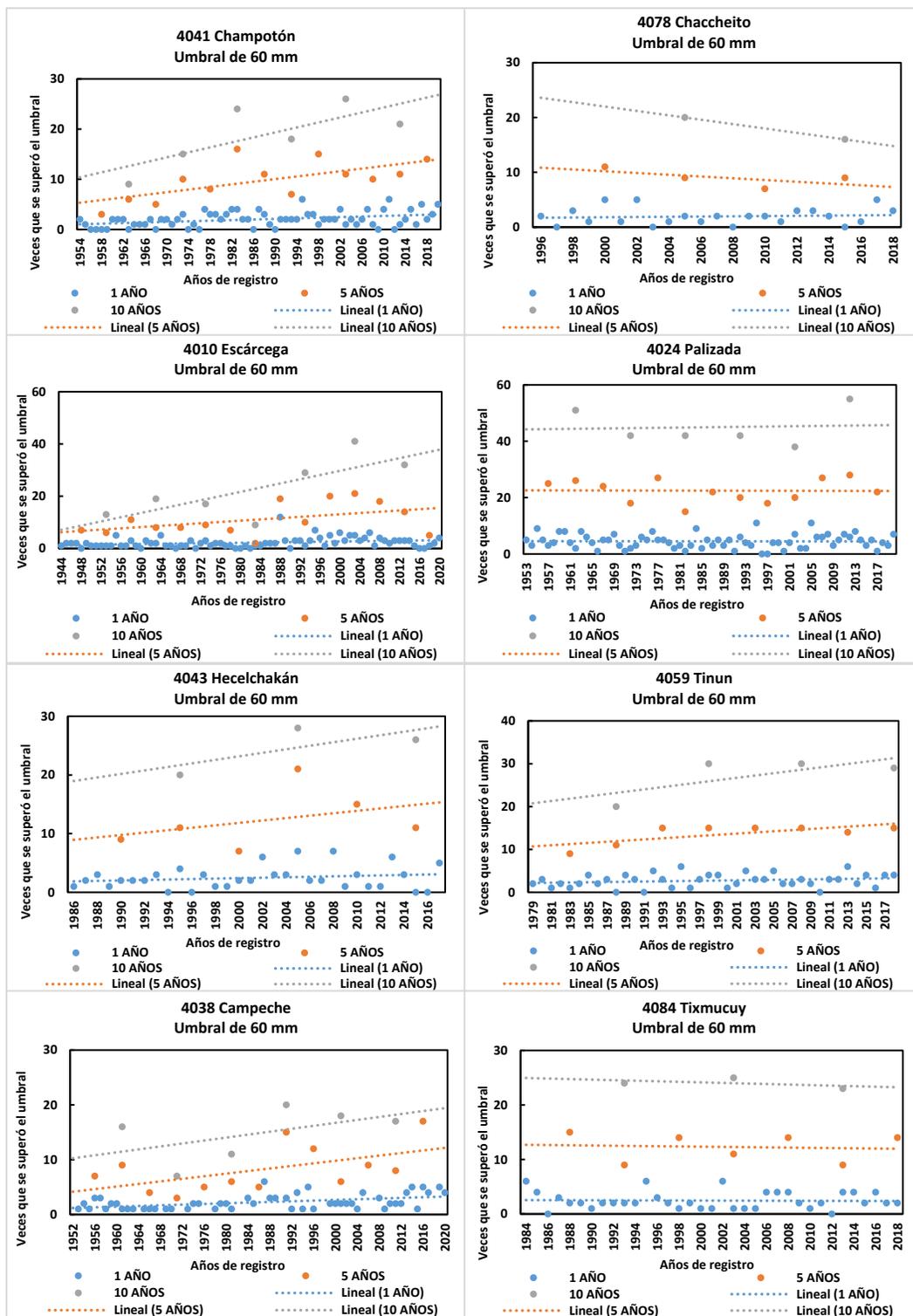
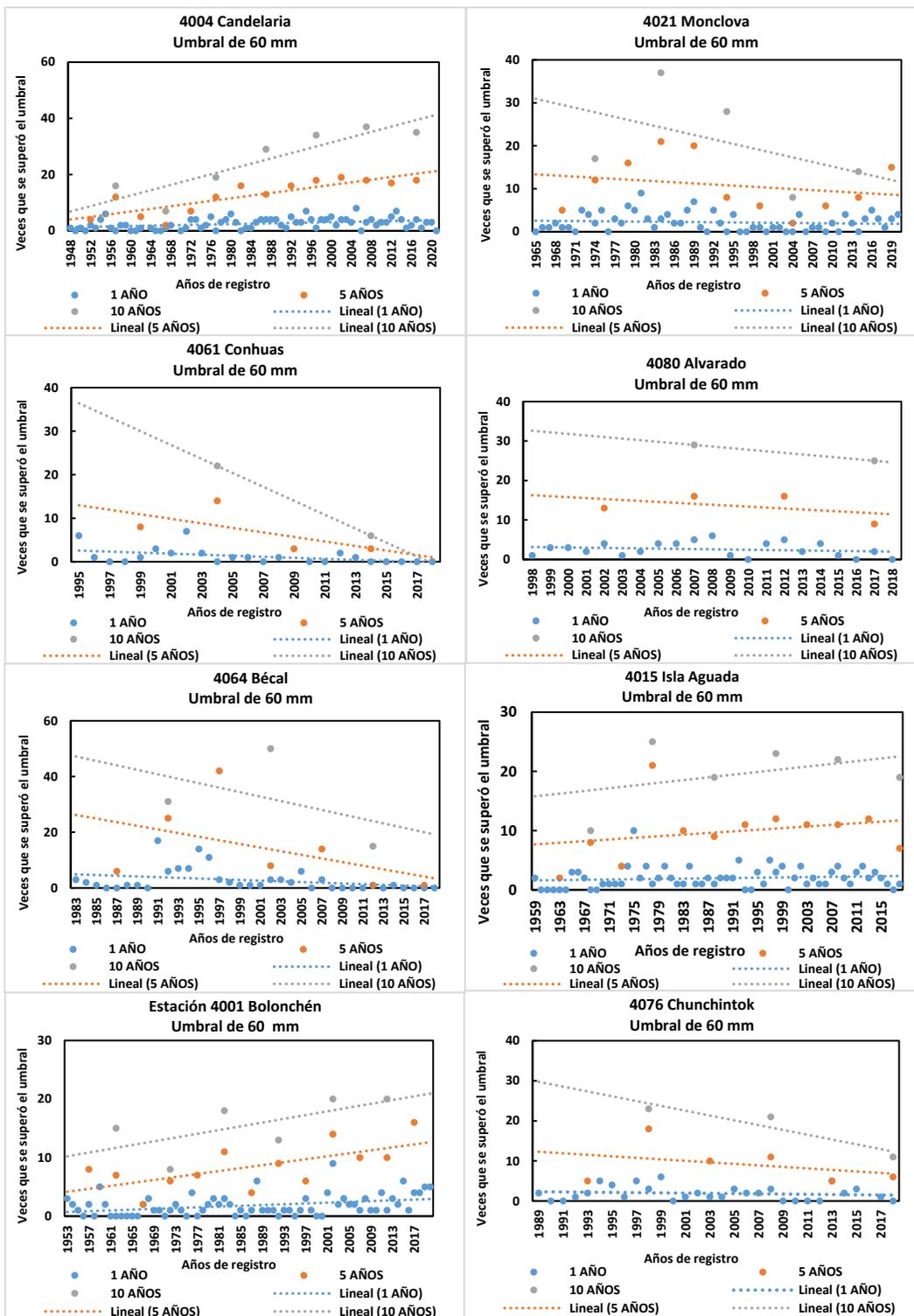


