



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**TENDENCIA DE LLUVIA ASOCIADA A CICLONES TROPICALES OCACIONADA  
POR CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD EN MÉXICO**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**DOCTOR EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**SINUHÉ ALEJANDRO SÁNCHEZ MARTÍNEZ**

**TUTORES PRINCIPALES**  
**DR. FERNANDO GONZÁLEZ VILLARREAL, II, UNAM**  
**DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, II, UNAM**

**COMITÉ TUTOR**  
**DRA. MARTITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, II, UNAM**  
**DR. ÓSCAR FUENTES MARILES, II, UNAM**  
**DR. MOISÉS BEREZOWSKI, II, UNAM**

**CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2024**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón

Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

1<sup>er.</sup> Vocal: Dr. González Villarreal Fernando J.

2<sup>do.</sup> Vocal: Dr. Berezowsky Verduzco Moisés

3<sup>er.</sup> Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

Posgrado en Ingeniería Civil, UNAM, Ciudad de México, México.

### **TUTORES DE TESIS:**

Dr. Fernando J. González Villarreal

Dr. Ramón Domínguez Mora

---

**FIRMA**

---

**FIRMA**

## DEDICATORIA

A mis padres, María Elena y Alejandro.

A mis hermanos, Orlando, Irlis y Roy.

A mi sobrino, Braulio.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
PUBLICACIÓN ACADÉMICA ORIGINADA EN ESTE TRABAJO .....	9
1 INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 Motivación .....	10
1.2 Hipótesis .....	15
1.3 Pregunta de investigación .....	15
1.4 Objetivo .....	16
4.1.1 Objetivo general. ....	16
4.1.2 Objetivos específicos. ....	16
2 ZONA DE ESTUDIOS Y OBTENCIÓN DE DATOS .....	16
2.1 Características del territorio mexicano .....	16
2.2 Obtención de información .....	17
2.3 Selección de Ciclones Tropicales .....	18
3 METODOLOGÍA .....	21
3.1 Curvas Altura de precipitación-Área-Duración.....	21
3.2 Curvas Factor de Reducción de Área .....	21
3.3 Ecuaciones logarítmicas empíricas.....	22
3.4 Prueba estadística de Mann-Kendall para búsqueda de tendencia .....	22
3.5 Prueba estadística de Rho de Spearman para búsqueda de tendencia .....	23
3.6 Pendiente de Sen.....	24
3.7 Prueba de Pettitt .....	25
3.8 Nivel de confianza .....	25
4 RESULTADOS.....	26
4.1 Curvas Altura de precipitación- Área-Duración.....	26
4.2 Ecuación de correlación logarítmica .....	29
4.3 Series temporales .....	30
4.4 Pruebas estadísticas .....	34

5	DISCUSIÓN .....	38
6	CONCLUSIONES .....	41
	REFERENCIAS .....	43
	ANEXO 1 .....	54
	ANEXO 2 .....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	Año de ocurrencia, nombre, categoría y estado donde se registró la máxima lluvia diaria observada de cada uno de los 58 CT seleccionados. Depresiones Tropicales (DT); Tormentas Tropicales (TT); categorías de huracanes 1–5 (H1, H2, H3, H4 y H5) .....	19
<b>Tabla 2.</b>	Tendencias detectadas en series temporales de duración de 24 h y 100, 1000, 5000 y 10000 km <sup>2</sup> .....	34
<b>Tabla 3.</b>	Tendencias detectadas en series temporales de duración de 48 h y 100, 1000, 5000 y 10000 km <sup>2</sup> .....	35
<b>Tabla 4.</b>	Resultados obtenidos con la Pendiente de Sen.....	35
<b>Tabla 5.</b>	Resultados obtenidos con la Prueba de Pettitt.....	35
<b>Tabla 6.</b>	Medias correspondientes a los periodos 1959-1996 and 1997-2016.....	36
<b>Tabla 7.</b>	Ecuaciones logarítmicas de cada CT seleccionado para este estudio, obtenidas a partir de las curvas AAD .....	54
<b>Tabla 8.</b>	Ecuaciones logarítmicas de cada CT seleccionado para este estudio, obtenidas a partir de las curvas FRA. ....	57
<b>Tabla 9.</b>	Valores de lluvia para áreas de 100, 1000, 5000 y 10000 km <sup>2</sup> y duración de 24 horas obtenidas a partir de las ecuaciones logarítmicas correspondientes a cada CT.....	60
<b>Tabla 10.</b>	Valores de lluvia para áreas de 100, 1000, 5000 y 10000 km <sup>2</sup> y duración de 48 horas obtenidas a partir de las ecuaciones logarítmicas correspondientes a cada CT.....	63
<b>Tabla 11.</b>	Valores de Factor de Reducción de Área para áreas de 1000, 5000, 10000 y 20000 km <sup>2</sup> y lluvia de duración de 24 h obtenidos a partir de las ecuaciones logarítmicas del mismo nombre. ....	66
<b>Tabla 12.</b>	Valores de Factor de Reducción de Área para áreas de 1000, 5000, 10000 y 20000 km <sup>2</sup> y lluvia de duración de 24 h obtenidos a partir de las ecuaciones logarítmicas del mismo nombre. ....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.</b>	Ubicación geográfica de cada uno de los CT seleccionados para este estudio.....	19
<b>Fig. 2.</b>	Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 24 horas para la tormenta Mansanillo. ....	27

<b>Fig. 3.</b> Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 48 horas para la tormenta Mansanillo. ....	27
<b>Fig. 4.</b> Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 72 horas para la tormenta Mansanillo. ....	28
<b>Fig. 5.</b> Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 96 horas para la tormenta Mansanillo. ....	28
<b>Fig. 6.</b> Curvas AAD y ecuaciones logarítmicas de la tormenta “Manzanillo” categoría 4 ocurrido en 1959. Se indican las ecuaciones de correlación logarítmicas; $x_1$ y $y_1$ corresponden a la duración de 24 h; $x_2$ y $y_2$ corresponden a la duración de 48 h. ....	30
<b>Fig. 7.</b> Series temporales calculadas a partir de curvas AAD para una duración de 24 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km <sup>2</sup> . ....	32
<b>Fig. 8.</b> Series temporales calculadas a partir de curvas AAD para una duración de 48 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km <sup>2</sup> . ....	32
<b>Fig. 9.</b> Series temporales calculadas a partir de curvas FRA para una duración de 24 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km <sup>2</sup> . ....	33
<b>Fig. 10.</b> Series temporales calculadas a partir de curvas FRA para una duración de 48 h y áreas 1000, 5000 y 10,000 km <sup>2</sup> . ....	33
<b>Fig. 11.</b> Serie temporal de precipitación y Pendiente de Sen correspondiente a una duración de 24 horas, área de 100 (a) y 1000 km <sup>2</sup> (b); duración de 48 horas, área de 100 (c), 1000 (d) y 5000 (e) km <sup>2</sup> . Se indica la ecuación de la pendiente. ....	36
<b>Fig. 12.</b> Serie temporal y prueba de Pettitt correspondiente con una duración de 24 horas, área de 100 (a) y 1000 km <sup>2</sup> (b); duración de 48 horas, área de 100 (c) y 1000 (d) km <sup>2</sup> . ....	37

## RESUMEN

Comprender los efectos del cambio climático en los fenómenos meteorológicos es crucial para desarrollar medidas de adaptación que mitiguen dichos efectos. Estudios previos han informado de un posible vínculo entre el aumento de las temperaturas globales y la creciente incidencia de fenómenos climáticos extremos, como ciclones tropicales (CT). Sin embargo, aún no se ha comprendido por completo la tendencia en las lluvias asociadas a CT. El objetivo de este estudio fue investigar la existencia y magnitud de tendencias en diferentes áreas y duraciones de lluvias asociadas a CT. Para lograr este objetivo, se empleó un enfoque de métodos mixtos utilizando curvas de Altura de precipitación-Área-Duración (AAD) y Factor de Reducción de Área (FRA) que pueden describirse como ecuaciones logarítmicas para generar series temporales que permiten la aplicación de métodos estadísticos como Mann-Kendall (MK) y Spearman Rho (RS) para detectar tendencias además de Estimador de Sen para calcular la magnitud de esas tendencias. Las series temporales se generan mediante la sustitución de diferentes áreas en las ecuaciones logarítmicas. La evidencia presentada muestra que, en México, las lluvias asociadas a CT con una duración de 24 horas muestran una tendencia ascendente para áreas máximas comprendidas entre 300 y 1,700 km<sup>2</sup>, según las pruebas de Mann-Kendall y Rho de Spearman, respectivamente; según estas mismas pruebas para duraciones de 48 horas, se observaron tendencias ascendentes hasta áreas máximas entre 5,700 y 6,900 km<sup>2</sup>. La pendiente de Sen reporta aumentos anuales de entre 0.76 y 1.32 mm y entre 1.15 y 2.06 mm para duraciones de 24 y 48 horas, respectivamente. En contraste, no se observaron tendencias en las series temporales obtenidas a partir de los FRA. Por último, la prueba de Pettitt reporta un salto abrupto a partir del año 1997 en todos los casos. La comprensión de las tendencias temporales y espaciales en la distribución de la magnitud de las tormentas desempeña un papel fundamental en la formulación de estrategias efectivas para reducir los daños y aprovechar los beneficios asociados con estos fenómenos naturales. La importancia y originalidad de este estudio radica en que explora y encuentra tendencias cuantitativas en diferentes áreas y duraciones de las lluvias asociadas a CT.

**Palabras clave:** Ciclón tropical; tendencia de precipitaciones; curvas de Altura de precipitación-Área-Duración; curvas de Factores de Reducción de Área; ecuación logarítmica; series temporales; cambio climático.



## ABSTRACT

Understanding the effects of climate change (CC) on meteorological phenomena is vital to create adaptation measures to mitigate these effects. Prior studies have reported a potential link between the rise in global temperatures and the heightened occurrence of extreme weather events like tropical cyclones (TCs). However, trends in rainfall associated with TCs (TCR) have not been fully understood. The aim of this study was to investigate the existence and the magnitude of trend in different areas and durations of TCR. To achieve this objective, a mixed-method approach was employed using Depth-Area-Duration (DAD) and Areal Reduction Factors (ARFs) curves that can be described as a logarithm equation to generate time series that allows the application of statistical methods such as the Mann-Kendall (MK) and Spearman Rho (SR) to detect trends and Sen's estimator. Time series are generated by substituting different areas in the logarithmic equations. The evidence presented shows that in Mexico the TCR lasting 24 h shows an increasing trend for maximum areas between 300 and 1700 km<sup>2</sup> according to the Mann-Kendall and Spearman's  $\rho$  tests, respectively; according to these same tests for durations of 48 h, upward trends were observed up to maximum areas between 5,700 and 6,900 km<sup>2</sup>. The Sen slope reports annual increases between 0.76 and 1.32 mm and between 1.15 and 2.06 mm for a duration of 24 and 48 h, respectively. In contrast, no trends were observed in the time series obtained from the ARFs. Finally, the Pettitt test reports an abrupt jump from the year 1997 in all cases. The understanding of temporal and spatial trends in storm magnitude distribution plays a pivotal role in formulating effective strategies for reducing damage and harnessing benefits associated with these natural phenomena. The importance and originality of this study is that it explores and finds quantitative trend in different areas and durations in TCR.

**Keywords:** Tropical cyclone; rainfall trend; Depth-Area-Duration curves; Areal Reduction Factor curves; logarithm equation; temporal series; climate change.

## PUBLICACIÓN ACADÉMICA ORIGINADA EN ESTE TRABAJO

Sinuhé Alejandro Sánchez Martínez, Fernando J. González Villarreal, Ramón Domínguez Mora, Maritza Liliana Arganis Juárez; Trend in rainfall associated with tropical cyclones in Mexico attributed to climate change and variability. *Journal of Water and Climate Change* 1 December 2023; 14 (12): 4506–4526. doi: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.300>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

El cambio climático (CC) está ocurriendo debido a causas antropogénicas además del CC natural (Conde, 2007). Desde la época de la Revolución Industrial, se ha detectado una tendencia a la alza en la temperatura promedio del planeta debido a la actividad humana (Fernández et al. 2014). Las observaciones en todos los continentes y en la mayoría de los océanos muestran que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios en el clima regional, particularmente por un aumento en la temperatura (IPCC, 2007).

El aumento de la temperatura global muy probablemente se reflejará también en cambios en las precipitaciones (Dore, 2005) y en el ciclo hidrológico, especialmente en eventos extremos (Trenberth, 2011). La actividad de los ciclones tropicales (CT) está altamente correlacionada con la temperatura del mar (Emanuel, 2005). Además, estudios recientes sugieren que es probable que la cantidad de lluvia asociada a los CT aumente en climas más cálidos (Lin et al. 2015; Patricola & Wehner, 2018; Cha et al. 2020; Guzman & Jiang, 2021).

El promedio global de la temperatura media del mar ha aumentado a una tasa de  $0.062 \pm 0.01$  °C por década en los últimos 120 años, y en el período 2010-2019 se observó una aceleración en el aumento de la temperatura del mar, con una tasa que se aceleró a  $0.280 \pm 0.068$  °C por década (Garcia-Soto et al. 2021). En la franja tropical (24°S-24°N), Burić y Penjišević, (2023), identificaron tendencias al alza en la temperatura, con hallazgos que indican una tasa de  $0.09$ °C por década para el período de 1901-2021 y una tasa más pronunciada de  $0.14$ °C por década para el período de 1951-2021.

Sin embargo, no existe un consenso sobre si el CC ha afectado ya las estadísticas de los CT (Patricola y Wehner, 2018). Hasta el momento, el cambio en la lluvia asociada a los ciclones tropicales no ha sido completamente comprendido (Knutson et al. 2010; Moon et al. 2023). A pesar de los avances significativos en la comprensión de los ciclones tropicales y su lluvia asociada, persisten numerosos desafíos. La complejidad de los sistemas de ciclones tropicales, la influencia del cambio climático, la variabilidad regional, limitaciones en los datos y desafíos en la modelización contribuyen a la comprensión incompleta de las tendencias en la lluvia de los CT. Las investigaciones actuales y la mejora de los métodos de

recopilación de datos son fundamentales para ampliar nuestro conocimiento en esta área y fortalecer la preparación y la resiliencia frente a estos poderosos fenómenos naturales.

Los ciclones tropicales son uno de los fenómenos meteorológicos más devastadores de la naturaleza (Hernández et al. 2001). Representan la mayoría de las pérdidas catastróficas debidas a desastres naturales en países desarrollados y, junto con las inundaciones, son la principal causa de pérdida de vidas y lesiones entre los desastres naturales que afectan a los países en desarrollo (Emanuel, 2005). Además, una mayor frecuencia de tornados también se asocia con ciclones tropicales más grandes (Paredes et al. 2021). La alteración en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos previsiblemente afectará de manera adversa a los sistemas naturales y a los seres humanos (IPCC, 2007). A pesar de su papel crucial en la preservación del ciclo hidrológico, los episodios de precipitación excesiva pueden desencadenar catástrofes ocasionadas por inundaciones, teniendo efectos perjudiciales en las sociedades humanas y las civilizaciones (Chen et al. 2022).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2007) señala que los ciclones tropicales desempeñan un papel significativo en el mantenimiento de los recursos hídricos regionales. Aunque los ciclones tropicales pueden causar daños significativos debido al viento, las olas, la lluvia y las marejadas, gracias a la precipitación que generan, es factible que los embalses se llenen y los acuíferos se recarguen, facilitando así el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica.

El conocimiento de cómo se distribuyen temporal y espacialmente las precipitaciones asociadas a los ciclones tropicales es fundamental para desarrollar estrategias que mitiguen los daños y aprovechen los posibles beneficios. Las consecuencias de las precipitaciones de los ciclones tropicales se pueden minimizar mediante esfuerzos de adaptación y gestión de riesgos. La mitigación de las ramificaciones derivadas de los fenómenos meteorológicos se puede lograr a través de la implementación de estrategias destinadas a la adaptación y la gestión meticulosa de los riesgos asociados (Singh et al. 2021).

