

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**VARIABILIDAD ESTACIONAL EN EL RÉGIMEN DE
PRECIPITACIONES DEL ESTADO DE CHIHUAHUA,
MÉXICO.**

POR:

ALBA DURÁN COMPANIONI

**TESIS PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA SUPERFICIAL**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

AGOSTO DE 2024



Variabilidad estacional en el régimen de precipitaciones del estado de Chihuahua, México. Tesis presentada por Alba Durán Companioni como requisito parcial para obtener el grado de, Maestro en Ingeniería en Hidrología Superficial ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Fernando Martínez Reyes
Secretario de Investigación y Posgrado

M. I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Director(a) de Tesis

Agosto de 2024

Fecha

COMITÉ

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Dr. Jorge Lucero Álvarez
M.I. Miguel Ángel Méndez Alvarado
M.S.I. Raúl Arturo Acosta Chávez



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

07 de agosto de 2024.

ING. ALBA DURÁN COMPANIONI
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **“Variabilidad estacional en el régimen de precipitaciones del estado de Chihuahua, México”**.

Índice de Contenido

1 Introducción

- 1.1 Justificación
- 1.2 Alcances y objetivos
- 1.3 Hipótesis
- 1.4 Metodología

2 Marco teórico

- 2.1 Base de datos de serie de precipitación de las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua.
- 2.2 Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)
- 2.3 Completamiento de registros faltantes de precipitación diaria y mensual.
- 2.4 Pruebas de normalidad
- 2.5 Pruebas de homogeneidad o consistencia
- 2.6 Pruebas de tendencia y persistencia
- 2.7 Pruebas de estacionalidad

**FACULTAD DE
INGENIERÍA**
Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 443-9500
Chihuahua, Chih., México
www.uach.mx/fing



- 3 Resultado del análisis estadístico a las series de tiempo de precipitación.
 - 3.1 Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)
 - 3.2 Completamiento de registros faltantes de precipitación mensual.
 - 3.3 Pruebas de normalidad
 - 3.4 Pruebas de homogeneidad
 - 3.5 Pruebas de tendencia y persistencia
 - 3.6 Pruebas de estacionalidad
- 4 Discusión de los resultados
 - 4.1 Resumen y análisis de las pruebas estadísticas efectuadas para cada serie
 - 4.2 Impacto de los resultados
- 5 Conclusiones y recomendaciones
 - 5.1 Conclusiones
 - 5.2 Recomendaciones
- 6 Referencias
- 7 Curriculum Vitae

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR



M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO



DR. FERNANDO MARTÍNEZ REYES
MARTÍNEZ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
Circuito No. 1, Campus Universitario II
Tel. (614) 442-9500
Chihuahua, Chih., México
www.uach.mx/finig



Dedicatoria

¡A mí!, a mis padres Mileni y Papito.... por cada sacrificio silencioso, por cada palabra de aliento, y por el inmenso amor que siempre me han brindado, esta obra es para ustedes. Gracias por enseñarme a soñar en grande y por estar a mi lado en cada paso del camino.

Este logro es tan suyo como mío, y no podría haberlo alcanzado sin su apoyo incondicional.

*A mi compañero de vida, Genrry, que siempre está presente
A todas las personas que de una forma u otra me ayudaron a cumplir este sueño, que sin dudas hasta ahora ha sido lo mejor que me ha pasado. ¡A todos gracias!*

Agradecimientos

A todo el familión, por todo el amor, educación, por su preocupación sin precedentes, por confiar en mí, y por todo su esfuerzo y apoyo.

Con profundo respeto, le agradezco a todos mis profesores. Su pasión por enseñar y su compromiso con el conocimiento han sido una fuente constante de inspiración. Gracias por guiarme, desafiarme y acompañarme en este viaje. Cada lección impartida, cada consejo dado, ha dejado una huella indeleble en mi camino. Este logro es también el reflejo de su ardua labor y dedicación. Especialmente le agradezco al profesor y director de mi tesis, Dr. Humberto Silva Hidalgo y a mi asesor académico, el Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua, por aceptarme para estudiar un excelente posgrado, específicamente al coordinador académico Miguel Ángel González Núñez.