Figura 16 Eventos excedentes del umbral de 50 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica.





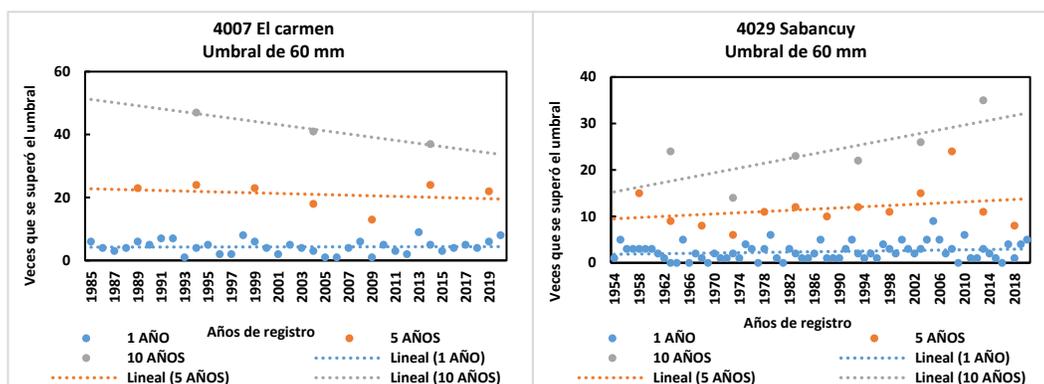


Figura 17. Eventos excedentes del umbral de 60 mm de precipitación acumulada en 24 h, intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Estaciones ubicadas en zona costera y distribuidas por zona altimétrica.

En la Figura 18, se muestran las estaciones del análisis anterior distribuidas en zona costera y en cuenca baja, media y alta, como se puede observar en cada una de las gráficas, se notan tres tipos de comportamientos; el primero consiste en aquellas estaciones que presentan un incremento a lo largo del registro, del número de veces que los umbrales fueron excedidos; el segundo consiste en aquellas estaciones en el que el comportamiento tiende a presentar una disminución en el número de veces que el umbral fue superado y en el tercero el comportamiento que se presenta suele ser neutro, es decir, que las tendencias no presentan un comportamiento definido en la disminución y aumento de los umbrales seleccionados.

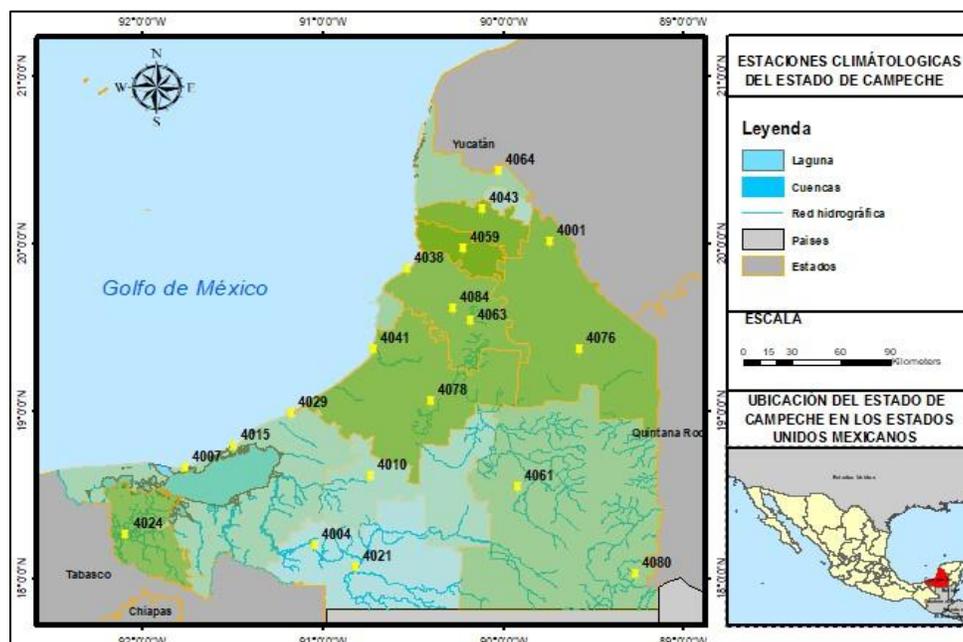


Figura 18. Estaciones climatológicas analizadas en zona costera y por zona altimétrica.