La precipitación constituye un componente fundamental e indispensable en los sistemas hidrológicos, desempeñando un papel central en el ámbito de las investigaciones sobre la gestión de recursos hídricos (Sattari et al. 2020). Numerosos factores, como la circulación atmosférica, la topografía, el cambio climático y las actividades humanas, ejercen influencia

sobre la precipitación (Wang et al. 2021). El cambio climático podría afectar a todos los sectores de la gestión de recursos hídricos, ya que podría requerir cambios en los parámetros de diseño y operación en el suministro de recursos (Brekke et al. 2009). Además, los efectos del cambio climático en los ciclones tropicales, sumados al cambio en la cobertura y uso de la tierra, provocan inundaciones más frecuentes que requieren la implementación de una serie de acciones para hacer que el planeta sea resiliente a estos fenómenos (González y Arreguín, 2021). Por lo tanto, para generar estas acciones, es necesario en primer lugar identificar los cambios en las variables meteorológicas tanto cualitativa como cuantitativamente (Kundzewicz y Robson, 2000).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Kundzewicz & Robson, 2000) señala que, dado que los sistemas de recursos hídricos han sido diseñados suponiendo la estacionariedad de los datos hidrológicos, la detección de tendencias adquiere una gran importancia. La detección de tendencias puede ayudar a los gestores del agua a reconocer si los datos en los que se basó el diseño y la operación de los sistemas de recursos hídricos ya no son compatibles con las condiciones actuales (Brekke et al., 2009). Sin embargo, la detección de tendencias se ve obstaculizada por limitaciones sustanciales en la disponibilidad y calidad de los registros históricos globales de ciclones tropicales (Knutson et al. 2010). Además, la variabilidad natural, como el fenómeno de El Niño, dificulta la diferenciación entre los efectos del cambio climático y los efectos naturales en la variabilidad de las precipitaciones asociadas a estos fenómenos meteorológicos. La adaptación y la mitigación son estrategias complementarias para reducir y gestionar los riesgos del cambio climático (IPCC, 2014).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2013) indica que en México prevalecen condiciones de alta vulnerabilidad al cambio climático, cuyos efectos pueden poner en peligro la seguridad de la población y la conservación de los ecosistemas. Desde la década de 1960, México ha experimentado un aumento de temperatura (Met Office, 2013). Las temperaturas promedio a nivel nacional han aumentado en 0.85 °C, una cifra que coincide con el aumento global reportado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014). Los ciclones tropicales contribuyen con el 20-60% de la precipitación anual total en la costa del Pacífico (Englehart & Douglas, 2001), el 40% en el estado de Baja California, y entre el 10% y el 20% en el resto del país (Breña et al. 2015).

Numerosos estudios previos se han centrado en el análisis de la lluvia asociada a los ciclones tropicales utilizando tanto modelos climáticos como datos observados (IPCC, 2002), y en general, han arrojado resultados contradictorios. Utilizando datos observados, Ren et al. (2006), examinaron el volumen de lluvia asociada a los CT durante el período 1957-2004 en China, encontrando una tendencia a la baja en la contribución de los TC a la precipitación anual. Zhang et al. (2013), investigaron el cambio en la precipitación promedio por CT durante 1965-2009, utilizando observaciones diarias de lluvia en 514 estaciones meteorológicas, y encontraron un aumento en la precipitación promedio en el sureste de China y una tendencia al alza al sur del río Yangtsé.

Por otro lado, Bengtsson et al. (2007), Chauvin et al. (2006), Gualdi et al. (2008), Hasegawa y Emori, (2005), Knutson et al. (2008), Knutson y Tuleya, (2008) y Yoshimura et al. (2006) utilizaron modelos climatológicos y demostraron que las lluvias asociadas a los CT experimentan un aumento sustancial en el centro de las tormentas. Adicionalmente, Guzman y Jiang, (2021), emplearon datos de las misiones satelitales Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) para explorar las tendencias en la lluvia asociada a los CT, encontrando una tendencia al alza del 1.3 % en promedio por año.

Tsou et al. (2016), utilizaron un Modelo Atmosférico de Alta Resolución (HiRAM) con una resolución de celda de 20 x 20 kilómetros para replicar la ocurrencia de tormentas tropicales (TT) en el oeste del Pacífico Norte (WNP) y la región que abarca Taiwán y la costa este de China (TWCN). Sus simulaciones indican que, como consecuencia del calentamiento global, se proyectan aumentos tanto en la intensidad de las TT como en la tasa máxima de precipitación. Además, los modelos numéricos a menudo muestran una respuesta aumentada en las tasas de lluvia asociadas a ciclones tropicales individuales cuando se someten al calentamiento global (Kim et al. 2014; Villarini et al. 2014). Varios estudios similares han informado de un aumento en la lluvia inducida por ciclones tropicales como resultado del calentamiento global (Touma et al. 2019; T. Knutson et al. 2020; Chu et al. 2020; Chang et al. 2023). El rango de proyecciones para finales del siglo XXI entre estos estudios varía del 2.8 al 54%. En México, Englehart y Douglas (2001), exploraron el papel de los CT en la costa del Pacífico mexicano y no encontraron evidencia de una tendencia significativa en la lluvias asociadas a CT que ocurrió en la zona de estudio.

Sin embargo, estudios previos en este ámbito han dependido principalmente de análisis cualitativos o se han centrado en eventos extremos aislados, lo que limita la amplitud y precisión de sus conclusiones.

Este estudio busca contribuir al cuerpo existente de conocimientos al proporcionar perspectivas cuantitativas sobre la distribución temporal y espacial de las magnitudes de lluvias asociadas a CT a lo largo de un período extendido, facilitando así la toma de decisiones informadas y la gestión de desastres. La distribución espacial y temporal de la lluvia de lluvias asociadas a CT son información necesaria para el diseño de un proyecto en la cuenca objetivo (WMO, 2009). Se debe realizar una estimación precisa de la lluvia para evaluar el potencial de los recursos hídricos, la medición del volumen de lluvia, su frecuencia y duración (Siqueira y Nery, 2021).

Brackins y Kalyanapu (2020), identificaron cuatro modelos físicos existentes para lluvias asociadas a CT, como la Climatología y Persistencia de Lluvia (R-CLIPER), el Grupo de Tareas de Evaluación del Desempeño Interinstitucional (IPET), el Modelo Paramétrico de Lluvia de Huracanes (PHRaM) y la Climatología y Persistencia de Precipitación en Formato de PDF (P-CLIPER) por sus siglas en inglés. Estos modelos requieren información sobre la intensidad, velocidad, posición y tamaño de la tormenta.

Las curvas AAD representan la relación entre la intensidad de la precipitación y su cobertura espacial en un evento de tormenta específico, presentando un conjunto de curvas para diferentes intervalos de duración. La ventaja inherente en el uso de estas curvas radica en su capacidad de representación mediante ecuaciones logarítmicas, lo que a su vez facilita la determinación de la lluvia asociada a un evento de tormenta dado en una zona geográfica específica (Shin et al. 2013). Además, es importante destacar que la obtención de las curvas AAD requiere exclusivamente el uso de datos meteorológicos obtenidos de estaciones climatológicas, que generalmente, constituyen el único repositorio de información relevante disponible en el contexto geográfico de México. Las curvas FRA se calculan a partir de las curvas AAD.

El análisis de detección de cambios en series temporales hidrológicas se ha aplicado utilizando la prueba de Pettitt, la prueba de la razón de Von Neumann, la prueba de rango de Buishand y la prueba de homogeneidad normal estándar (SNH), mientras que las pruebas no

paramétricas incluyen la regresión lineal (Vezzoli et al. 2012). Las ventajas de adoptar la prueba de Pettitt sobre otros métodos es su simplicidad y enfoque en cambios abruptos. Mann-Kendall (MK) y Rho de Spearman (Rho) son ampliamente utilizados para el análisis de tendencias en hidrología. Las pruebas de tendencia paramétricas, aunque ofrecen una mayor potencia estadística, requieren datos distribuidos de manera normal y muestran una mayor sensibilidad a valores atípicos (Hamed, 2008). Los datos hidrológicos pueden estar influenciados por eventos extremos (por ejemplo, inundaciones o sequías), que pueden introducir valores atípicos. Tanto la prueba de Mann-Kendall como la de Rho de Spearman son menos sensibles a los valores atípicos en comparación con algunos métodos paramétricos como la regresión lineal, lo que los hace más apropiados para detectar tendencias en conjuntos de datos con valores extremos (Asefa, 2023).

Los hallazgos preliminares de nuestro análisis cuantitativo revelan tendencias temporales significativas en la distribución de la magnitud de las lluvias asociadas a CT a lo largo del período de estudio. Estas tendencias ofrecen valiosas perspectivas sobre la evolución de las lluvias asociadas a CT, lo que ayuda a los interesados a anticipar y prepararse mejor para futuros eventos. Además, nuestra investigación sobre las variaciones espaciales destaca áreas específicas que son particularmente susceptibles a tormentas de diversas magnitudes. Esta información puede guiar esfuerzos dirigidos a la mitigación de desastres, la asignación de recursos y la planificación de infraestructuras.

## 1.2 Hipótesis

Dado el aumento de las temperaturas globales y la evidencia de un posible vínculo entre el cambio climático y la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales, se espera que exista una tendencia ascendente en la lluvia asociada a los ciclones tropicales en México. Esta tendencia se manifestará en un aumento gradual en la magnitud de las lluvias observadas durante períodos de 24 y 48 horas, así como en una distribución espacial específica de estas lluvias a lo largo del tiempo.

## 1.3 Pregunta de investigación

¿Cuál es la tendencia temporal y espacial de la lluvia asociada a ciclones tropicales en México, considerando la distribución de lluvias durante períodos de 24 y 48 horas, y cómo esta tendencia puede estar relacionada con el cambio climático?



## 1.4 Objetivo

### 4.1.1 Objetivo general.

El objetivo de este trabajo es determinar de manera cuantitativa la tendencia de lluvia asociada a ciclones tropicales ocasionada por cambio climático en México considerando la distribución espacial y temporal del evento usando registros observados de lluvias diarias.

### 4.1.2 Objetivos específicos.

- Crear una metodología que permita aplicar pruebas estadísticas para búsqueda de tendencia a lluvia asociada a CT basada en las curvas AAD y el FRA.
- Aplicar esta metodología a la república mexicana para determinar la existencia de tendencias de lluvia asociada a ciclones tropicales ocasionada por cambio climático en este país.
- Calcular los incrementos anuales para duraciones de lluvia de 24 y 48 horas para distintas áreas.
- Utilizar los resultados obtenidos para calcular la Precipitación Máxima Probable en una cuenta del Noroeste de México.

## 2 ZONA DE ESTUDIOS Y OBTENCIÓN DE DATOS

### 2.1 Características del territorio mexicano

En este trabajo nos enfocamos en el territorio mexicano el cual tiene características geográficas que lo posicionan como uno de los países más vulnerables al cambio climático. Su localización entre dos océanos y altitudes y relieves lo hacen estar especialmente expuesto a diferentes fenómenos meteorológicos (SEMARNAT, 2014). En este país ocurrieron un promedio anual de ciclones tropicales de 15.1 en el Océano Pacífico y 10.3 en el Océano Atlántico durante el periodo 1966-2020 (CENAPRED, 2007). México está ubicado entre los meridianos 118°22'00" y 86°42'36" de longitud oeste y entre las latitudes 14°32'27" y 32°43'06" norte. En términos de la línea de costa, nuestro país cuenta con 7828 kilómetros de costa en el océano Pacífico y 3294 kilómetros en el Golfo de México y mar Caribe, para una línea de costa total de 11122 kilómetros (INEGI, 2021).

La cantidad promedio anual de precipitación es de 725 milímetros, presentando lluvias constantes a lo largo del año, con una mayor concentración de junio a octubre. La temperatura promedio anual en México es de 20.6°C, mostrando promedios mensuales de temperatura

que fluctúan entre 15°C (en enero) y 25°C (en junio) (*World Bank Climate Change Knowledge Portal*, s.-f.). La convergencia topográfica que fortalece el movimiento ascendente en la pendiente de la montaña contra el viento constituye una contribución fundamental al aumento de la lluvia asociada a CT en la costa del Pacífico mexicano (Dong et al. 2010). Por otro lado, el proceso de intensificación rápida de las TCR en el Golfo de México puede deberse al calentamiento más uniformemente distribuido que recibe esta región a lo largo de los meses de verano (Benedetto y Trepanier, 2020).

## 2.2 Obtención de información

En este estudio, Ciclón Tropical es el término genérico que engloba las Depresiones Tropicales (DT) ( $0 \leq \text{Velocidad Máxima Sostenida (VMS)} \leq 63 \text{ km/h}$ ), las Tormentas Tropicales (TT) ( $64 \leq \text{VMS} \leq 117 \text{ km/h}$ ) y las categorías de Huracanes 1–5 (H1, H2, H3, H4 y H5) ( $\text{VMS} \geq 118 \text{ km/h}$ ) según la escala de huracanes Saffir–Simpson (SSHS) por sus siglas en inglés. La intensidad de los Ciclones Tropicales y la tasa máxima de lluvia no están altamente correlacionadas, lo que indica que las tormentas más débiles pueden producir tasas de lluvia más altas que los ciclones tropicales más fuertes (Cheung, 2018).

En cuanto a la información relevante sobre los ciclones tropicales, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) cuenta con datos históricos sobre huracanes que ocurrieron en el Océano Pacífico y en el Océano Atlántico durante los períodos 1949-2019 (NOAA, s/f-a) y 1851-2019 (NOAA, s/f-b) respectivamente. Esta base de datos incluye el nombre, la categoría, la fecha de ocurrencia y las coordenadas de trayectoria de cada CT. Por otro lado, el Servicio Meteorológico Nacional de México, gestionado por la Comisión Nacional del Agua, cuenta con una base de datos de información histórica sobre los CT que ocurrieron en los mares circundantes a este país desde 1997 hasta 2021 (CONAGUA, s/f-a). Esta información incluye el nombre, la trayectoria, la intensidad, la velocidad máxima del viento y los estados afectados.

Las redes de monitoreo a largo plazo son fundamentales para detectar y cuantificar el cambio climático y sus impactos (Brekke et al. 2009). En México, las fuentes fundamentales de información meteorológica provienen de estaciones en superficie almacenadas diariamente por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Gay y Rueda, 2015). Las estaciones

meteorológicas miden la temperatura, la precipitación, la evaporación, la velocidad y dirección del viento. Hasta el 20 de junio de 2022, México contaba con 3,500 estaciones climatológicas en operación por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, s/f-b), de las cuales 81 son observatorios meteorológicos que transmiten información meteorológica en tiempo real (INEGI, 2021).

### 2.3 Selección de Ciclones Tropicales

Dado que la probabilidad de que la precipitación más intensa de un CT ocurra en 12 horas, 6 horas antes del impacto en tierra y 6 horas después es del 50% (Goodyear, 1968), en este estudio se toma como la tormenta representativa anual el evento que ha producido la precipitación máxima acumulada en 24 horas al tocar tierra en costas mexicanas tanto del Pacífico como del Atlántico durante el período de 1959 a 2016. Se seleccionaron 58 CT ocurridos en el período de 1959 a 2016 (Fig. 1). De los 58 CT seleccionados, 37 corresponden al Océano Pacífico y 21 al Océano Atlántico. Baja California Sur y Colima en el Océano Pacífico son los estados con más registros de precipitación máxima, con 8 y 7, respectivamente, y Tamaulipas con 7 en el Océano Atlántico. La Tabla 1 muestra el año de ocurrencia, el nombre y la categoría de cada CT seleccionado.



**Fig. 1.** Ubicación geográfica de cada uno de los CT seleccionados para este estudio.

**Tabla 1.** Año de ocurrencia, nombre, categoría y estado donde se registró la máxima lluvia diaria observada de cada uno de los 58 CT seleccionados. Depresiones Tropicales (DT); Tormentas Tropicales (TT); categorías de huracanes 1–5 (H1, H2, H3, H4 y H5)

Año	CT	Categoría	Max precipitación		Año	CT	Categoría	Max precipitación	
			en 24 h (mm)	Estado				en 24 h (mm)	Año
1959	Manzanillo	H4	368	Colima	1988	Gilberto	H4	359	N.L.
1960	Florence	TT	332	Veracruz	1989	Cosme	H1	325	Oaxaca
1961	Tara	H1	327	Guerrero	1990	Diana	H2	452	SLP
1962	Claudia	TT	327	BCS	1991	TD 2	DT	401	SLP

1963	Lilian	TT	322	Michoacán	1992	Virgil	H2	387	Michoacán
1964	Hilda	H4	270	Veracruz	1993	Gert	H1	446	SLP
1965	Hezel	TT	253	Sinaloa	1994	DT 5	DT	241	Tamaulipas
1966	Inez	TT	740	Tamaulipas	1995	Gabrielle	TT	346	Tamaulipas
1967	Beulah	H3	345	Tamaulipas	1996	Dolly	H1	420	SLP
1968	Naomi	H1	320	Sinaloa	1997	Pauline	H3	372	Oaxaca
1969	Jennifer	H1	331	Colima	1998	Isis	TT	387	BCS
1970	Ella	H3	307	Tamaulipas	1999	DT 11	DT	410	Veracruz
1971	Lily	H1	345	Jalisco	2000	Keith	H1	580	Tamaulipas
1972	Agnes	DT	235	Q Roo	2001	Juliette	H1	606	BCS
1973	Berenice	TT	400	Guerrero	2002	Isidoro	H3	368	Campeche
1974	Fifi	TT	401	Veracruz	2003	Olaf	TT	415	Colima
1975	Eleanor	DT	379	Michoacán	2004	DT 16E	DT	330	Sinaloa
1976	Liza	H4	425	BCS	2005	Wilma	H4	770	Q Roo
1977	Ania	H5	380	Tamaulipas	2006	Jhon	H2	449	BCS
1978	Olivia	TT	304	Oaxaca	2007	Henriette	H1	430	BCS
1979	Ignacio	TT	289	Michoacán	2008	DT 5E	DT	330	Colima

1980	Hermine	TT	435	Oaxaca	2009	Jimena	H1	515	Sonora
1981	Norma	H2	335	Sinaloa	2010	Alex	H2	400	N.L.
1982	Paul	H2	335	BCS	2011	Jova	H2	405	Colima
1983	Adolph	TT	309	Guerrero	2012	Carlotta	H1	350	Oaxaca
1984	Odile	TT	336	Guerrero	2013	Barry	TT	372	Veracruz
1985	Waldo	H2	238	Sinaloa	2014	Trudy	TT	496	Guerrero
1986	Paine	H1	279	Sinaloa	2015	Patricia	H4	342	Colima
1987	Eugene	H1	328	Colima	2016	Newton	H1	497	BCS

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Curvas Altura de precipitación-Área-Duración

El método ayuda a calcular la profundidad promedio de precipitación de una tormenta en una determinada área y tiempo (WMO, 2009). Estas curvas de tormenta se analizan para identificar las cantidades máximas de lluvia que caen en diferentes áreas y en diferentes duraciones (Linsley et al. 1997). Además, estas curvas proporcionan una perspectiva tridimensional de la lluvia de una tormenta (Shin et al. 2013). En una tormenta dada, la altura de la precipitación y su área de influencia se muestran como una familia de curvas para diferentes intervalos de duración (Pérez, 2003). Los valores máximos de estas curvas se extrapolan para su uso en estudios de estimación de inundaciones (Aparicio, 2005), a través de la Precipitación Máxima Probable (PMP).