Mi gratitud al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONACHYT) por hacer posible que, durante dos años, contara con la beca de manutención que me permitió cursar mi maestría a tiempo completo. Su respaldo ha sido clave para convertir en realidad el sueño de alcanzar una educación de posgrado de alta calidad.

Resumen

El cambio climático es una realidad que transforma constantemente los patrones climáticos conocidos, impactando todos los aspectos de nuestra vida. Este fenómeno provoca un aumento de las temperaturas, la evaporación y las precipitaciones, afectando sectores como la agricultura y la gestión del agua.

En México, la distribución de precipitación varía significativamente en espacio y tiempo debido a diversos factores, como la geografía y la circulación atmosférica. A pesar de que el 70% de la precipitación se registra de mayo a octubre, en el norte del país se han observado cambios en la magnitud y frecuencia de fenómenos extremos como inundaciones y sequías. Este proyecto se enfoca en investigar el cambio en la estacionalidad de la precipitación en la región norte de México, específicamente en el estado de Chihuahua con la sospecha de que el periodo de lluvias se está desplazando hacia los meses más fríos. Para ello se utilizó el método de estadística circular propuesta por Fisher (1993) y Dingman (2015).

La escasez de agua tiene un fuerte impacto social y económico, ya que la agricultura y la ganadería, actividades fundamentales para el desarrollo de una región, dependen de este recurso. Este escenario resalta la necesidad de estudiar los cambios en los patrones de lluvia en el norte de México, que es donde se presentan los climas secos y semisecos y las más altas temperaturas. Por tanto, desde una perspectiva científica, comprender cuantitativamente la variabilidad y la tendencia predominante, puede permitir a las autoridades diseñar políticas y estrategias de adaptación encaminadas a planear el uso de los recursos hídricos de manera sustentable, enfocándose principalmente en el fortalecimiento y resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos climáticos en evolución.



Índice

Dedicatoria.....	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Índice.....	VII
Índice de Tablas	X
Índice de Figuras.....	XII
1 Introducción	14
1.1 Justificación	16
1.2 Alcances y objetivos	18
1.2.1 Objetivo general	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Hipótesis.....	19
1.4 Metodología.....	19
1.4.1 Diagrama de flujo	21
1.4.2 Ubicación de la zona de estudio.....	22
2 Marco teórico.....	24
2.1 Base de datos de serie de precipitación de las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua.	24
2.2 Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)	28
2.2.1 Datos atípicos (outliers) y análisis gráfico	29
2.2.1.1 Histogramas	29
2.2.1.2 Cajas y bigotes o box plots.....	30
2.3 Completamiento de registros faltantes de precipitación diaria y mensual. .	32
2.3.1 Método de regresión lineal simple.....	32
2.3.2 Método del U.S. National Weather Service.	35
2.4 Pruebas de normalidad.....	36



2.4.1	Kolmogorov-Smirnov	37
2.4.2	Ryan-Joiner	38
2.4.3	D' Agostino Pearson.....	38
2.4.4	Coeficiente de correlación de Pearson.....	40
2.5	Pruebas de homogeneidad o consistencia	42
2.5.1	Pruebas paramétricas	43
2.5.1.1	t de Student.....	43
2.5.1.2	Cramer	44
2.5.2	Pruebas no paramétricas	45
2.5.2.1	Secuencias.....	45
2.5.2.2	Helmert.....	46
2.6	Pruebas de tendencia y persistencia	47
2.6.1	Prueba paramétrica de Anderson.....	48
2.6.2	Prueba no paramétrica punto de quiebre	49
2.7	Pruebas de estacionalidad	50
3	Resultado del análisis estadístico a las series de tiempo de precipitación.....	54
3.1	Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)	54
3.2	Completamiento de registros faltantes de precipitación mensual.....	57
3.3	Pruebas de normalidad.....	60
3.4	Pruebas de homogeneidad.....	61
3.5	Pruebas de tendencia y persistencia	67
3.6	Pruebas de estacionalidad	71
4	Discusión de los resultados.....	86
4.1	Resumen y análisis de las pruebas estadísticas efectuadas para cada serie	86
4.2	Impacto de los resultados.....	88
5	Conclusiones y recomendaciones	95
5.1	Conclusiones	95