7.3 Presentación de resultados por medio de ArcGis

En base a los resultados obtenidos por medio del programa de Arcgis 10.8, se creó un Sistema de Información Geográfica, donde se presentaron a las estaciones que fueron seleccionadas para su análisis, agregando la información de cada una de ellas, así también como las gráficas que obtenidas para identificar el comportamiento de la precipitación (Figura 19).

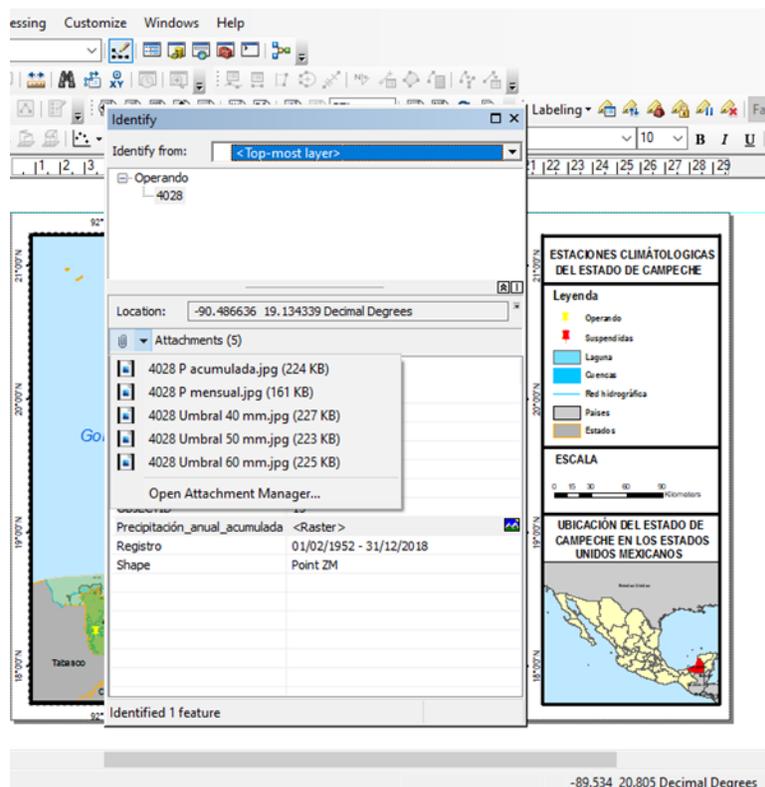


Figura 19. Sistema de Información Geográfico (SIG) construido en ArcGIS 10.8 (ESRI, 2023)

El Sistema de Información Geográfico (SIG) construido tiene un sistema de consulta por estación climatológica, como primer paso se debe abrir el archivo y en la parte superior de la cinta de herramientas se selecciona la herramienta "Identify" (Figura 20), una vez activada la herramienta, se ubica alguna estación de interés que se encuentra en el mapa y se selecciona mediante un clic, enseguida aparecerá la tabla con la información de las estaciones (Figura 21), ahí mismo en la parte donde dice precipitación acumulada, se da un clic donde dice "Raster" y nos aparecerá la gráfica con el comportamiento de la precipitación acumulada anual, de igual forma si queremos ver las gráficas donde se encuentran la precipitación mensual y la de los umbrales, seleccionamos la parte de "Attachments" y ahí se encontraron adjuntadas cada una

de las gráficas de dicha estación, al darle clic se abrirán automáticamente en formato "jpg" (Figura 21).



Figura 20. Botón "Identify" en ArcGis 10.8 (ESRI,2023)

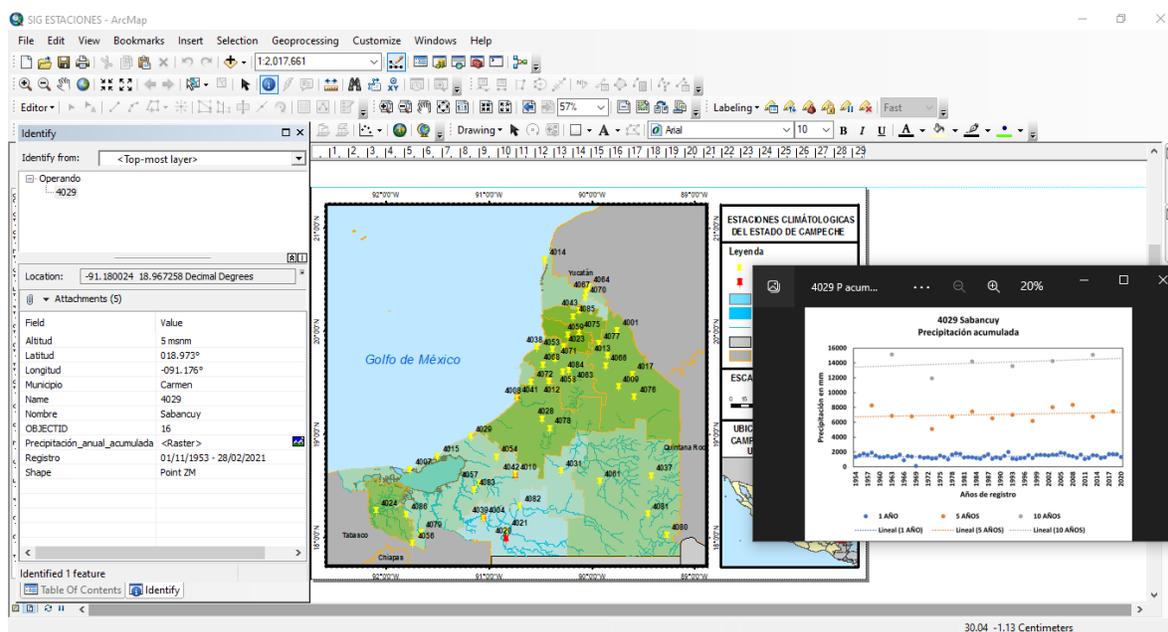


Figura 21. Gráficas de las estaciones climatológicas en ArcGIS 10.8 (ESRI, 2023).