#### 3.2 Curvas Factor de Reducción de Área

La evaluación del Factor de Reducción Área (FRA) se realiza con la relación entre las precipitaciones puntuales y areales (Svensson & Jones, 2010). Para estimar los FRA a partir de las curvas AAD, se utiliza el enfoque centro de tormenta. El punto central para este

enfoque es el punto que observa la máxima precipitación, el cual también cambia para cada tormenta. Los FRA se definen por:

$$FRA = \frac{Lluvia_{aereal}}{Lluvia_{puntual}} \quad (1)$$

Donde  $Lluvia_{aereal}$  es la precipitación areal de la tormenta proporcionada por las curvas AAD y  $Lluvia_{puntual}$  es la máxima precipitación puntual, que es el centro de la tormenta calculado en las curvas AAD.

### 3.3 Ecuaciones logarítmicas empíricas

Las ecuaciones logarítmicas empíricas son un método estadístico utilizado para investigar la conexión entre una variable dependiente única y una o más variables independientes.

Una ecuación lineal con dos variables se puede expresar en términos generales como:

$$y = a + \mu x \quad (2)$$

donde  $y$  es la variable dependiente,  $x$  es la variable independiente,  $a$  es la intersección (el punto en el eje vertical donde la línea se cruza) y  $\mu$  es la pendiente (Allison, 1998). Una forma muy común de abordar situaciones en las que existe una relación no lineal entre la variable independiente y la variable dependiente es transformar logarítmicamente las variables en un modelo de regresión (Benoit, 2011).

$$y = a + \mu \ln(x) \quad (3)$$

### 3.4 Prueba estadística de Mann-Kendall para búsqueda de tendencia

Este es un test estadístico no paramétrico (Kendall, 1975) que se utiliza con frecuencia para evaluar la significancia de tendencias monótonas en series temporales hidrometeorológicas (Yue & Pilon, 2004). En esta prueba, la hipótesis nula ( $H_0$ ) sostiene que no ha habido ninguna

tendencia en la serie temporal a lo largo del tiempo; la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) sostiene que ha habido una tendencia (ya sea creciente o decreciente) a lo largo del tiempo. La estadística MK, representada por  $S$ , se puede calcular de la siguiente manera:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

donde

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

En las ecuaciones (4) y (5),  $x_i$  y  $x_j$  datos secuenciales para los términos  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo;  $n$  es el tamaño de la muestra.

$$\text{Var}(S) = \frac{[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)]}{18} \quad (6)$$

En la ecuación (6),  $t_q$  es el número de coincidencias para el valor  $p$ , mientras que  $q$  es el número de valores igualados.

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Los valores positivos de  $Z_{MK}$  indican una tendencia ascendente y viceversa. La tendencia se encontró cuando  $Z_{MK}$  es mayor que  $Z_{1-\alpha/2}$ , que es el valor crítico de  $Z$  en la tabla de distribución normal estándar. En este estudio,  $\alpha = 0.05$ ,  $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ .

### 3.5 Prueba estadística de Rho de Spearman para búsqueda de tendencia

RS es otra prueba de tendencia no paramétrica que se ha utilizado extensamente para cuantificar la posible tendencia en series temporales (Lehmann & D'Abbrera, 1975). RS también se basa en dos suposiciones importantes, como la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ). Dado un conjunto de datos de muestra  $\{X_1 = 1, 2, \dots, n\}$ , la ( $H_0$ ) describe



que toda la serie temporal de datos es independiente y distribuida de manera uniforme; la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) confirma la existencia de una tendencia ascendente o descendente en los datos de precipitación de la serie temporal (Gao et al. 2020). La prueba RS ( $D$ ) se expresa como:

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (8)$$

Donde  $R_i$  es el rango de la observación  $i$  en el tamaño de la muestra  $n$  (Gao et al. 2020). El valor positivo resultante de  $Z_{SR}$  indica una tendencia creciente. En cambio, los valores negativos especifican una tendencia decreciente.

$$Z_{SR} = D \sqrt{\frac{n-2}{1-D^2}} \quad (9)$$

### 3.6 Pendiente de Sen

Sen (1968), propuso un método no paramétrico robusto para estimar la magnitud de la tendencia. Dado un conjunto de datos de muestra  $\{X_1 = 1, 2, \dots, m\}$ , con  $M$  pares de datos, la pendiente se calcula como (Theil, 1992):

$$f(t) = Qt + B \quad (10)$$

donde  $Q$  indica la pendiente y  $B$  es una constante. La pendiente  $Q_i$  del conjunto de  $M$  pares de fechas se calcula como:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (11)$$

donde  $x_i$  y  $x_k$  son los valores de datos de los pares de datos en los momentos  $j$  y  $k$  (Gao et al. 2020).

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(M+1/2)]} & \text{si } M \text{ es impar} \\ \frac{Q_{[M/2]} + Q_{[(M+2/2)]}}{2} & \text{si } M \text{ es par} \end{cases} \quad (12)$$

Un valor positivo de  $Q_{med}$  indica una tendencia creciente, mientras que un valor negativo de  $Q_{med}$  indica una tendencia decreciente en la serie temporal.

### 3.7 Prueba de Pettitt

Esta es una prueba no paramétrica basada en rangos para un cambio en la mediana de una serie con el tiempo exacto del cambio desconocido (Pettitt, 1979). Las estadísticas de Pettitt,  $U_{t,T}$ , se pueden calcular como (Conte et al. 2019):

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=\tau+1}^T \text{sgn}(x_j - x_i); 1 \leq t < T \quad (13)$$

donde

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (14)$$

el punto de probable cambio es:

$$K_\tau = U_{\tau,T} = \max |U_{t,T}|, \leq t < T \quad (15)$$

### 3.8 Nivel de confianza

Es la probabilidad de que un intervalo de confianza (un rango estimado alrededor de un valor de interés) capture el verdadero parámetro de la población. Por ejemplo, si se dice que se tiene un nivel de confianza del 95%, significa que, si repitiéramos el proceso de muestreo y estimación un gran número de veces, el 95% de los intervalos de confianza construidos contendrían el verdadero valor del parámetro poblacional.

## 4 RESULTADOS

El objetivo de este estudio fue investigar la existencia y magnitud de tendencias en diferentes áreas y duraciones precipitaciones asociadas a CT. Utilizamos un enfoque innovador de métodos mixtos, combinando curvas de Altura de precipitación-Área-Duración (AAD) y los Factores de Reducción de Área (FRA), que pueden caracterizarse como ecuaciones de función logarítmica, para producir datos de series temporales.

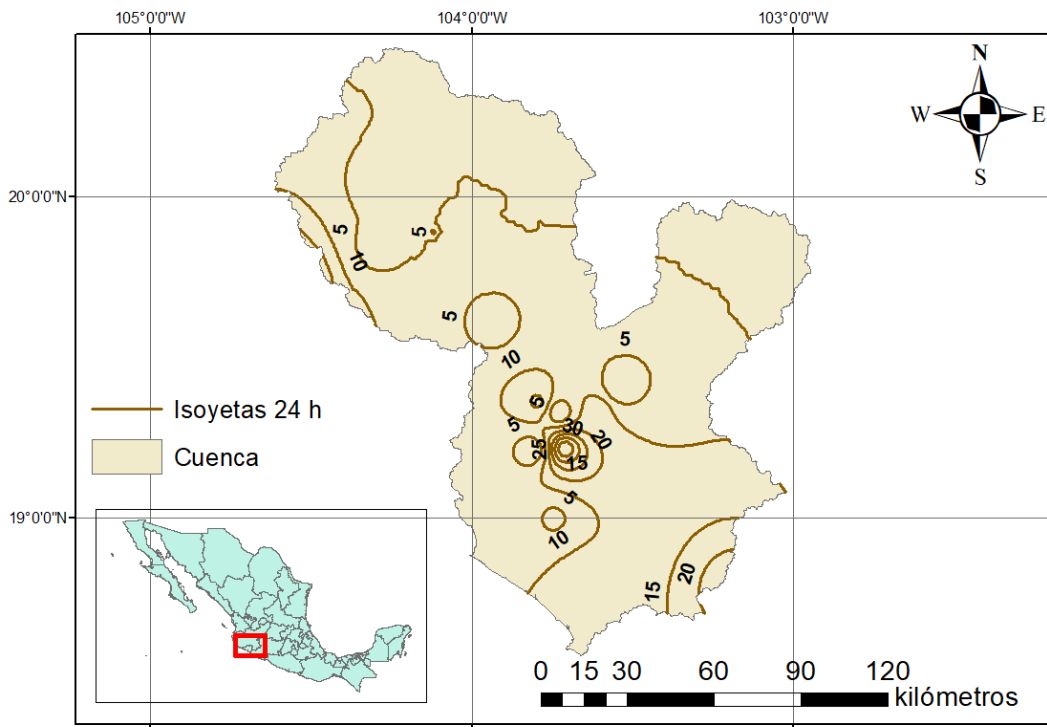
Inicialmente, el reto principal fue encontrar el evento anual representativo de ciclones tropicales. Para lograrlo, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de los datos de precipitación anual máxima acumulada en 24 h en todas las regiones que son afectadas por CT dentro de México. Posteriormente, se verificó que esta máxima precipitación anual estuviera asociada a algún ciclón tropical.

### 4.1 Curvas Altura de precipitación- Área-Duración

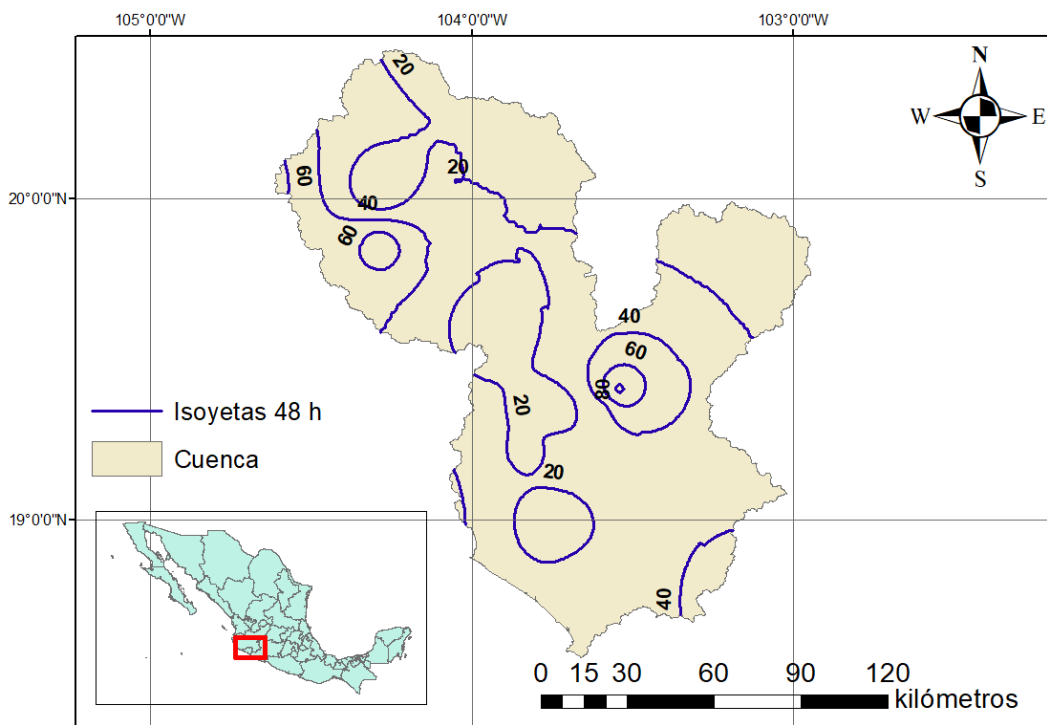
En la fase subsecuente de esta investigación, se calcularon curvas AAD para el conjunto de eventos de tormentas seleccionadas, con un ciclón tropical calculado para cada año dentro del período de estudio. El procedimiento computacional para generar estas curvas se ejecutó con la ayuda de un programa Sistema de Información Geográfica y basándose en el método isoyetas. El cálculo de las curvas FRA se realizó en función de las curvas AAD.

Las Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 y Fig. 5 muestran las isoyetas obtenidas para lluvia de 24, 48, 72 y 96 horas de duración de la tormenta “Manzanillo” ocurrida en el puerto del mismo nombre en el estado de Colima en el año 1959.

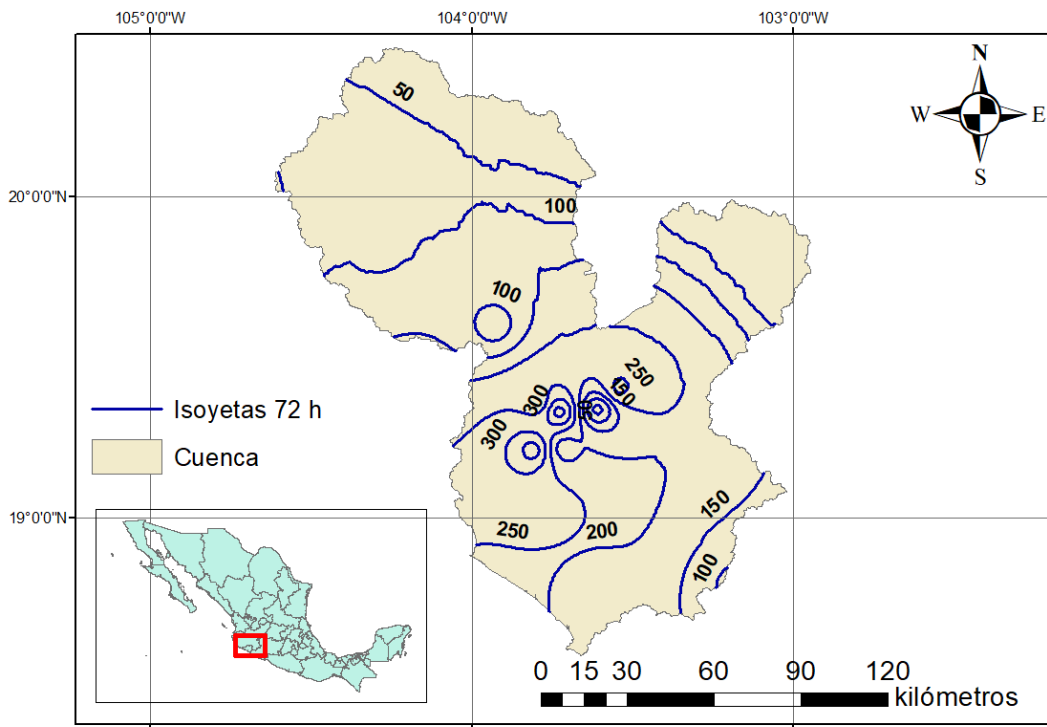
La climatología de referencia para el cálculo de las curvas AAD se tomó a partir de datos climatológicos observados en el período de 1959 a 2016 en más de 2000 estaciones de la base climática diaria del Servicio Meteorológico Nacional. Además, se calcula el Factor de Reducción por Área para cada curva AAD.



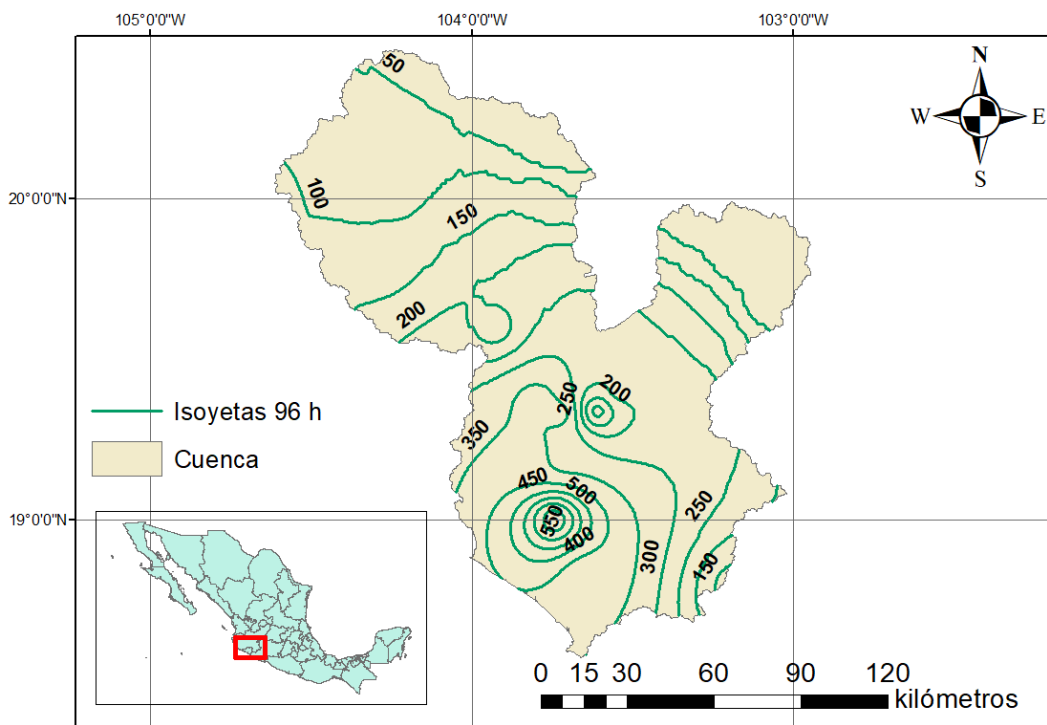
**Fig. 2.** Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 24 horas para la tormenta Manzanillo.



**Fig. 3.** Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 48 horas para la tormenta Manzanillo.



**Fig. 4.** Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 72 horas para la tormenta Manzanillo.

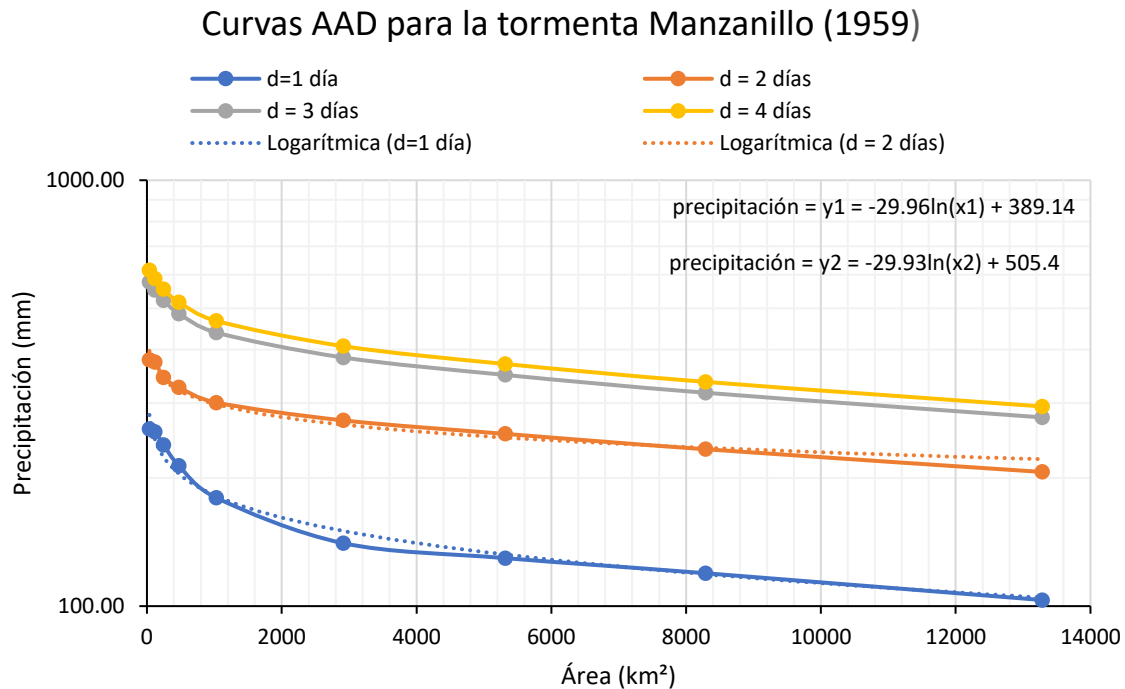


**Fig. 5.** Isoyetas obtenidas para una precipitación con duración de 96 horas para la tormenta Manzanillo.

Así, en este trabajo, se obtuvieron 58 familias de curvas anuales AAD y FRA para el período de estudio. Cada curva se derivó utilizando el punto máximo de precipitación específica como punto de partida, abarcando toda el área hasta llegar al punto donde las estaciones climatológicas registraron cero precipitaciones. En esencia, la estimación para cada curva abarcó toda la región afectada por las lluvias asociadas a tormentas tropicales.

#### 4.2 Ecuación de correlación logarítmica

Finalmente, se estima una ecuación de correlación logarítmica para cada curva de duración anual de 24 y 48 horas con el fin de obtener una ecuación de predicción empírica que sea razonablemente precisa para representar cada una de las curvas calculadas (Canavos, 1988). La Fig. 6 ilustra las curvas AAD obtenidas para el huracán Manzanillo de categoría 2 que ocurrió en 1959. En la misma figura, también se muestran las ecuaciones logarítmicas correspondientes a cada una de estas curvas AAD. Cabe mencionar que, aunque los ciclones tropicales generalmente duran varios días, los ciclones tropicales Claudia (1962), Lilian (1963), Hilda (1964), Inez (1966), Liza (1976), Ignacio (1979), Virgil (1992) y Newton (2016) solo duraron dos días. Por esta razón, para tener series temporales continuas, solo se utilizan ecuaciones logarítmicas para las duraciones de 24 y 48 horas que todos los ciclones tropicales considerados en este estudio tienen en común. La Tabla 8 y la Tabla 9 del Anexo 1 muestran las ecuaciones logarítmicas obtenidas a partir de las curvas AAD y las ecuaciones logarítmicas obtenidas a partir del FRA respectivamente, de cada uno de los CT seleccionados para este estudio.



**Fig. 6.** Curvas AAD y ecuaciones logarítmicas de la tormenta “Manzanillo” categoría 4 ocurrido en 1959. Se indican las ecuaciones de correlación logarítmicas;  $x_1$  y  $y_1$  corresponden a la duración de 24 h;  $x_2$  y  $y_2$  corresponden a la duración de 48 h.

### 4.3 Series temporales

Se generaron series temporales que abarcan un periodo de 58 años (1958-2016) mediante la sustitución de diferentes áreas en las ecuaciones logarítmicas de 24 y 48 horas obtenidas a partir de las curvas AAD (Tabla 10 y Tabla 11, Anexo1) y FRA (Tabla 12 y Tabla 13, Anexo 1). Se seleccionaron áreas de 100, 1,000, 5,000 y 10,000 km<sup>2</sup> para las ecuaciones de las curvas AAD, y áreas de 1,000, 5,000 y 10,000 km<sup>2</sup> para las curvas FRA. Dado que el método AAD considera la precipitación areal, no se tuvo en cuenta la precipitación puntual para calcular las series temporales.

Dada la invalidez inherente de las ecuaciones logarítmicas derivadas de las curvas AAD cuando se aplican a regiones geográficas excepcionalmente pequeñas, se tomó una decisión pragmática de calcular datos de series temporales para áreas que abarquen una extensión mínima de 100 km<sup>2</sup>. Este método se adoptó para facilitar la estimación de tendencias predominantes dentro de este dominio espacial definido.

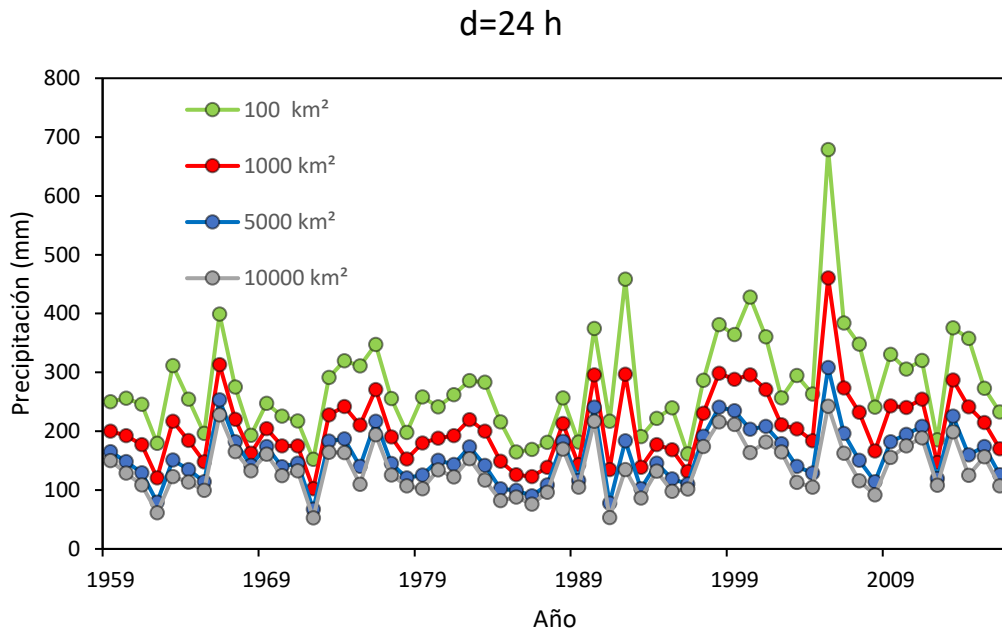
La Fig. 7 presenta las series temporales generadas para la precipitación de 24 horas, mientras que la Fig. 8 muestra las series temporales generadas para una duración de 48 horas. Cada

punto de datos anual se caracteriza por la altura de la precipitación derivada de la sustitución de las cuatro áreas seleccionadas para este estudio en las ecuaciones logarítmicas derivadas de las curvas AAD.

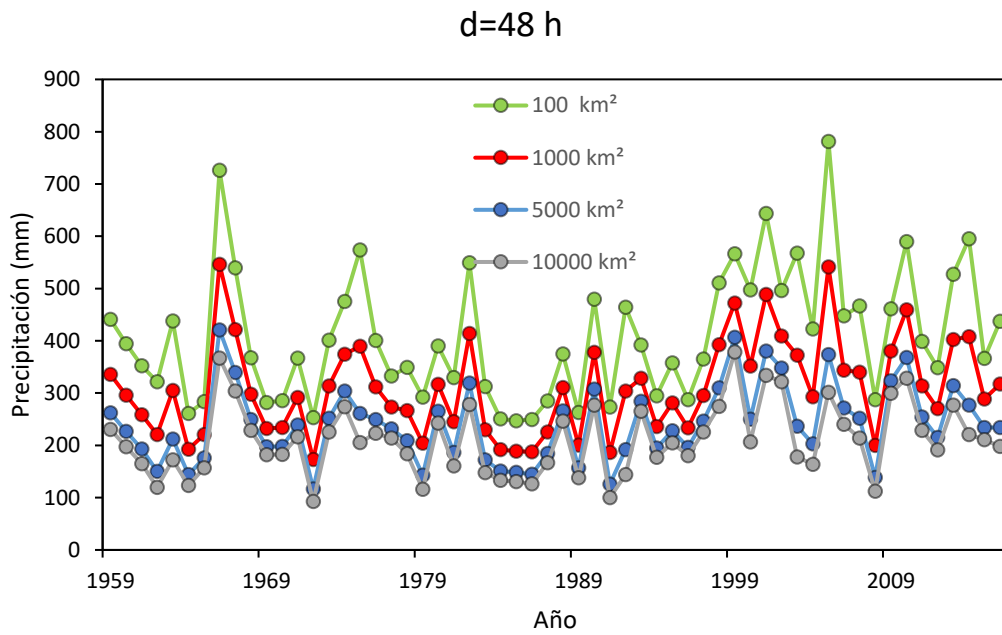
Además, en la Fig. 7 y la Fig. 8, las series temporales ilustran claramente el pico de intensidad de la precipitación, un fenómeno frecuentemente vinculado a la pared del ojo de los ciclones tropicales o a las bandas exteriores de lluvia (como se indica por la línea verde). Las series temporales reflejan la distribución espacial de la lluvia dentro y alrededor del ciclón tropical (como se indica por las líneas verde, roja, azul y gris). La intensidad de la lluvia puede variar de una región a otra, dependiendo de factores como el tamaño y movimiento del ciclón tropical.

La Fig. 9 y la Fig. 10 muestran las series temporales calculadas para los Factores de Reducción por Área, correspondientes a duraciones de 24 y 48 horas, respectivamente. En el contexto de los ciclones tropicales, las curvas FRA ilustran cómo varía la intensidad de la lluvia en diferentes áreas afectadas por la tormenta (como se indica por la línea roja). Las curvas muestran que la intensidad de la lluvia puede ser mayor cerca del centro del ciclón tropical, especialmente en la pared del ojo, y disminuir gradualmente a medida que te alejas del centro (como se indica por las líneas roja, azul y gris).

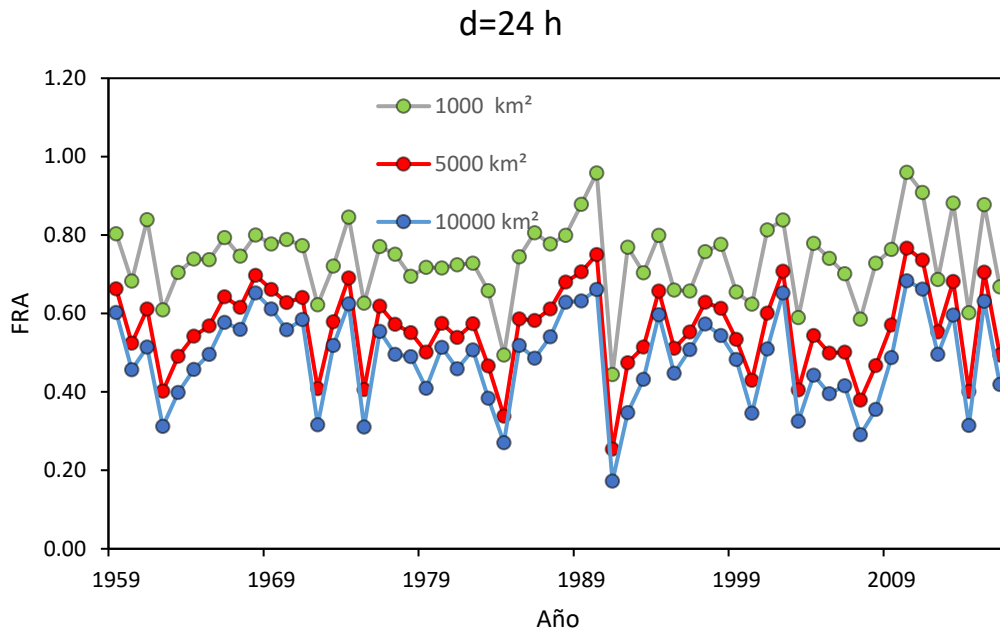




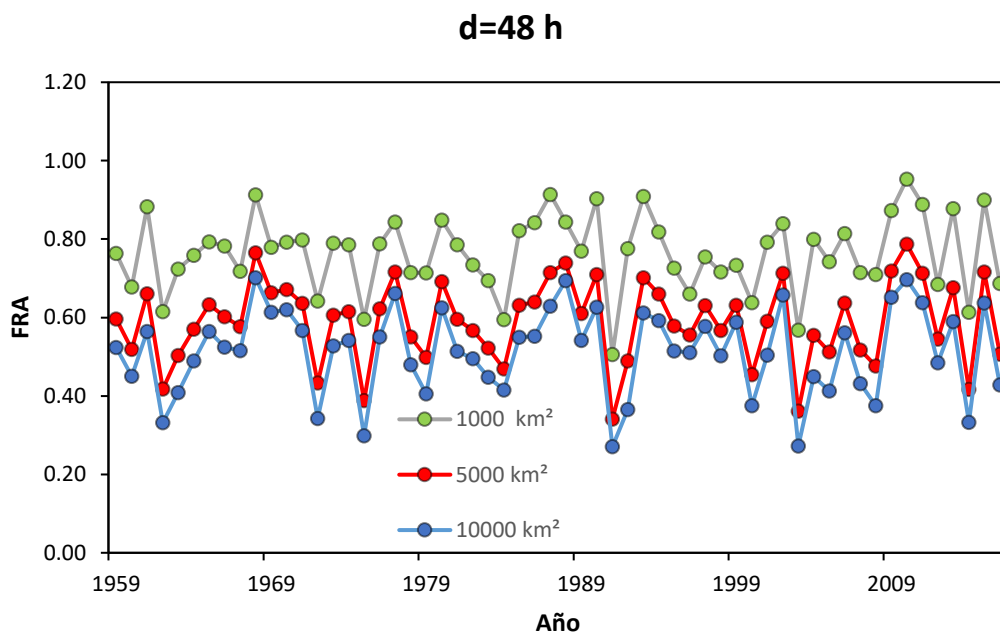
**Fig. 7.** Series temporales calculadas a partir de curvas AAD para una duración de 24 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km<sup>2</sup>.