8 DISCUSIÓN

8.1 Precipitación anual

En los resultados obtenidos se identificó que la magnitud de la precipitación anual a lo largo de los años ha sido variable en cada una de las estaciones, dependiendo de la región en las que se encuentran, es decir, que hubo estaciones en las cuales se presentó una tendencia de incremento a lo largo de su periodo de registro y otras en donde la tendencia ha sido a la baja. Las estaciones ubicadas en zona costera, las estaciones de Sabancuy, Champotón, Campeche presentaron una tendencia positiva en su precipitación acumulada anual acumuladas en 1, 5 y 10 años, la estación de Isla Aguada presento una tendencia neutral en su precipitación acumulada anual mientras que en sus acumulados de 5 y 10 su tendencia fue positiva, por otro lado, la estación de Carmen la tendencia fue negativa. Para las estaciones ubicadas según su zona altimétrica, aquellas que se encontraron ubicadas en la zona de cuenca baja su tendencia varía entre negativa y positiva, las estaciones que presentaron una tendencia positiva en su línea de tendencia fueron la de Candelaria, Nilchí, Silvituc, Mamantel y Pocyaxum. La estación de Miguel Hidalgo y Monclova presentó una tendencia positiva en su acumulado de 5 y 10 años mientras que su tendencia de acumulado anual fue neutra, por otro lado, las estaciones de Palizada, Molino Chumpan, Edzna II, Vista Alegre, Pablo T. Burgos y El zapote presentaron una disminución en sus tendencias, Chicbul, Noh Yaxché, Entre hermanos y Tixmucuy su tendencia fue neutra, pero sus acumulados de 5 y 10 presentaron una disminución. Las estaciones ubicadas en la zona de cuenca media la mayoría presentó un incremento, las estación de Bolonchén, Escárcega, Iturbide, Hecelchakán, Calkini, Dilbalché y Sihochac presentaron un incremento en sus tendencias, mientras que la estación de Conhuas y Becal presentaron una disminución, Por otro lado, Pustunish, San Juan Bautista, Chaccheito y Pomuch presentaron una tendencia neutra, con una disminución en precipitación anual acumulada cada 10 años, lo mismo con la estación de Canki y Tinun pero con un incremento. Finalmente, las estaciones ubicadas en zona de cuenca alta, casi todas presentaron una disminución, a excepción de Hool que presento una tendencia neutra en todos sus acumulados.

De manera general se notó un incremento de precipitación máxima en los años de 1985, 1995, 2002 y 2013, asociados a aquellos huracanes y tormentas tropicales que impactaron a nuestro estado, como Gilberto en 1985, Ópal y Roxanne en 1995, Isidore en 2002 y las tormentas

tropicales Barry y Fernand en el 2013, según la información del CENAPRED. En las estaciones de Bolonchén, Candelaria, Carmen, Escárcega, Hopelchén, Palizada, Sabancuy, Campeche, Noh Yaxche, Xcupíl, Monclova y Champotón que terminan su registro en 2020, también se identificó un incremento de precipitación en ese último año, que de igual forma es asociado a los ciclones que afectaron a nuestra entidad. Las precipitaciones máximas fueron variando entre los 1800 y 2500 mm aproximadamente, mientras que las precipitaciones mínimas fueron entre los 400 y 900 mm asociados a las épocas de secas. Los municipios de Calakmul, Palizada, Carmen y Candelaria fueron los que más registraron una disminución en su tendencia de precipitación.

8.2 Precipitación mensual

La precipitación mensual es un indicativo del comportamiento de la precipitación estacional a lo largo del año, como se observó todas siguen el comportamiento de las épocas climáticas, presentando incrementos de precipitación en los meses de mayo octubre (época de lluvias), mientras que en épocas de frentes que corresponden a los meses de noviembre a enero se presentan una pequeña disminución y finalmente en las épocas de secas que corresponden a los meses de febrero a abril las lluvias disminuyen todavía más. Se observó que la mayoría de los meses donde más se obtuvo la precipitación máxima mensual fueron los meses de septiembre relacionados a fenómenos meteorológicos como el huracán Isidore en 2002, seguidos de Octubre y Junio que de igual manera tuvo relación aquellos años en donde el estado fue impactado por ciclones tropicales.

8.3 Eventos excedentes de los umbrales de precipitación

En los resultados obtenidos se observaron tres tipos de patrones para cada uno de los umbrales, el primer patrón indica estaciones que presentaron una tendencia positiva de los eventos que exceden los umbrales establecidos, un segundo grupo de estaciones presenta un patrón con tendencia negativa y finalmente, un tercer grupo que indica una tendencia neutral. En los resultados se observó que las estaciones que forman parte de la zona costera como la estación de Sabancuy, Isla Aguada, Champotón y Campeche mostraron un aumento en la cantidad de eventos donde la precipitación supera el umbral establecido a excepción de la 4007 de Carmen, la 4008 de Champotón que se encuentra suspendida y de la 4014 de Isla Arena ubicada en el