**Fig. 8.** Series temporales calculadas a partir de curvas AAD para una duración de 48 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km<sup>2</sup>.



**Fig. 9.** Series temporales calculadas a partir de curvas FRA para una duración de 24 h y áreas de 100, 1000, 5000 y 10,000 km<sup>2</sup>.



**Fig. 10.** Series temporales calculadas a partir de curvas FRA para una duración de 48 h y áreas 1000, 5000 y 10,000 km<sup>2</sup>.

#### 4.4 Pruebas estadísticas

El proceso de análisis de series temporales consiste en aplicar pruebas de estimación de tendencias no paramétricas como la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975) y Rho de Spearman (Lehmann & D'Abrera, 1975); además, se calcula la pendiente de Sen (Sen, 1968) para obtener el aumento anual promedio; finalmente, con el fin de encontrar cambios abruptos en los datos, se realiza la prueba estadística no paramétrica de Pettitt (Pettitt, 1979). Las evaluaciones estadísticas se llevaron a cabo para cada una de las series temporales generadas en la fase anterior.

Para una duración de 24 horas, la prueba MK indica una tendencia ascendente para un área de 100 km<sup>2</sup> y la prueba SR para áreas de 100 y 1000 km<sup>2</sup>; en cambio, para áreas de 5,000 y 10,000 km<sup>2</sup>, ninguna de las dos pruebas indica la existencia de una tendencia (Tabla 2). Para una duración de 48 horas, las pruebas MK y SR indican una tendencia ascendente para áreas de 100, 1000 y 5000 km<sup>2</sup>, y ninguna de las dos pruebas muestra una tendencia para un área de 10000 km<sup>2</sup> (Tabla 3). En contraste, no se observaron tendencias en las series temporales de FRA. La pendiente de Sen y la prueba de Pettitt se aplicaron a las áreas donde las pruebas MK y SR mostraron una tendencia.

La pendiente de Sen informa aumentos anuales promedio de 1.32 mm/año (Fig. 11a) y 0.86 mm / año (Fig. 11b) para áreas de 100 y 1000 km<sup>2</sup>, respectivamente, para una duración de 24 horas; además, para una duración de 48 horas, la pendiente de Sen reporta valores de 2.06 mm/año (Fig. 11c), 1.54 (Fig. 11d) y 1.18 mm/año (Fig. 11e) para áreas de 100, 1000 y 5000 km<sup>2</sup>, respectivamente. Los valores obtenidos de la pendiente de Sen se pueden interpretar como el aumento anual observado durante el período de estudio (Tabla 4). La prueba de Pettitt coincide en todas las áreas donde se observa una tendencia ascendente en que el cambio ocurrió a partir de 1997 (Tabla 5).

**Tabla 2.** Tendencias detectadas en series temporales de duración de 24 h y 100, 1000, 5000 y 10000 km<sup>2</sup>.

Área km <sup>2</sup>	Mann-Kendall	$\rho$ de Spearman
100	tendencia ascendente	tendencia ascendente
1000	sin tendencia	tendencia ascendente
5000	sin tendencia	sin tendencia
10000	sin tendencia	sin tendencia

**Tabla 3.** Tendencias detectadas en series temporales de duración de 48 h y 100, 1000, 5000 y 10000 km<sup>2</sup>.

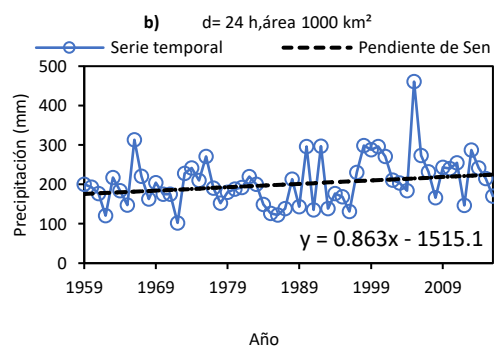
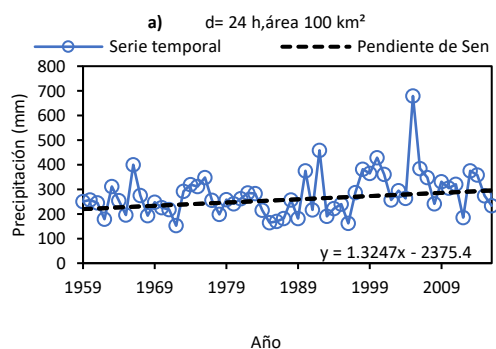
Área km <sup>2</sup>	Mann-Kendall	$\rho$ de Spearman
100	tendencia ascendente	tendencia ascendente
1000	tendencia ascendente	tendencia ascendente
5000	tendencia ascendente	tendencia ascendente
10000	sin tendencia	sin tendencia

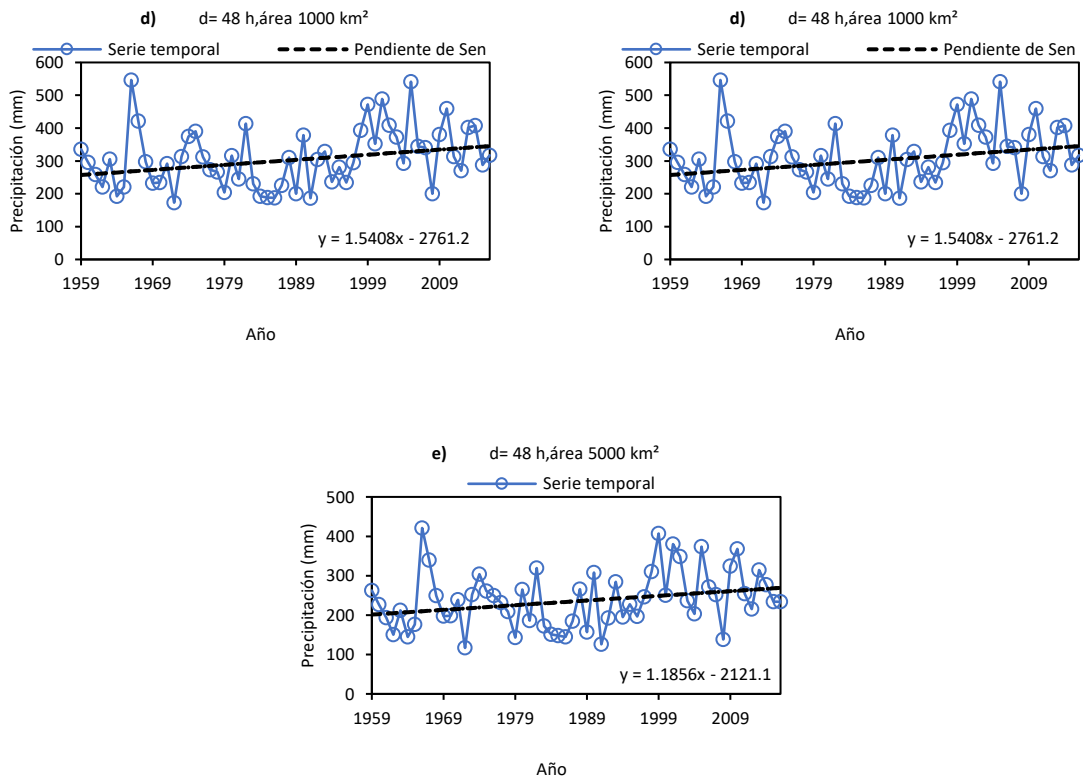
**Tabla 4.** Resultados obtenidos con la Pendiente de Sen.

Área km <sup>2</sup>	Pendiente de Sen (mm/año)	
	24 h	48 h
100	1.32	2.07
1000	0.86	1.54
5000	--	1.19
10000	--	--

**Tabla 5.** Resultados obtenidos con la Prueba de Pettitt

Área km <sup>2</sup>	Prueba de Pettitt			
	24 h		48 h	
	Presenta cambio	Año	Presenta cambio	Año
100	sí	1997	sí	1997
1000	sí	1997	sí	1997
5000	sí	1997	sí	1997
10000	no	--	no	--





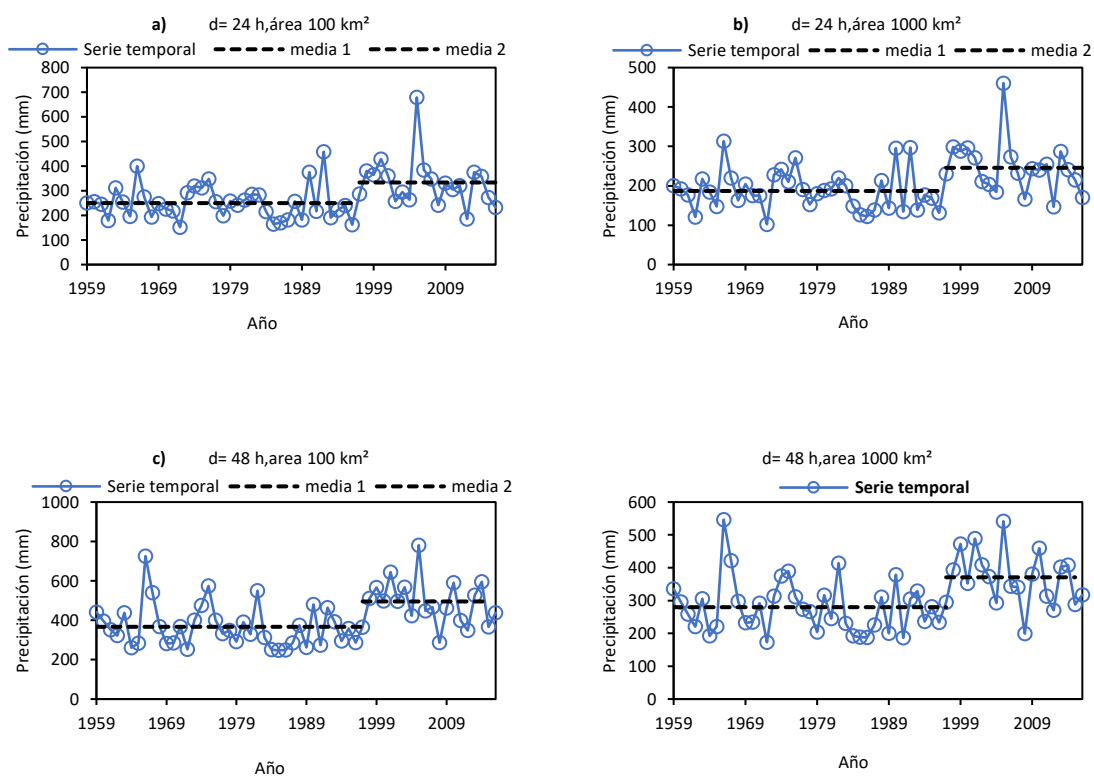
**Fig. 11.** Serie temporal de precipitación y Pendiente de Sen correspondiente a una duración de 24 horas, área de 100 (a) y 1000 km<sup>2</sup> (b); duración de 48 horas, área de 100 (c), 1000 (d) y 5000 (e) km<sup>2</sup>. Se indica la ecuación de la pendiente.

Las áreas en las que se observaron tendencias ascendentes para duraciones de 24 horas son más pequeñas en comparación con las áreas en las que se observaron tendencias para duraciones de 48 horas. Esta observación podría deberse al hecho de que, durante la trayectoria del ciclón tropical, las áreas afectadas por las bandas de nubes son más grandes a medida que aumenta la duración de la tormenta. Además, los valores de las tasas de aumento anual observados son más altos en el centro de la tormenta para ambas duraciones y disminuyen gradualmente a medida que aumenta la distribución espacial de la precipitación hasta alcanzar un área máxima en la cual la tasa de aumento ya no es estadísticamente significativa. Las medias de los periodos 1959-1996 y 1997-2016 son diferentes con un nivel de confianza del 95% (Tabla 6, Fig. 12a, Fig. 12b, Fig. 12c y Fig. 12d).

**Tabla 6.** Medias correspondientes a los periodos 1959-1996 y 1997-2016.

Área km <sup>2</sup>	24 h	48 h
	Periodos	

	1959-1996	1997-2016	1959-1996	1997-2016
	media 1	media 2	media 1	media 2
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
100	249.76	333.41	366.81	495.39
1000	186.90	245.66	279.91	370.84
5000	142.96	184.32	218.45	281.92
10000	---	---	---	---



**Fig. 12.** Serie temporal y prueba de Pettitt correspondiente con una duración de 24 horas, área de 100 (a) y 1000 km<sup>2</sup> (b); duración de 48 horas, área de 100 (c) y 1000 (d) km<sup>2</sup>.

## 5 DISCUSIÓN

Este estudio tuvo como objetivo examinar tanto la presencia como la magnitud de las tendencias en diversas áreas y duraciones de lluvias asociadas a CT. La metodología propuesta no solo facilita la detección de áreas que muestran tendencias en la lluvia asociada a los CT, sino que también permite determinar el umbral que delimita la extensión de tales tendencias dentro de estas áreas. Además, esta metodología es competente para identificar alteraciones en las lluvias asociadas a CT.

Comprender las tendencias temporales y espaciales en la distribución de la magnitud de las tormentas tiene una importancia crucial en el desarrollo de estrategias efectivas para mitigar daños y aprovechar los beneficios inherentes a estos fenómenos naturales.

Los resultados de este estudio indican que la lluvia asociada a ciclones tropicales, analizada mediante las curvas AAD, muestra una tendencia ascendente. En contraste, no se encontró ninguna tendencia en las áreas afectadas por la lluvia asociada a ciclones tropicales cuando se analizaron a través de las curvas FRA. Además, los resultados señalan un notable aumento en la media de lluvias asociadas ciclones tropicales a partir del año 1997. La certeza de estos resultados está sujeta a un nivel de confianza estadística del 95%.

**Tabla 7** Medias y porcentaje de variación durante los periodos 1959-1996 y 1997-2016.

Área km <sup>2</sup>	24 h		48 h			
	Periodos					
	1959-1996	1997-2016		1959-1996	1997-2016	
	media 1 (mm)	media 2 (mm)	variación (%)	media 1 (mm)	media 2 (mm)	variación (%)
100	249.76	333.41	133.4921525	366.81	495.39	135.05
1000	186.9	245.66	131.4392723	279.91	370.84	132.49
5000	142.96	184.32	128.9311696	218.45	281.92	129.05

El evento de El Niño de 1997-1998 fue uno de los eventos de El Niño más fuertes y significativos del siglo XX (Changnon, 2000). Los eventos de El Niño pueden tener impactos de gran alcance en los patrones climáticos, incluido el comportamiento de los ciclones tropicales. Durante los eventos de El Niño, hay cambios en las temperaturas de la superficie

del mar y en los patrones de circulación atmosférica que pueden influir en la frecuencia, intensidad y trayectorias de los ciclones tropicales en diversas áreas (Camargo & Sobel, 2005).

Si bien la influencia específica del evento de El Niño de 1997-1998 en las tendencias de lluvias asociadas a CT después de 1997 requeriría un análisis detallado de datos históricos y modelos climáticos, es posible que este potente evento de El Niño haya desempeñado un papel en algunas de las tendencias y medias observadas. Sin embargo, es plausible que este formidable evento de El Niño pueda haber tenido un papel en las tendencias observadas, incluido el notable aumento en la media de las lluvias asociadas a CT a partir de 1997. Por otro lado, una fase positiva de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) prevaleció de 1977 a 1999. La fase positiva de la PDO tiene el potencial de afectar los patrones climáticos y las condiciones atmosféricas de maneras que podrían aumentar la probabilidad o intensidad de eventos de ciclones tropicales (Wang y Liu, 2016). Tales influencias pueden haber desempeñado un papel en las tendencias y medias de las lluvias asociadas a CT identificadas después de 1997. Las medias de los períodos 1959-1996 y 1997-2016 son diferentes con una significancia estadística del 95% (Tabla 6, Fig. 12a, Fig. 12b, Fig. 12c y Fig. 12d).

Sin embargo, es esencial señalar que El Niño y La Niña pueden interactuar con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), creando relaciones complejas. Serían necesarios estudios climáticos detallados, análisis estadísticos y modelización para atribuir impactos específicos a la PDO en México.