municipio de Calkiní que presentaron una disminución en los días que superaron el umbral. Por otro lado, en las estaciones que se encuentran ubicadas en el interior del estado de Campeche y distribuidas según su zona altimétrica, las estaciones que se encuentran ubicadas en la zona de cuenca baja (Figura 22), la mayoría mostró un incremento en los días que superaron los umbrales, la estación de Candelaria, Nilchí, Silvituc, Molino Chumpan, Mamantel, Noh Yaxché, Pocyaxum y Miguel Hidalgo; la estación de Palizada y Chicbul presentaron una tendencia neutra en el umbral establecido de 40 mm, mientras que en el de 50 y 60 mm se presentó un incremento; La estación de Monclova, Edzna II, Pablo T. Burgos, Entre Hermanos, Tixmucuy y el zapote presentaron una tendencia negativa en los días que superaban los umbrales establecidos y la estación de Vista Alegre mostro un incremento en los días que superan el umbral de 40 mm, mientras que en el de 50 y 60 se mostró una disminución. Por otro lado, las estaciones que se encuentran distribuidas en la zona de cuenca media (Figura 23), el número de días que superaron los umbrales se encontró en la mayoría de las estaciones. Las estaciones que los superaron fueron Bolonchén, Escárcega, Iturbide, Pustunish, Hecelchakán, Tinun, Calkini, Dzilbalché, Sihochac y Canki, mientras en la que se presentó una disminución fueron Conhuas, Becal y San Juan Bautista. Finalmente, las estaciones que se encuentran en zona de cuenca Alta (Figura 24) la mayoría presentaron una disminución a excepción de la de Zoh Laguna, Xcupil y Hool que presento un ligero incremento; las estaciones que mostraron las disminuciones fueron Hopelchén, Chunchintok, Alvarado, China y Cristobal Colón.

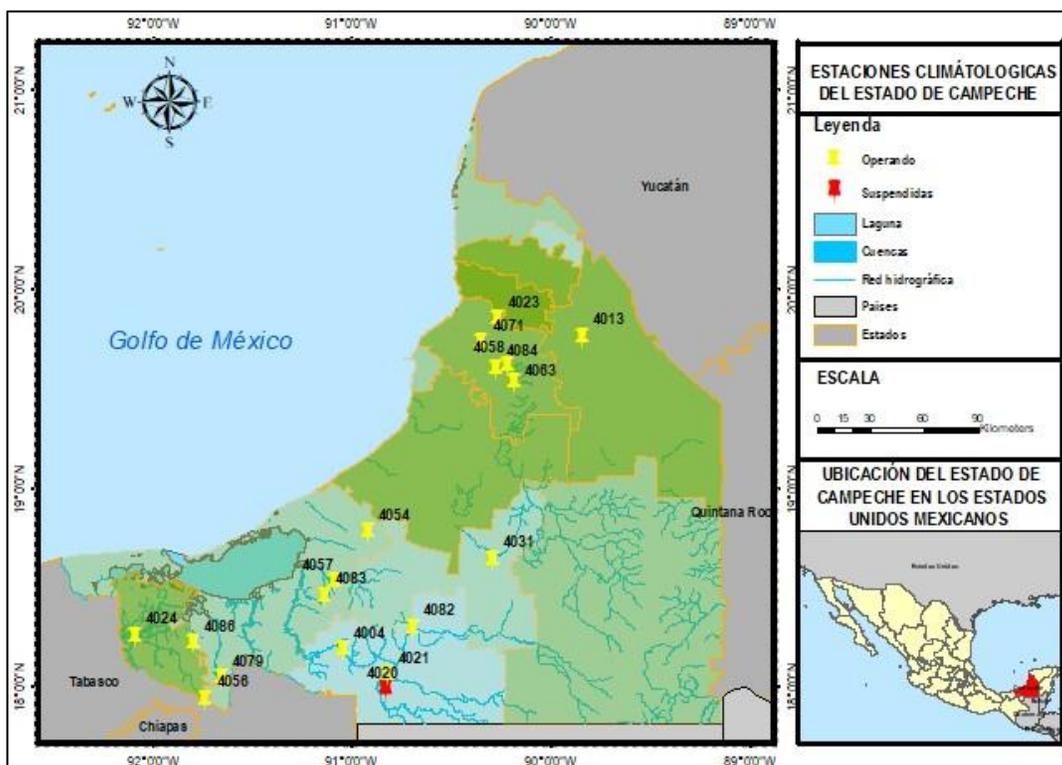


Figura 22. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica baja.