La tendencia observada en áreas cercanas al centro de la tormenta y en las duraciones de lluvias asociadas a CT se alinea con estudios anteriores (Hasegawa & Emori, 2005; Yoshimura et al., 2006; Chauvin et al., 2006; Bengtsson et al., 2007; T. R. Knutson & Tuleya, 2008; Gualdi et al., 2008; Kim et al., 2014; Villarini et al., 2014; Tsou et al., 2016; Touma et al., 2019; Chu et al., 2020; T. Knutson et al., 2020; Guzman & Jiang, 2021; Chang et al., 2023). Esta consistencia subraya la solidez de estos hallazgos y su relevancia para nuestra comprensión de los sistemas ciclónicos en un clima cambiante y la variabilidad natural. En contraste, la ausencia de evidencia estadísticamente significativa con respecto a cambios predominantes en áreas afectadas por lluvias asociadas a ciclones tropicales proporciona un valioso contraste con estudios que han sugerido afectaciones y cambios en áreas afectadas



por lluvias asociadas a ciclones tropicales (Touma et al., 2019). Además, el notable aumento en la lluvia media asociada a ciclones tropicales, a partir de 1997, es coherente con el contexto más amplio del cambio climático global (Guzman y Jiang, 2021).

La importancia de nuestro estudio radica en su capacidad para ofrecer evidencia cuantitativa sobre la distribución temporal y espacial de lluvias asociadas a CT. A diferencia de investigaciones anteriores que a menudo se basaban en evaluaciones cualitativas limitadas o se centraban únicamente en eventos extremos, nuestro estudio proporciona una comprensión integral del comportamiento de las tormentas a lo largo de un período sustancial. Este conocimiento puede apoyar la formulación de políticas, la evaluación de riesgos y la preparación para desastres, reduciendo así los impactos negativos de las tormentas y maximizando los beneficios potenciales que puedan ofrecer, como el reabastecimiento de recursos hídricos y la agricultura.

Los resultados de este estudio contribuyen a llenar vacíos en nuestro conocimiento de los ciclones tropicales al centrarse en efectos localizados, resaltar la complejidad de los patrones de precipitación relacionados con los ciclones y proporcionar evidencia de cambios en el comportamiento de los ciclones a lo largo del tiempo.

La medida precisa de la precipitación tiene una importancia fundamental en los campos de la predicción de inundaciones, el control de inundaciones y la modelización del flujo hidrológico (Sattari et al. 2020). Una aplicación potencial de los hallazgos de este estudio para mitigar el riesgo de inundaciones implica el cálculo de la Precipitación Máxima Probable (PMP, por sus siglas en inglés) (ANEXO 2).

Sin embargo, uno de los componentes más importantes en la trasposición de tormentas, como el punto de rocío, no ha sido estudiado en su relación con el calentamiento global, lo que implicaría trabajos futuros sobre este tema.

## 6 CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló un marco cuantitativo para identificar tendencias temporales en lluvias asociadas a CT utilizando datos de series temporales derivados del cálculo de curvas AAD y FRA para múltiples tormentas observadas en México. Específicamente, se calculó una curva AAD anual para un conjunto de datos integral que comprende 58 ciclones tropicales que ocurrieron entre 1959 y 2016. Los resultados de este análisis proporcionan conocimientos significativos sobre el impacto del cambio climático y las variaciones naturales en el comportamiento de las lluvias asociadas a CT, contribuyendo así a una mayor comprensión de este fenómeno dinámico.

Adicionalmente, los resultados obtenidos demuestran de manera inequívoca una tendencia significativamente ascendente con el tiempo en la acumulación de precipitaciones de 24 horas para un área máxima de 1,700 km<sup>2</sup>. Además, hay una tendencia claramente ascendente en la acumulación de lluvias de 48 horas para un área máxima de 6,900 km<sup>2</sup>. En contraste, no se observaron cambios discernibles en las series temporales derivadas del análisis de los Factores de Reducción de área, lo que indica una falta de alteraciones significativas en el área afectada por estos eventos climáticos. Estos hallazgos respaldan fuertemente la hipótesis de que el cambio climático y la variabilidad natural desempeñan un papel en la influencia de eventos climáticos extremos, particularmente los ciclones tropicales.

Una limitación de este estudio es que, dado que el método de isoyetas considera precipitación areal en lugar de precipitación puntual, las ecuaciones resultantes para las curvas AAD tienden a mostrar divergencia cuando se aplican a áreas muy pequeñas. Por lo tanto, sugerimos utilizar estas ecuaciones para las curvas AAD en áreas mayores a 100 km<sup>2</sup>.

Para obtener una comprensión más integral de las tendencias de lluvias asociadas a CT investigaciones futuras podrían explorar variaciones espaciales y los factores que afectan de manera diferente a áreas específicas. Analizar fenómenos climáticos específicos o características geográficas podría proporcionar información sobre la falta de tendencias significativas en regiones afectadas por precipitaciones vinculadas a ciclones tropicales. Además, investigaciones sobre las consecuencias de las tendencias de lluvias asociadas a CT identificadas en sistemas hidrológicos y ecosistemas podrían ser fundamentales.

El análisis cuantitativo de la distribución temporal y espacial de las lluvias asociadas a CT presentado en este estudio contribuye a la toma de decisiones informada en la gestión de desastres y la asignación de recursos. Ofrecemos conocimientos significativos sobre la naturaleza en evolución de las lluvias asociadas a CT, permitiendo que la sociedad se adapte y mitigue sus efectos de manera más efectiva. Esta investigación representa un paso significativo hacia un futuro más resiliente y sostenible ante los cambiantes patrones climáticos y el aumento de los riesgos de tormentas. Además, estos hallazgos respaldan la necesidad de implementar intervenciones tanto estructurales como no estructurales para mitigar la incidencia e impacto de eventos de inundaciones. Asimismo, la metodología es aplicable a nivel regional en cualquier área donde haya presencia de CT y registros de lluvia. Los resultados pueden variar entre cuencas, influenciados por la climatología regional de las cuencas oceánicas donde se originan los ciclones tropicales.

## REFERENCIAS

- Allison, P. (1998). *Multiple Regression: A Primer*. SAGE Publications.
- Aparicio, F. J. (2005). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa.
- Asefa Bogale, G. (2023). Analysis the characterization of climate change and its impacts on smallholder farmers in Eastern Ethiopia. *Heliyon*, 9(10), e20293.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20293>
- Benedetto, K. M., & Trepanier, J. C. (2020). Climatology and Spatiotemporal Analysis of North Atlantic Rapidly Intensifying Hurricanes (1851–2017). *Atmosphere*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/atmos11030291>
- Bengtsson, L., Hodges, K. I., Esch, M., Keenlyside, N., Kornblueh, L., Luo, J.-J., & Yamagata, T. (2007). How may tropical cyclones change in a warmer climate? *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 59(4), 539-561.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00251.x>
- Benoit, K. (2011). *Linear Regression Models with Logarithmic Transformations*.
- Brackins, J. T., & Kalyanapu, A. J. (2020). Evaluation of parametric precipitation models in reproducing tropical cyclone rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 580, 124255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124255>
- Brekke, L., Kiang, J., Olsen, R., Pulwarty, R., Raff, D., Turnipseed, P., Webb, R., & White, K. (2009). *Climate Change and Water Resources Management: A Federal Perspective*.
- Breña, A., Pedrozo, A., Pozos, O., Jiménez, S. A., & López, M. R. (2015). The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>

- Burić, D., & Penjišević. (2023, octubre 11). *Southern Hemisphere temperature trend in association with greenhouse gases, El Niño Southern Oscillation, and Antarctic Oscillation*. Országos Meteorológiai Szolgálat. <https://www.met.hu/ismeret-tar/kiadvanyok/idojaras/index.php?no=2023.1.2>
- Camargo, S. J., & Sobel, A. H. (2005). Western North Pacific Tropical Cyclone Intensity and ENSO. *Journal of Climate*, 18(15), 2996-3006.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI3457.1>
- Canavos, G. (1988). *Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos*. McGraw Hill México.
- CENAPRED. (2007). *Fascículos Ciclones Tropicales* (Fascículos, p. 50). CENAPRED.
- Cha, E. J., Knutson, T. R., Lee, T.-C., Ying, M., & Nakaegawa, T. (2020). Third assessment on impacts of climate change on tropical cyclones in the Typhoon Committee Region – Part II: Future projections. *Tropical Cyclone Research and Review*, 9(2), 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.tcr.2020.04.005>
- Chang, M., Ho, C.-H., Ho, J., & Cha, E.-J. (2023). Centennial analysis in tropical cyclone-induced precipitation in Korea. *Weather and Climate Extremes*, 39, 100549.  
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100549>
- Changnon, S. A. (2000). What Made El Niño 1997-1998 Famous?: The Key Events Associated with a Unique Climatic Event. En S. A. Changnon (Ed.), *El Niño, 1997-1998: The Climate Event of the Century* (p. 0). Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/oso/9780195135510.003.0007>
- Chauvin, F., Royer, J.-F., & Déqué, M. (2006). Response of hurricane-type vortices to global warming as simulated by ARPEGE-Climat at high resolution. *Climate Dynamics*, 27(4), 377-399. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0135-7>

- Chen, C., Zhang, Q., Kashani, M. H., Jun, C., Bateni, S. M., Band, S. S., Dash, S. S., & Chau, K.-W. (2022). Forecast of rainfall distribution based on fixed sliding window long short-term memory. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 248-261. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2009374>
- Cheung, K. (2018). *Recent Advances in Research and Forecasting of Tropical Cyclone Rainfall*. 7(2), 22.
- Chu, J.-E., Lee, S.-S., Timmermann, A., Wengel, C., Stuecker, M. F., & Yamaguchi, R. (2020). Reduced tropical cyclone densities and ocean effects due to anthropogenic greenhouse warming. *Science Advances*, 6(51), eabd5109. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd5109>
- CONAGUA. (n.d.a). Sistema de Información Hidrológica (Hydrological Information System). <https://sih.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA. (n.d.b). Información histórica. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>
- Conde, C. (2007). *México y el cambio climático global*. 28.
- Conte, L. C., Bayer, D. M., & Bayer, F. M. (2019). Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: Case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 64(11), 1312-1326. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1632461>
- Dong, M., Chen, L., Li, Y., & Lu, C. (2010). Rainfall Reinforcement Associated with Landfalling Tropical Cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67(11), 3541-3558. <https://doi.org/10.1175/2010JAS3268.1>

- Dore, M. H. I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31(8), 1167-1181.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686-688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Englehart, P. J., & Douglas, A. V. (2001). The role of eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico. *International Journal of Climatology*, 21(11), 1357-1370. <https://doi.org/10.1002/joc.637>
- Fernández, A., Zavala, J., Romero, R., Conde, C., & Trejo, R. I. (2014). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación en México y en Centroamérica* (p. 22). Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Gao, F., Wang, Y., Chen, X., & Yang, W. (2020). Trend Analysis of Rainfall Time Series in Shanxi Province, Northern China (1957–2019). *Water*, 12(9), Article 9.  
<https://doi.org/10.3390/w12092335>
- García-Soto, C., Cheng, L., Caesar, L., Schmidtko, S., Jewett, E. B., Cheripka, A., Rigor, I., Caballero, A., Chiba, S., Báez, J. C., Zielinski, T., & Abraham, J. P. (2021). An Overview of Ocean Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature, Ocean Heat Content, Ocean pH, Dissolved Oxygen Concentration, Arctic Sea Ice Extent, Thickness and Volume, Sea Level and Strength of the AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation). *Frontiers in Marine Science*.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.642372>
- Gay, C., & Rueda, A. (2015). Reporte Mexicano de Cambio Climático. *PINCC*.  
<https://www.pincc.unam.mx/publicaciones/reportes-mexicano/>

- González, F. J., & Arreguín, F. I. (2021). *Impacto del cambio global sobre las presas de almacenamiento y derivación. Una guía para fortalecer la normatividad de seguridad de presas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. <https://doi.org/10.22201/iingen.9786073047951e.2021>
- Goodyear, H. (1968). *Frequency and Areal Distributions of Tropical Storm Rainfall in the United States Coastal Region on the Gulf of Mexico* (TECHNICAL REPORT WB-7). U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE.
- Gualdi, S., Scoccimarro, E., & Navarra, A. (2008). Changes in Tropical Cyclone Activity due to Global Warming: Results from a High-Resolution Coupled General Circulation Model. *Journal of Climate*, 21(20), 5204-5228. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1921.1>
- Guzman, O., & Jiang, H. (2021). Global increase in tropical cyclone rain rate. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25685-2>
- Hamed, K. H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3), 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>
- Hasegawa, A., & Emori, S. (2005). Tropical Cyclones and Associated Precipitation over the Western North Pacific: T106 Atmospheric GCM Simulation for Present-day and Doubled CO<sub>2</sub> Climates. *Sola*, 1, 145-148. <https://doi.org/10.2151/sola.2005-038>
- Hernández, M., Azpra, E., Carrasco, G., Delgado, O., & Villicaña, F. (2001). *Los ciclones tropicales de México*. Plaza y Valdés.
- INEGI. (2021). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2020*. Version actualizada. 2021. 859.



- IPCC. (2002). *IPCC Workshop on Changes in Extreme Weather and Climate Events* (p. 107).
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 104).
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 157).
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Kim, H.-S., Vecchi, G. A., Knutson, T. R., Anderson, W. G., Delworth, T. L., Rosati, A., Zeng, F., & Zhao, M. (2014). Tropical Cyclone Simulation and Response to CO2 Doubling in the GFDL CM2.5 High-Resolution Coupled Climate Model. *Journal of Climate*, 27(21), 8034-8054. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00475.1>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K., & Wu, L. (2020). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303-E322. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>
- Knutson, T., Landsea, C., & Emanuel, K. (2010). Tropical Cyclones and Climate Change: A Review. En J. C. L. Chan & J. D. Kepert, *World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate* (Vol. 4, pp. 243-284). WORLD SCIENTIFIC. [https://doi.org/10.1142/9789814293488\\_0009](https://doi.org/10.1142/9789814293488_0009)

- Knutson, T. R., Sirutis, J. J., Garner, S. T., Vecchi, G. A., & Held, I. M. (2008). Simulated reduction in Atlantic hurricane frequency under twenty-first-century warming conditions. *Nature Geoscience*, *1*(6), Article 6. <https://doi.org/10.1038/ngeo202>
- Knutson, T. R., & Tuleya, R. E. (2008, mayo). *Tropical cyclones and climate change: Revisiting recent studies at GFDL*. Climate Extremes and Society; Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535840.010>
- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. (2000). *WCDMP, 45. Detecting trend and other changes in hydrological data*. WMO.
- Lehmann, E. L., & D'Abrera, H. J. (1975). *Nonparametrics: Statistical methods based on ranks* (pp. xvi, 457). Holden-Day.
- Lin, Y., Zhao, M., & Zhang, M. (2015). Tropical cyclone rainfall area controlled by relative sea surface temperature. *Nature Communications*, *6*(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms7591>
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulus, J. (1997). *Hidrología para ingenieros*. McGraw-Hill Latinoamérica, S.A.
- Met Office. (2013). *Climate: Observations, projections and impacts. Summary factsheet Mexico*.
- Moon, M., Ha, K.-J., Kim, D., Ho, C.-H., Park, D.-S. R., Chu, J.-E., Lee, S.-S., & Chan, J. C. L. (2023). Rainfall strength and area from landfalling tropical cyclones over the North Indian and western North Pacific oceans under increased CO2 conditions. *Weather and Climate Extremes*, *41*, 100581. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100581>
- NOAA. (n.d.a). Index of data-hurdat. <https://www.nhc.noaa.gov/data/hurdat/hurdat2-1851-2019-052520.txt>

- NOAA. (n.d.b). Index of data-hurdat. <https://www.nhc.noaa.gov/data/hurdat/hurdat2-nepac-1949-2019-042320.txt>
- Paredes, M., Schenkel, B. A., Edwards, R., & Coniglio, M. (2021). Tropical Cyclone Outer Size Impacts the Number and Location of Tornadoes. *Geophysical Research Letters*, 48(24), e2021GL095922. <https://doi.org/10.1029/2021GL095922>
- Patricola, C. M., & Wehner, M. F. (2018). Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 563(7731), 339-346. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0673-2>
- Pérez, E. G. (2003). *Un Modelo de Altura–Área–Duración (AAD) de tormentas en Venezuela*. 10(1), 47-51.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Ren, F., Wu, G., Dong, W., Wang, X., Wang, Y., Ai, W., & Li, W. (2006). Changes in tropical cyclone precipitation over China. *Geophysical Research Letters*, 33(20), L20702. <https://doi.org/10.1029/2006GL027951>
- Sattari, M. T., Falsafian, K., Irvem, A., S, S., & Qasem, S. N. (2020). Potential of kernel and tree-based machine-learning models for estimating missing data of rainfall. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 1078-1094. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1803971>
- SEMARNAT. (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

SEMARNAT. (2014). *Versión de Difusión del Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 (PECC 2014-2018)* (p. 91). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.  
<https://doi.org/10.2307/2285891>

Shin, Y., Takara, K., & Ostric, M. (2013). *Depth-Area-Duration Analysis in a Korean River Basin*. 69(4), I\_151-I\_156. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.69.I\\_151](https://doi.org/10.2208/jscejhe.69.I_151)

Singh, A., Reager, J., & Behrangi, A. (2021). Estimation of hydrological drought recovery based on precipitation and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage deficit. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 511-526.  
<https://doi.org/10.5194/hess-25-511-2021>

Siqueira, B., & Nery, J. T. (2021). *Spatial and temporal variability of precipitation concentration in northeastern Brazil*. <https://doi.org/10.14350/rig.60091>

Svensson, C., & Jones, D. a. (2010). Review of methods for deriving areal reduction factors. *Journal of Flood Risk Management*, 3(3), 232-245.  
<https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2010.01075.x>

Theil, H. (1992). A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. En B. Raj & J. Koerts (Eds.), *Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics: Econometric Theory and Methodology* (pp. 345-381). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20)

Touma, D., Stevenson, S., Camargo, S. J., Horton, D. E., & Diffenbaugh, N. S. (2019). Variations in the Intensity and Spatial Extent of Tropical Cyclone Precipitation.

*Geophysical Research Letters*, 46(23), 13992-14002.

<https://doi.org/10.1029/2019GL083452>

Trenberth, K. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1), 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>

Tsou, C.-H., Huang, P.-Y., Tu, C.-Y., Chen, C.-T., Tzeng, T.-P., & Cheng, C.-T. (2016). Present simulation and future typhoon activity projection over Western North Pacific and Taiwan/East coast of China in 20-km HiRAM climate model. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 27(5), 687-703. Scopus. <https://doi.org/10.3319/TAO.2016.06.13.04>

Vezzoli, R., Pecora, S., Zenoni, E., & Tonelli, F. (2012). *Data Analysis to Detect Inhomogeneity, Change Points, Trends in Observations: An Application to Po River Discharge Extremes* (SSRN Scholarly Paper 2195345). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2195345>

Villarini, G., Lavers, D. A., Scoccimarro, E., Zhao, M., Wehner, M. F., Vecchi, G. A., Knutson, T. R., & Reed, K. A. (2014). Sensitivity of Tropical Cyclone Rainfall to Idealized Global-Scale Forcings. *Journal of Climate*, 27(12), 4622-4641. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00780.1>

Wang, W., Du, Y., Chau, K., Chen, H., Liu, C., & Ma, Q. (2021). A Comparison of BPNN, GMDH, and ARIMA for Monthly Rainfall Forecasting Based on Wavelet Packet Decomposition. *Water*, 13(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/w13202871>

WMO. (2009). *Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP)*. WMO. *World Bank Climate Change Knowledge Portal*. (s. f.). Recuperado 6 de octubre de 2023, de <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

- Yoshimura, J., Sugi, M., & Noda, A. (2006). Influence of Greenhouse Warming on Tropical Cyclone Frequency. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 84(2), 405-428. <https://doi.org/10.2151/jmsj.84.405>
- Yue, S., & Pilon, P. (2004). A comparison of the power of the t test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend detection / Une comparaison de la puissance des tests t de Student, de Mann-Kendall et du bootstrap pour la détection de tendance. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 21-37. <https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.21.53996>
- Zhang, J., Wu, L., Ren, F., & Cui, X. (2013). Changes in Tropical Cyclone Rainfall in China. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 91(5), 585-595. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-502>

## ANEXO 1

**Tabla 8.** Ecuaciones logarítmicas de cada CT seleccionado para este estudio, obtenidas a partir de las curvas AAD

<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
1959	Manzanillo	$y = -21.77\ln(x) + 350.53$	$y = -45.73\ln(x) + 651.68$
1960	Florence	$y = -27.61\ln(x) + 383.35$	$y = -42.89\ln(x) + 592.26$
1961	Tara	$y = -29.8\ln(x) + 382.94$	$y = -40.63\ln(x) + 539.49$
1962	Claudia	$y = -25.59\ln(x) + 297.27$	$y = -43.89\ln(x) + 524.1$
1963	Lilian	$y = -40.95\ln(x) + 500.01$	$y = -57.76\ln(x) + 704.16$
1964	Hilda	$y = -30.58\ln(x) + 395.36$	$y = -29.83\ln(x) + 398.43$
1965	Hezel	$y = -21\ln(x) + 292.92$	$y = -27.54\ln(x) + 410.75$
1966	Inez	$y = -37.3\ln(x) + 571.14$	$y = -77.98\ln(x) + 1085.2$
1967	Beulah	$y = -23.8\ln(x) + 384.64$	$y = -23.8\ln(x) + 384.64$
1968	Naomi	$y = -13.06\ln(x) + 252.99$	$y = -30.17\ln(x) + 506.53$
1969	Jennifer	$y = -18.86\ln(x) + 334.49$	$y = -21.63\ln(x) + 381.5$
1970	Ella	$y = -21.99\ln(x) + 326.8$	$y = -22.37\ln(x) + 388.68$
1971	Lily	$y = -18.48\ln(x) + 302.86$	$y = -32.76\ln(x) + 518.09$
1972	Agnes	$y = -21.67\ln(x) + 252.07$	$y = -34.9\ln(x) + 414.04$
1973	Claudia	$y = -27.6\ln(x) + 418.55$	$y = -38.08\ln(x) + 576.54$
1974	Fifi	$y = -33.86\ln(x) + 475.62$	$y = -43.82\ln(x) + 677.32$
1975	Eleanor	$y = -43.65\ln(x) + 511.95$	$y = -80.02\ln(x) + 942.53$
1976	Liza	$y = 33.32\ln(x) + 500.85$	$y = -38.6\ln(x) + 578.47$
1977	Anita	$y = -28.31\ln(x) + 386.07$	$y = -25.84\ln(x) + 451.72$

<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
1978	Olivia	$y = -19.7\ln(x) + 288.73$	$y = -35.83\ln(x) + 514.11$
1979	Ignacio	$y = -33.89\ln(x) + 414.15$	$y = -38.16\ln(x) + 467.82$
1980	Hermine	$y = -23.21\ln(x) + 348.23$	$y = -32.01\ln(x) + 537.73$
1981	Norma	$y = -30.38\ln(x) + 402.07$	$y = -36.61\ln(x) + 498.11$
1982	Paul	$y = -28.81\ln(x) + 418.62$	$y = -58.76\ln(x) + 819.72$
1983	Adolph	$y = -36.18\ln(x) + 449.98$	$y = -35.78\ln(x) + 477.24$
1984	Odile	$y = -29.02\ln(x) + 349.28$	$y = -25.43\ln(x) + 367.67$
1985	Waldo	$y = -16.6\ln(x) + 240.92$	$y = -25.32\ln(x) + 363.84$
1986	Paine	$y = -20.29\ln(x) + 262.78$	$y = -26.66\ln(x) + 372.05$
1987	Eugene	$y = -18.46\ln(x) + 266.1$	$y = -25.73\ln(x) + 403.62$
1988	Gilberto	$y = -18.81\ln(x) + 343.03$	$y = -27.84\ln(x) + 503$
1989	Cosme	$y = -16.69\ln(x) + 258.5$	$y = -27.14\ln(x) + 387.97$
1990	Diana	$y = -34.3\ln(x) + 532.78$	$y = -43.9\ln(x) + 681.52$
1991	DT 2	$y = -35.54\ln(x) + 380.46$	$y = -37.67\ln(x) + 446.94$
1992	Virgil	$y = -70.3\ln(x) + 782.31$	$y = -69.61\ln(x) + 785.1$
1993	Gert	$y = -22.68\ln(x) + 295.24$	$y = -27.51\ln(x) + 518.73$
1994	DT5	$y = -19.45\ln(x) + 311.38$	$y = -25.6\ln(x) + 412.77$
1995	Gabrielle	$y = -30.86\ln(x) + 381.88$	$y = -33.2\ln(x) + 510.56$
1996	Dolly	$y = -13.05\ln(x) + 221.6$	$y = -23.22\ln(x) + 394.24$
1997	Pauline	$y = -24.46\ln(x) + 399.46$	$y = -30.29\ln(x) + 504.45$
1998	Isis	$y = -35.82\ln(x) + 545.91$	$y = -51.3\ln(x) + 747.3$
1999	DT 11	$y = -33.21\ln(x) + 517.49$	$y = -40.78\ln(x) + 754.23$



<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
2000	Keith	$y = -57.44\ln(x) + 692.75$	$y = -63.14\ln(x) + 788.05$
2001	Juliette	$y = -38.88\ln(x) + 539.48$	$y = -67.36\ln(x) + 954.05$
2002	Isidoro	$y = -19.96\ln(x) + 348.66$	$y = -37.78\ln(x) + 669.93$
2003	Olaf	$y = -39.38\ln(x) + 475.81$	$y = -84.67\ln(x) + 957.68$
2004	DT16E	$y = -34.28\ln(x) + 420.79$	$y = -56.16\ln(x) + 681.09$
2005	Wilma	$y = -94.7\ln(x) + 1114.9$	$y = -104.2\ln(x) + 1261$
2006	Jhon	$y = -48.04\ln(x) + 605.19$	$y = -44.97\ln(x) + 654.66$
2007	Henriette	$y = -50.38\ln(x) + 579.96$	$y = -54.84\ln(x) + 719.14$
2008	DT 5E	$y = -32.41\ln(x) + 390.2$	$y = -38.02\ln(x) + 462.36$
2009	Jimena	$y = -38.02\ln(x) + 505.93$	$y = -35.2\ln(x) + 623.62$
2010	Alex	$y = -28.29\ln(x) + 435.68$	$y = -56.76\ln(x) + 851.41$
2011	Jova	$y = -28.67\ln(x) + 452.56$	$y = -36.88\ln(x) + 568.39$
2012	Carlotta	$y = -16.73\ln(x) + 262.28$	$y = -34.16\ln(x) + 506.09$
2013	Barry	$y = -38.36\ln(x) + 552.19$	$y = -54.41\ln(x) + 777.99$
2014	Trudy	$y = -50.58\ln(x) + 590.83$	$y = -81.31\ln(x) + 969.68$
2015	Patricia	$y = -25.31\ln(x) + 389.74$	$y = -33.75\ln(x) + 521.51$
2016	Newton	$y = -27.29\ln(x) + 358.5$	$y = -52\ln(x) + 676.8$

**Tabla 9.** Ecuaciones logarítmicas de cada CT seleccionado para este estudio, obtenidas a partir de las curvas FRA.

<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
1959	Manzanillo	$y = -0.087\ln(x) + 1.4041$	$y = -0.104\ln(x) + 1.4819$
1960	Florence	$y = -0.098\ln(x) + 1.3593$	$y = -0.099\ln(x) + 1.3619$
1961	Tara	$y = -0.141\ln(x) + 1.8129$	$y = -0.138\ln(x) + 1.8358$
1962	Claudia	$y = -0.129\ln(x) + 1.5002$	$y = -0.123\ln(x) + 1.4651$
1963	Lilian	$y = -0.133\ln(x) + 1.6236$	$y = -0.137\ln(x) + 1.6704$
1964	Hilda	$y = -0.122\ln(x) + 1.5814$	$y = -0.117\ln(x) + 1.5668$
1965	Hezel	$y = -0.105\ln(x) + 1.4625$	$y = -0.099\ln(x) + 1.4765$
1966	Inez	$y = -0.094\ln(x) + 1.4433$	$y = -0.112\ln(x) + 1.5561$
1967	Beulah	$y = -0.081\ln(x) + 1.3057$	$y = -0.088\ln(x) + 1.3262$
1968	Naomi	$y = -0.064\ln(x) + 1.2422$	$y = -0.092\ln(x) + 1.5488$
1969	Jennifer	$y = -0.072\ln(x) + 1.2746$	$y = -0.072\ln(x) + 1.2766$
1970	Ella	$y = -0.1\ln(x) + 1.4795$	$y = -0.075\ln(x) + 1.3104$
1971	Lily	$y = -0.082\ln(x) + 1.3398$	$y = -0.1\ln(x) + 1.4884$
1972	Agnes	$y = -0.133\ln(x) + 1.5413$	$y = -0.13\ln(x) + 1.5402$
1973	Claudia	$y = -0.088\ln(x) + 1.3287$	$y = -0.114\ln(x) + 1.5774$
1974	Orlene	$y = -0.096\ln(x) + 1.5087$	$y = -0.106\ln(x) + 1.518$
1975	Eleanor	$y = -0.137\ln(x) + 1.5727$	$y = -0.129\ln(x) + 1.4867$
1976	Liza	$y = -0.094\ln(x) + 1.4199$	$y = -0.103\ln(x) + 1.4997$
1977	Anita	$y = -0.111\ln(x) + 1.5177$	$y = -0.079\ln(x) + 1.3894$
1978	Olivia	$y = -0.089\ln(x) + 1.3094$	$y = -0.102\ln(x) + 1.4194$

<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
1979	Ignacio	$y = -0.134\ln(x) + 1.6431$	$y = -0.134\ln(x) + 1.6399$
1980	Hermine	$y = -0.088\ln(x) + 1.3242$	$y = -0.097\ln(x) + 1.5184$
1981	Norma	$y = -0.115\ln(x) + 1.5184$	$y = -0.118\ln(x) + 1.6009$
1982	Paul	$y = -0.096\ln(x) + 1.3917$	$y = -0.104\ln(x) + 1.4527$
1983	Adolph	$y = -0.119\ln(x) + 1.4798$	$y = -0.107\ln(x) + 1.4334$
1984	Odile	$y = -0.097\ln(x) + 1.1643$	$y = -0.078\ln(x) + 1.1333$
1985	Waldo	$y = -0.098\ln(x) + 1.4212$	$y = -0.118\ln(x) + 1.6367$
1986	Paine	$y = -0.139\ln(x) + 1.7659$	$y = -0.126\ln(x) + 1.7126$
1987	Eugene	$y = -0.103\ln(x) + 1.4891$	$y = -0.124\ln(x) + 1.7707$
1988	Gilberto	$y = -0.074\ln(x) + 1.3101$	$y = -0.065\ln(x) + 1.2929$
1989	Cosme	$y = -0.107\ln(x) + 1.6177$	$y = -0.099\ln(x) + 1.4534$
1990	Diana	$y = -0.129\ln(x) + 1.8492$	$y = -0.12\ln(x) + 1.7318$
1991	DT 2	$y = -0.118\ln(x) + 1.2591$	$y = -0.102\ln(x) + 1.21$
1992	Virgil	$y = -0.183\ln(x) + 2.0331$	$y = -0.178\ln(x) + 2.0052$
1993	Gert	$y = -0.118\ln(x) + 1.5192$	$y = -0.129\ln(x) + 1.8$
1994	DT5	$y = -0.088\ln(x) + 1.4071$	$y = -0.098\ln(x) + 1.495$
1995	Gabrielle	$y = -0.092\ln(x) + 1.295$	$y = -0.092\ln(x) + 1.3618$
1996	Dolly	$y = -0.065\ln(x) + 1.1063$	$y = -0.065\ln(x) + 1.1092$
1997	Pauline	$y = -0.08\ln(x) + 1.3104$	$y = -0.077\ln(x) + 1.2868$
1998	Isis	$y = -0.101\ln(x) + 1.4738$	$y = -0.093\ln(x) + 1.3587$
1999	DT 11	$y = -0.075\ln(x) + 1.1732$	$y = -0.063\ln(x) + 1.1683$
2000	Keith	$y = -0.121\ln(x) + 1.4601$	$y = -0.114\ln(x) + 1.4254$

<b>Año</b>	<b>Nombre CT</b>	<b>Ecuación 24 h</b>	<b>Ecuación 48 h</b>
2001	Juliette	$y = -0.132\ln(x) + 1.7252$	$y = -0.125\ln(x) + 1.6554$
2002	Isidoro	$y = -0.081\ln(x) + 1.3982$	$y = -0.079\ln(x) + 1.3855$
2003	Olaf	$y = -0.115\ln(x) + 1.3843$	$y = -0.128\ln(x) + 1.4516$
2004	DT16E	$y = -0.146\ln(x) + 1.7872$	$y = -0.152\ln(x) + 1.8494$
2005	Wilma	$y = -0.151\ln(x) + 1.7768$	$y = -0.143\ln(x) + 1.7301$
2006	Jhon	$y = -0.124\ln(x) + 1.5579$	$y = -0.11\ln(x) + 1.5741$
2007	Henriette	$y = -0.128\ln(x) + 1.4695$	$y = -0.123\ln(x) + 1.5646$
2008	DT 5E	$y = -0.162\ln(x) + 1.8473$	$y = -0.145\ln(x) + 1.7111$
2009	Jimena	$y = -0.12\ln(x) + 1.5927$	$y = -0.096\ln(x) + 1.5361$
2010	Alex	$y = -0.12\ln(x) + 1.7887$	$y = -0.13\ln(x) + 1.8942$
2011	Jova	$y = -0.107\ln(x) + 1.6477$	$y = -0.109\ln(x) + 1.6416$
2012	Carlotta	$y = -0.083\ln(x) + 1.2599$	$y = -0.087\ln(x) + 1.2857$
2013	Barry	$y = -0.124\ln(x) + 1.7381$	$y = -0.125\ln(x) + 1.7411$
2014	Trudy	$y = -0.125\ln(x) + 1.4655$	$y = -0.122\ln(x) + 1.4563$
2015	Patricia	$y = -0.107\ln(x) + 1.6164$	$y = -0.114\ln(x) + 1.6872$
2016	Newton	$y = -0.108\ln(x) + 1.4136$	$y = -0.112\ln(x) + 1.4602$

**Tabla 10.** Valores de lluvia para áreas de 100, 1000, 5000 y 10000 km<sup>2</sup> y duración de 24 horas obtenidas a partir de las ecuaciones logarítmicas correspondientes a cada CT.