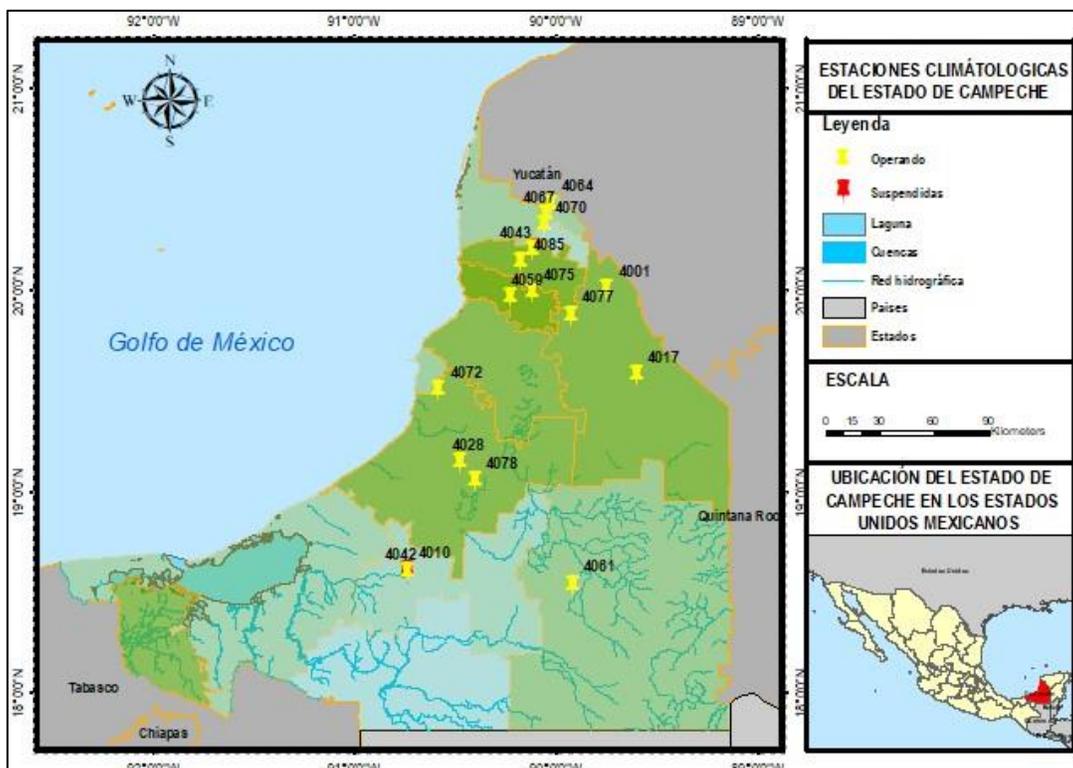


Figura 23. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica media.

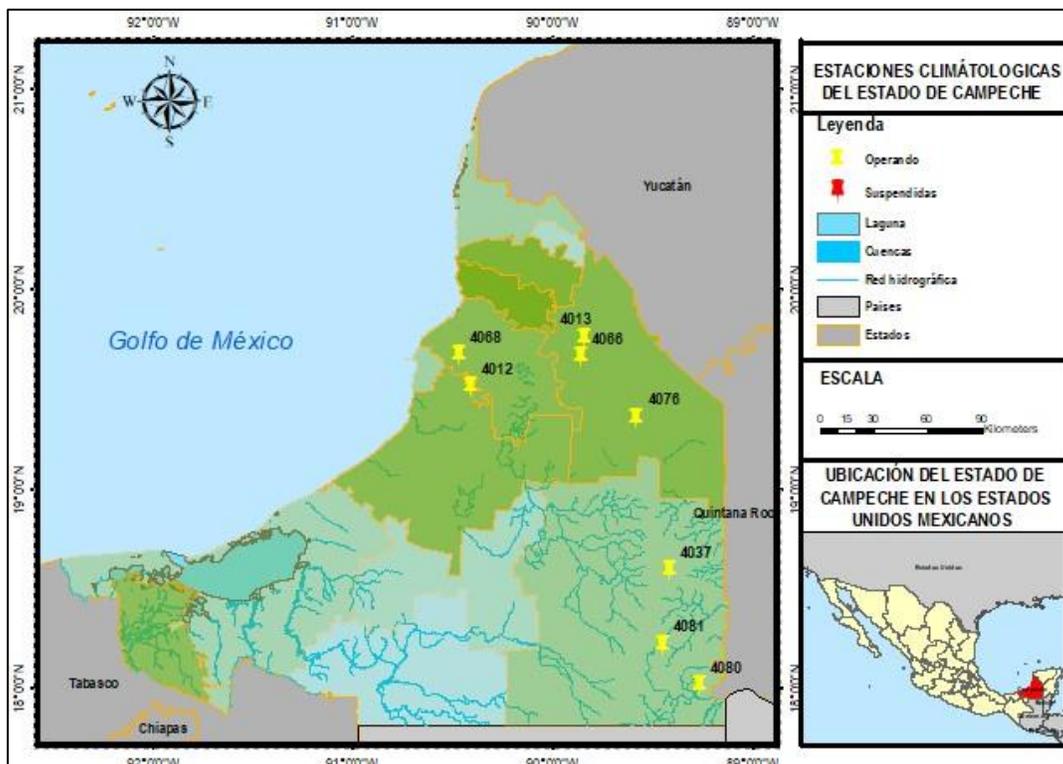


Figura 24. Estaciones ubicadas en la zona altimétrica alta.

Como se puede observar en la Figura 25 la precipitación varía en el estado de Campeche dependiendo la zona altimétrica, se puede observar que la zona altimétrica perteneciente a la zona baja y zona costera se presenta una tendencia positiva en el número de eventos que exceden los umbrales, mientras que la zona de Laguna de Términos al sur y la zona de Calakmul presentan una tendencia negativa.

9 CONCLUSIONES

Es un hecho que el cambio climático influye en todo el mundo y genera, cada vez más, diferentes comportamientos en los patrones de precipitación extremas. El estado de Campeche no es la excepción, ya que se han presentado variaciones en el comportamiento histórico de la precipitación, que en muchas ocasiones han sido la principal causa de las inundaciones. Por lo tanto, es de gran importancia el sistema de estaciones climatológicas distribuidas en el estado que cuentan con registros puntuales de precipitación diaria que nos permite monitorear el comportamiento de la precipitación, estimar las variaciones a largo a corto, mediano y largo plazo, así como, los eventos extraordinarios que se presentan con más frecuencia.

El estado de Campeche cuenta con 82 estaciones climatológicas de las cuales no todas cuentan con información completa en sus registros de precipitación, probablemente debido a fallas en los aparatos o en las lecturas, por lo cual se seleccionaron aquellas que cumplen con criterios de calidad y cantidad de información, es decir, un registro mínimo de 20 años continuos de medición.

En los resultados se observó que el comportamiento de la precipitación en el estado de Campeche ha ido variando, dependiendo de la región; para la precipitación acumulada anual se obtuvieron registros máximos entre los 1700 y 2500 mm y mínimos entre los 400 y 900 mm, mostrando un aumento sobre todo en aquellos años en donde el estado fue impactado por fenómenos meteorológicos como los ciclones tropicales.

El comportamiento de la precipitación mensual representó el comportamiento de las épocas climáticas, con aumentos de precipitación en los meses de Mayo a Octubre correspondientes a la época de lluvias y disminuciones en los meses de Febrero a Abril correspondientes a las épocas de secas.

En estudios pasados se han establecidos umbrales que nos permiten conocer cuál es el valor crítico de precipitación en el cuál una región comienza a tener problemas de inundación, para el estado de Campeche Rivera et al. 2020 indicó que el estado comienza a tener problemas de inundación a partir de 40 mm por lo cual en este trabajo se toma dicho valor como base en los análisis de la precipitación.

Se establecieron tres umbrales de precipitación, 40, 50 y 60 mm de precipitación acumulada en 24 h, para intervalos de observación de 1, 5 y 10 años. Los resultados obtenidos en análisis de excedentes de los umbrales mencionados indican 3 patrones de comportamiento diferente, un

primer patrón, engloba estaciones en donde la tendencia de excedentes es positiva, dichas estaciones se encuentran en las zonas costeras, así como también aquellas estaciones ubicadas en la zona altimétrica baja. Un segundo grupo de estaciones presentó una tendencia negativa en el número de eventos que excedieron los umbrales analizados, estas estaciones en su mayoría se encuentran ubicadas en la zona altimétrica alta. Finalmente, las estaciones ubicadas en la cuenca media presentaron un comportamiento nulo en su línea de tendencia.

El comportamiento anterior indica que en la mayoría de las estaciones analizadas el número de eventos que exceden los umbrales de precipitación han aumentado, sin embargo, la precipitación anual, en promedio se ha mantenido.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo, aportan información útil para el diseño y rehabilitación de las obras hidráulicas del estado de Campeche, que ayudará en la evaluación de escenarios del cambio climático y los recursos hídricos del estado, así como también servirá como base para estudios futuros relacionados con la resiliencia y vulnerabilidad ante fenómenos relacionados con el cambio climático.

10 RECOMENDACIONES

- El estado de Campeche cuenta un sistema de medición de estaciones climatológicas que permiten el monitoreo de diversas variables ambientales, sin embargo, es recomendable que se habiliten nuevas estaciones que permitan la medición en zonas remotas de difícil acceso, lo anterior permitirá una mejor caracterización regional de la precipitación.
- El presente trabajo muestra un análisis con registros de precipitación en la mayoría de las estaciones hasta el año 2018 y en algunas otras hasta 2020. Se recomienda que el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) actualice los registros en tiempo real.
- Realizar un estudio más detallado a nivel de cuencas y microcuencas que permitan elaborar los planes de manejo para la adaptación y mitigación ante los efectos del cambio climático.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, K., Shahid, S., Ismail, T., Nawaz, N. y Wang, X. J. (2018). Absolute homogeneity assessment of precipitation time series in an arid region of Pakistan. *Atmósfera*, 31(3), 301-316. <https://doi.org/10.20937/atm.2018.31.03.06>
- Álvarez, G. y Escalante, C. A. (2016). Análisis de frecuencia no estacionario de serie de lluvia anual. *Tecnología y Ciencia del Agua*. 7(1), 71-88.
- Antelo, M.R. y Fernández Long, M.E. (2014) Estimación de datos faltantes de precipitación diaria para las distintas ecorregiones de la República Argentina. Recuperado el 27 de diciembre 2022 de <https://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.02.pdf>
- Arreguín Cortés, F.I., López Pérez, M., Rodríguez López, O. y Montero Martínez, M.J. (2015), Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología y Agua, 148p.
- Audefroy, J. (2015). Potential effects of climate change on the habitat in Mexico. *Disaster Prevention and Management*, 24(2), 249-262. <https://doi.org/10.1108/DPM-08-2014-0166>
- Ayllón, T. (2003). *Elementos de meteorología y climatología*. México: Trillas.
- Blanco, P.S. (2020). La intensidad de las precipitaciones y el cambio climático: tendencias y variabilidades interanuales registradas en algunas localidades del Nordeste Argentino (Periodo 1971-2019). *Revista Geográfica Digital*, 17(33), 46-63. <http://dx.doi.org/10.30972/geo.17344481>
- Breña Puyol, A. F. y Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Casas, M. C., Rodríguez, R., Lana, X., Serra, C., Martínez, M. D., Biere, R., Arellano, B. y Roca, J. (2019). Consecuencias hidrológicas del cambio climático en entornos urbanos. En XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: “Challenges and paradigms of the contemporary city”: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Barcelona: CPSV, 2019, p. 8291. E-ISSN 2604-6512. <http://dx.doi.org/10.5821/ctv.8291>

- Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil* (2º, ed.) Perú: CONCYTEC.
- Conde, C., (2011). México y el cambio climático global. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde, C., (2011). *México y el cambio climático global*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Corte, J., Qian, B., y Xu, H. (1998). Regional climate change in Portugal: precipitation variability associated with large-scale atmospheric circulation. *Int. J. Climatol*, (18):619-635.
- Cortez, A., Rodríguez, M. F., Rey, J. C., Ovalles, F., González, W., Parra, R. M., Olivares, B. y Marquina, J. (2016). Variabilidad espacio temporal de la precipitación en el estado Guárico, Venezuela. *Rev. Fac. Agron (Luz)*. (33), 292-310.
- Escobar, E., Bonilla, M., Badán, A., Caballero, M. y Winckell, A. (2001). Los efectos del fenómeno el Niño en México 1997-1998 (1º. Ed). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Esparza, M. (2013). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, (89), 193-219.
- García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM. (50), 67-76.
- García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM. (50), 67-76
- González, A. y Muñoz, A. A. (2013). Cambios en la precipitación en la Ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años. *Bosque (Valdivia)*, 34(2), 191-200. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000200008>
- Hernández, B., Aceves, L. A., Arrieta, A., Juárez, J. F., Méndez, M., y Ramos, C. (2016). Evidencias del cambio climático en el estado de Tabasco durante el periodo 1961-2010. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (14), 2645-2656.
- INECC (2019). *Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Edición (libro electrónico)*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. México. Disponible en: <https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC LibroDigital.pdf>