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
1959	Manzanillo	250.28	200.15	165.11	150.02
1960	Florence	256.20	192.63	148.19	129.05
1961	Tara	245.71	177.09	129.13	108.47
1962	Claudia	179.42	120.50	79.32	61.58
1963	Lilian	311.43	217.14	151.23	122.85
1964	Hilda	254.53	184.12	134.90	113.71
1965	Hezel	196.21	147.86	114.06	99.50
1966	Inez	399.37	313.48	253.45	227.59
1967	Beulah	275.04	220.24	181.93	165.43
1968	Naomi	192.85	162.77	141.76	132.70
1969	Jennifer	247.64	204.21	173.86	160.78
1970	Ella	225.53	174.90	139.51	124.26
1971	Lily	217.76	175.20	145.46	132.65
1972	Agnes	152.28	102.38	67.50	52.48
1973	Claudia	291.45	227.90	183.48	164.34
1974	Fifi	319.69	241.72	187.23	163.76
1975	Eleanor	310.93	210.43	140.17	109.92
1976	Liza	347.41	270.68	217.06	193.96
1977	Anita	255.70	190.51	144.95	125.33
1978	Olivia	198.01	152.65	120.94	107.29

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
1979	Ignacio	258.08	180.05	125.50	102.01
1980	Hermine	241.34	187.90	150.55	134.46
1981	Norma	262.16	192.21	143.32	122.26
1982	Paul	285.99	219.68	173.32	153.36
1983	Adolph	283.36	200.06	141.83	116.75
1984	Odile	215.64	148.82	102.11	82.00
1985	Waldo	164.47	126.25	99.53	88.03
1986	Paine	169.34	122.62	89.97	75.90
1987	Eugene	181.09	138.58	108.87	96.08
1988	Gilberto	256.41	213.10	182.82	169.78
1989	Cosme	181.64	143.21	116.35	104.78
1990	Diana	374.82	295.84	240.64	216.87
1991	DT 2	216.79	134.96	77.76	53.12
1992	Virgil	458.57	296.69	183.55	134.82
1993	Gert	190.79	138.57	102.07	86.35
1994	DT5	221.81	177.02	145.72	132.24
1995	Gabrielle	239.76	168.71	119.04	97.65
1996	Dolly	161.50	131.45	110.45	101.41
1997	Pauline	286.82	230.50	191.13	174.18
1998	Isis	380.95	298.47	240.82	216.00
1999	DT 11	364.55	288.08	234.63	211.61
2000	Keith	428.23	295.97	203.52	163.71

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
2001	Juliette	360.43	270.91	208.33	181.38
2002	Isidoro	256.74	210.78	178.66	164.82
2003	Olaf	294.46	203.78	140.40	113.11
2004	DT16E	262.92	183.99	128.82	105.06
2005	Wilma	678.79	460.74	308.32	242.68
2006	Jhon	383.96	273.34	196.02	162.73
2007	Henriette	347.95	231.95	150.86	115.94
2008	DT 5E	240.95	166.32	114.16	91.69
2009	Jimena	330.84	243.30	182.11	155.75
2010	Alex	305.40	240.26	194.73	175.12
2011	Jova	320.53	254.51	208.37	188.50
2012	Carlotta	185.24	146.71	119.79	108.19
2013	Barry	375.54	287.21	225.47	198.88
2014	Trudy	357.90	241.44	160.03	124.97
2015	Patricia	273.18	214.90	174.17	156.63
2016	newton	232.82	169.99	126.07	107.15

**Tabla 11.** Valores de lluvia para áreas de 100, 1000, 5000 y 10000 km<sup>2</sup> y duración de 48 horas obtenidas a partir de las ecuaciones logarítmicas correspondientes a cada CT.

<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
1959	Manzanillo	441.09	335.79	262.19	230.49
1960	Florence	394.74	295.99	226.96	197.23
1961	Tara	352.38	258.83	193.44	165.27
1962	Claudia	321.98	220.92	150.28	119.86
1963	Lilian	438.17	305.17	212.21	172.17
1964	Hilda	261.06	192.37	144.36	123.69
1965	Hezel	283.92	220.51	176.19	157.10
1966	Inez	726.09	546.53	421.03	366.98
1967	Beulah	539.45	421.75	339.47	304.04
1968	Naomi	367.59	298.12	249.57	228.65
1969	Jennifer	281.89	232.09	197.27	182.28
1970	Ella	285.66	234.15	198.15	182.64
1971	Lily	367.225	291.792	239.067	216.359
1972	Agnes	253.32	172.96	116.79	92.60
1973	Claudia	401.18	313.49	252.21	225.81
1974	Fifi	475.52	374.62	304.10	273.72
1975	Eleanor	574.02	389.77	260.98	205.52
1976	Liza	400.710	311.831	249.706	222.951
1977	Anita	332.72	273.22	231.64	213.72
1978	Olivia	349.11	266.61	208.94	184.10



<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
1979	Ignacio	292.09	204.22	142.80	116.35
1980	Hermine	390.32	316.61	265.09	242.91
1981	Norma	329.51	245.22	186.30	160.92
1982	Paul	549.12	413.82	319.25	278.52
1983	Adolph	312.47	230.08	172.49	147.69
1984	Odile	250.56	192.01	151.08	133.45
1985	Waldo	247.24	188.94	148.18	130.63
1986	Paine	249.28	187.89	144.98	126.50
1987	Eugene	285.13	225.88	184.47	166.64
1988	Gilberto	374.79	310.69	265.88	246.58
1989	Cosme	262.99	200.49	156.81	138.00
1990	Diana	479.35	378.27	307.62	277.19
1991	DT 2	273.46	186.72	126.10	99.99
1992	Virgil	464.53	304.25	192.22	143.97
1993	Gert	392.04	328.70	284.42	265.35
1994	DT5	294.88	235.93	194.73	176.99
1995	Gabrielle	357.67	281.22	227.79	204.78
1996	Dolly	287.31	233.84	196.47	180.38
1997	Pauline	364.96	295.21	246.46	225.47
1998	Isis	511.05	392.93	310.37	274.81
1999	DT 11	566.43	472.53	406.90	378.63
2000	Keith	497.28	351.89	250.27	206.51

<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>100 km<sup>2</sup></b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>
2001	Juliette	643.85	488.74	380.33	333.64
2002	Isidoro	495.95	408.96	348.15	321.96
2003	Olaf	567.76	372.80	236.53	177.84
2004	DT16E	422.46	293.15	202.76	163.84
2005	Wilma	781.14	541.21	373.51	301.28
2006	Jhon	447.57	344.02	271.64	240.47
2007	Henriette	466.59	340.32	252.06	214.04
2008	DT 5E	287.27	199.73	138.54	112.18
2009	Jimena	461.52	380.47	323.81	299.42
2010	Alex	590.02	459.33	367.97	328.63
2011	Jova	398.55	313.63	254.28	228.71
2012	Carlotta	348.78	270.12	215.14	191.46
2013	Barry	527.47	402.21	314.65	276.95
2014	Trudy	595.23	408.01	277.15	220.79
2015	Patricia	366.09	288.37	234.05	210.66
2016	Newton	437.33	317.60	233.91	197.86

**Tabla 12.** Valores de Factor de Reducción de Área para áreas de 1000, 5000, 10000 y 20000 km<sup>2</sup> y lluvia de duración de 24 h obtenidos a partir de las ecuaciones logarítmicas del mismo nombre.

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
1959	Manzanillo	0.803	0.663	0.603	0.542
1960	Florence	0.682	0.525	0.457	0.389
1961	Tara	0.839	0.612	0.514	0.417
1962	Claudia	0.609	0.401	0.312	0.223
1963	Lilian	0.705	0.491	0.399	0.306
1964	Hilda	0.739	0.542	0.458	0.373
1965	Hezel	0.7372	0.5682	0.4954	0.4226
1966	Inez	0.794	0.643	0.578	0.512
1967	Beulah	0.746	0.616	0.560	0.504
1968	Naomi	0.800	0.697	0.653	0.608
1969	Jennifer	0.777	0.661	0.611	0.562
1970	Ella	0.789	0.628	0.558	0.489
1971	Lily	0.773	0.641	0.585	0.528
1972	Agnes	0.6226	0.4085	0.3163	0.2241
1973	Claudia	0.7208	0.5792	0.5182	0.4572
1974	Orlene	0.8456	0.6910	0.6245	0.5580
1975	Eleanor	0.6263	0.4058	0.3109	0.2159
1976	Liza	0.7706	0.6193	0.5541	0.4890
1977	Anita	0.7509	0.5723	0.4954	0.4184
1978	Olivia	0.6946	0.5514	0.4897	0.4280

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
1979	Ignacio	0.7175	0.5018	0.4089	0.3160
1980	Hermine	0.7163	0.5747	0.5137	0.4527
1981	Norma	0.7240	0.5389	0.4592	0.3795
1982	Paul	0.7286	0.5740	0.5075	0.4410
1983	Adolph	0.6578	0.4663	0.3838	0.3013
1984	Odile	0.4942	0.3381	0.2709	0.2037
1985	Waldo	0.7442	0.5865	0.5186	0.4507
1986	Paine	0.8057	0.5820	0.4857	0.3893
1987	Eugene	0.7776	0.6118	0.5404	0.4690
1988	Gilberto	0.7989	0.6798	0.6285	0.5772
1989	Cosme	0.8786	0.7064	0.6322	0.5580
1990	Diana	0.9581	0.7505	0.6611	0.5717
1991	DT 2	0.444	0.254	0.172	0.090
1992	Virgil	0.769	0.474	0.348	0.221
1993	Gert	0.7041	0.5142	0.4324	0.3506
1994	DT5	0.7992	0.6576	0.5966	0.5356
1995	Gabrielle	0.6595	0.5114	0.4476	0.3839
1996	Dolly	0.6573	0.5527	0.5076	0.4626
1997	Pauline	0.7578	0.6290	0.5736	0.5181
1998	Isis	0.7761	0.6136	0.5436	0.4735
1999	DT 11	0.6551	0.5344	0.4824	0.4304
2000	Keith	0.6243	0.4295	0.3456	0.2618

<b>Año</b>	<b>24 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
2001	Juliette	0.8134	0.6009	0.5094	0.4179
2002	Isidoro	0.8387	0.7083	0.6522	0.5960
2003	Olaf	0.5899	0.4048	0.3251	0.2454
2004	DT16E	0.7787	0.5437	0.4425	0.3413
2005	Wilma	0.7406	0.4992	0.3952	0.2913
2006	Jhon	0.7013	0.5018	0.4158	0.3299
2007	Henriette	0.5853	0.3793	0.2906	0.2019
2008	DT 5E	0.7282	0.4675	0.3552	0.2429
2009	Jimena	0.7638	0.5706	0.4875	0.4043
2010	Alex	0.9598	0.7666	0.6835	0.6003
2011	Jova	0.9086	0.7364	0.6622	0.5880
2012	Carlotta	0.6866	0.5530	0.4954	0.4379
2013	Barry	0.8815	0.6820	0.5960	0.5101
2014	Trudy	0.6020	0.4009	0.3142	0.2276
2015	Patricia	0.8773	0.7051	0.6309	0.5567

**Tabla 13.** Valores de Factor de Reducción de Área para áreas de 1000, 5000, 10000 y 20000 km<sup>2</sup> y lluvia de duración de 24 h obtenidos a partir de las ecuaciones logarítmicas del mismo nombre.

<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
1959	Manzanillo	0.763	0.596	0.524	0.452
1960	Florence	0.6780	0.5187	0.4501	0.3815
1961	Tara	0.8825	0.6604	0.5648	0.4691
1962	Claudia	0.6154	0.4175	0.3322	0.2470
1963	Lilian	0.7240	0.5035	0.4086	0.3136
1964	Hilda	0.7586	0.5703	0.4892	0.4081
1965	Hezel	0.7926	0.6333	0.5647	0.4961
1966	Inez	0.7824	0.6022	0.5245	0.4469
1967	Beulah	0.718	0.577	0.516	0.455
1968	Naomi	0.913	0.765	0.701	0.638
1969	Jennifer	0.779	0.663	0.613	0.564
1970	Ella	0.7923	0.6716	0.6196	0.5676
1971	Lily	0.7976	0.6367	0.5674	0.4981
1972	Agnes	0.6422	0.4330	0.3429	0.2527
1973	Claudia	0.7899	0.6064	0.5274	0.4484
1974	Orlene	0.7858	0.6152	0.5417	0.4682
1975	Eleanor	0.5956	0.3880	0.2986	0.2092
1976	Liza	0.7882	0.6224	0.5510	0.4796
1977	Anita	0.8437	0.7165	0.6618	0.6070
1978	Olivia	0.7148	0.5506	0.4799	0.4092

<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
1979	Ignacio	0.7143	0.4986	0.4057	0.3128
1980	Hermine	0.8483	0.6922	0.6250	0.5578
1981	Norma	0.7858	0.5959	0.5141	0.4323
1982	Paul	0.7343	0.5669	0.4948	0.4227
1983	Adolph	0.6943	0.5221	0.4479	0.3737
1984	Odile	0.5945	0.4690	0.4149	0.3608
1985	Waldo	0.822	0.632	0.550	0.468
1986	Paine	0.8422	0.6394	0.5521	0.4648
1987	Eugene	0.9141	0.7146	0.6286	0.5427
1988	Gilberto	0.8439	0.7393	0.6942	0.6492
1989	Cosme	0.7695	0.6102	0.5416	0.4730
1990	Diana	0.9029	0.7097	0.6266	0.5434
1991	DT 2	0.5054	0.3412	0.2705	0.1998
1992	Virgil	0.776	0.489	0.366	0.242
1993	Gert	0.9089	0.7013	0.6119	0.5225
1994	DT5	0.818	0.660	0.592	0.524
1995	Gabrielle	0.7263	0.5782	0.5144	0.4507
1996	Dolly	0.6602	0.5556	0.5105	0.4655
1997	Pauline	0.7549	0.6310	0.5776	0.5242
1998	Isis	0.7163	0.5666	0.5021	0.4377
1999	DT 11	0.7331	0.6317	0.5880	0.5444
2000	Keith	0.6379	0.4544	0.3754	0.2964

<b>Año</b>	<b>48 h</b>	<b>1000 km<sup>2</sup></b>	<b>5000 km<sup>2</sup></b>	<b>10000 km<sup>2</sup></b>	<b>20000 km<sup>2</sup></b>
2001	Juliette	0.7919	0.5908	0.5041	0.4175
2002	Isidoro	0.8398	0.7126	0.6579	0.6031
2003	Olaf	0.56741	0.36140	0.27268	0.18395
2004	DT16E	0.7994	0.5548	0.4494	0.3441
2005	Wilma	0.7423	0.5121	0.4130	0.3139
2006	Jhon	0.8142	0.6372	0.5610	0.4847
2007	Henriette	0.7149	0.5170	0.4317	0.3465
2008	DT 5E	0.7095	0.4761	0.3756	0.2751
2009	Jimena	0.8730	0.7184	0.6519	0.5854
2010	Alex	0.9533	0.7870	0.6969	0.6067
2011	Jova	0.8887	0.7132	0.6377	0.5621
2012	Carlotta	0.6847	0.5447	0.4844	0.4241
2013	Barry	0.8776	0.6765	0.5898	0.5032
2014	Trudy	0.6136	0.4172	0.3326	0.2481
2015	Patricia	0.8997	0.7162	0.6372	0.5582
2016	Newton	0.6865	0.5063	0.4286	0.3510



## ANEXO 2

El método para calcular la PMP basado en los hallazgos de este estudio se describe de la siguiente manera.

paso 1

- Calcular la envolvente de las curvas AAD en la zona de interés teniendo en cuenta la tasa anual de aumento encontrada en este trabajo.

paso 2

- Obtener el factor de trasposición de la tormenta.

$$K_t = W_T/W_O \quad (16)$$

donde

$K_t$  factor de ajuste para la trasposición de la tormenta.

$W_T$  agua precipitable sobre la cuenca.

$W_O$  agua precipitable de la tormenta.

paso 3

- Obtener el factor de maximización de la tormenta.

$$K_M = W_M/W_O \quad (17)$$

donde

$K_M$  factor de maximización.

$W_M$  Agua precipitable estimada a partir del valor máximo histórico del punto de rocío en la zona

$W_o$  Agua precipitable determinada a partir del valor observado del punto de rocío durante la tormenta

paso 4

- Obtener el factor correctivo.

$$K = K_t * K_M \quad (18)$$

donde

$K$  factor correctivo.

$K_t$  factor de trasposición de la tormenta.

$K_M$  factor de maximización de la tormenta.