- INECC (2022) López-Díaz, F., Nava Assad Y.S., Rojas Barajas, M., González Terrazas, D.I. *Guía de Escenarios de Cambio climático para Tomadores de Decisiones*. Pp65
- INEGI (2021). Aspectos geográficos del estado de Campeche.
- IPCC (2014). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., y White, L. L., Eds)., Cambridge University Press, Cambridge, 1132 p.
- IPCC (2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (Masson, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma, W., Peán, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X, Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. and Waterfield, T. (eds). In press.
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Technical Summary. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Pörtner, H-O., Roberts, D. C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37-118
- IPCC, (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A., Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Landa, R., Ávila, B. y Hernández, M. (2010). Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para América Latina y el Caribe. Conocer para Comunicar. British Council, PNUD México, Cátedra UNESCO-IMTA, FLACSO México, México D.F. 140 pp.

- Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros* (2ª. Ed.). México: McGraw-Hill.
- López-Lambraño, A. A., Fuentes, C., López, A. A., Mata, J. y López, M. (2018). Spatial and temporal Hurst exponent variability of rainfall series based on the climatological distribution in a semiarid region in Mexico. *Atmósfera*, 31(3), 199-219. <https://doi.org/10.20937/ATM.2018.31.03.02>
- Magallanes Patiño, J. (2016) Cambio climático: evaluación de medidas de adaptación. Instituto Mexicano de Tecnología y Agua, 77p.
- Márdero, S., Nickl, E., Schmook, B., Shnerider, L., Rogan, J., Christman, Z., y Lawrence, D. (2012). Sequias en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *ISSN 0188-4611*. (78), 19-33.
- Martínez, J. y Fernández, A. (2004). Cambio climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT, ISBN 968-817-704-0
- Martínez, P. F. y Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencia del Agua*. 3(1), 5-20.
- Matovelle, C., Heras, D. & Solano-Peláez, J. (2022). Eficiencia de la Imputación de Datos Faltantes de Precipitaciones Utilizando Herramientas Computacionales en la Cuenca Hidrográfica, Jubones - Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(2), 23-30.
- Medina Rivera, R. D. (2008). Estimación estadística de valores faltantes en series históricas de lluvias. Tesis de maestría, Escuela de Posgrados Pereira; Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mobeen, M., Ahmed, H., Ullah, F., Riaz, M.O., Mustafa, I., Riaz, K. y Usman, M. (2017). Impact of climate change on the precipitation pattern of district Sargogha, Pakistan. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 9(1), 21-35.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (2º, ed.) Escuela colombiana de Ingeniería: ALFAOMEGA.

- Morales, M. I., Herrera, G. S., Aparicio, J., Rafieeinassab, A. y Lobato, R. (2021). Evaluating reanalysis and satellite-based precipitation at regional scale: A case study in southern Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 189-206. <https://doi.org/10.20937/atm.52789>
- Müller, G. y Fernandes, V. R. (2023). Connecting heavy precipitation events to outgoing long wave radiation variability scales: Case analysis in Brazil. *Atmósfera*, 36(1), 77-90. <https://doi.org/10.20937/atm.53028>
- Nascimento, L., Rodríguez, M. y Sant'Anna, L. (2020). Trends and tropicalization in Paraná State, south of Brazil. *Atmósfera*, 33(1), 1-18. <https://doi.org/10.20937/atm.52441>
- Navarro, E., Arias, P. A. y Vieira, S. C. (2019). El Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki, y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 43 (166),120-132. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>
- Palacio, A., Afonso, P., Silva, R., Bautista, E., Posada, G. y Val, R. (2005). Diagnóstico de riesgos por inundación para la ciudad de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche, H. Ayuntamiento del municipio de Campeche. 109p.
- Posada, G., Vega, B. E. y Silva, R. (2013). Peligros naturales en el estado de Campeche. Cuantificación y protección civil. Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM-Gobierno del estado de Campeche, CENAPRED. 202p.
- Riaz, K., Ahmad, B., Ali, S. A. y Khan, T. (2020). Estimating the impact of climate extremes and their future projections over drought prone regions of Punjab. *Climate Change*. 6(22), 212-227.
- Rivera, E., Vega, E.B., Posada, G. y Mangas, E.A. (2020). Building adaptation to extreme rain effects in San Francisco de Campeche, México. *Atmósfera*, 33(2), 159-174. <https://doi.org/10.20937/atm.52650>
- Rivera-Arriaga, E., Silva, R., Cruz-Ramírez, C.J., Azuz-Adeath, I., Vega-Serratos, B.E., Posada-Vanegas, G.P. (2023). Risk Management of Extreme Precipitation in Mexico: Building Resilience. In: Eslamian, S., Eslamian, F. (eds) *Disaster Risk Reduction for Resilience*. Springer, Cham. pp 273–302. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22112-5_12

- Ruiz, J. A., Medina, G., Rodríguez, V. M., Sánchez, J.J., Villavicencio, R., Durán, N., Grajeda, J. y García, G. E. (2016). Regionalización del cambio climático en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (13), 2451-2464.
- Sánchez, I., Díaz, G., Ojeda, W., Chebhouni, G., Orona, I., Villanueva, J., González, J. L. y González, G. (2008). Variabilidad climática en México: algunos impactos hidrológicos, sociales y económicos. *Ingeniería hidráulica en México*, 23(4), 5-24.
- Villalobos Zapata, G. J. y Mendoza Vega, J. (2010). La biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El colegio de la Frontera Sur. México. 730p.
- Yañez Bautista, S. (2012) Análisis de la precipitación y escurrimiento en cinco cuencas de la región hidrológica XI Grijalva-Villahermosa, contrastando métodos tradicionales con el modelo japonés de alta resolución. Tesis de maestría, Secretaría de Investigación y Posgrado; Instituto Politécnico Nacional.