5.2	Recomendaciones.....	95
6	Referencias.....	97
7	Curriculum Vitae	103



Índice de Tablas

Tabla 2.1 Resumen de estaciones del estado con su respectivo periodo de tiempo y tipo de registro (diario-mensual). Elaboración propia a partir de la información obtenida de CONAGUA.....	25
Tabla 2.2 Valores de Dcr para distintos niveles de significancia. Tomado de O'Connor & Kleyner, (2011)	37
Tabla 2.3 Coeficiente de correlación para prueba de normalidad tomado de Statistical Methods pág. 459 (Helsel & Hirsch, 2002).....	40
Tabla 2.4 Valores de t para la distribución de t de Student	44
Tabla 2.5 Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo	46
Tabla 2.6 Ángulos y funciones de ángulo para calcular el índice de estacionalidad y el tiempo promedio de ocurrencia de datos mensuales. Tomado de Dingman (2015).....	52
Tabla 3.1 Comparación entre los valores acumulados anuales procedentes de ambas bases de datos (diario y mensual).....	55
Tabla 3.2 Resumen de estaciones y método de completamiento de datos a emplear según la naturaleza de estos. Elaboración propia.....	58
Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de normalidad aplicada a las series de precipitación anual en el periodo de 1960-2022.....	60
Tabla 3.4 Resultado de las pruebas de Homogeneidad paramétricas (t de Student y Cramer) de la estación Francisco Madero.....	63
Tabla 3.5 Resultado de las pruebas de Homogeneidad paramétricas (t de Student y Cramer) de la estación Chínipas	64
Tabla 3.6 Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a los valores de precipitación anual de las estaciones climatológicas.	65
Tabla 3.7 Comportamiento y clasificación de la tendencia para las series temporales de precipitación.....	67
Tabla 3.8 Resultados de las pruebas de tendencia y persistencia aplicadas a los valores de precipitación anual de las estaciones climatológicas	69
Tabla 3.9 Relación entre el Índice de estacionalidad I_s con los meses del año. ...	71



Tabla 3.10 Resultados de pruebas de estacionalidad a la estación Francisco I. Madero	72
Tabla 3.11 Resultado de las pruebas de estacionalidad para las 30 estaciones. .	74
Tabla 3.12 Resumen de las estaciones que presentan indicios de un desplazamiento del periodo de lluvias hacia los meses más fríos (octubre-noviembre)	84
Tabla 4.1 Interpretación de las pruebas de tendencia efectuada a cada serie.	88
Tabla 4.2 Resumen de ecorregiones del estado de Chihuahua y el tipo de agricultura que fomentan. Elaboración propia a partir de la información encontrada en Análisis de los diferentes tipos de agricultura para la conceptualización de una nueva ruralidad en el norte de México: el caso de Chihuahua.	90



Índice de Figuras

Figura 1.1 Metodología que se plantea para determinar la variabilidad estacional en el régimen de precipitaciones del estado de Chihuahua.	21
Figura 1.2 Plano de localización del área de estudio (Estado de Chihuahua). Elaboración propia utilizando SIG y la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024).	23
Figura 2.1 Ubicación de las estaciones climatológicas con registros de precipitación diarios y mensuales del estado de Chihuahua. Elaboración propia a partir de la información obtenida en CONAGUA.	27
Figura 2.2 Representación visual que describe la dispersión y simetría que presentan los datos observando los cuartiles. Tomado de (Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital & Entidad Pública Empresarial Red.es, 2021)	31
Figura 2.3 Diagrama de coeficiente de correlación entre dos variables. Tomado de (Cuellar et al., 2018)	33
Figura 2.4 Prueba del coeficiente de correlación serial según Anderson para persistencia. Tomado de (Campos Aranda, 1984)	49
Figura 3.1 Estaciones climatológicas que pasan a la etapa de completamiento de datos.	56
Figura 3.2 Representación gráfica de la serie de precipitación anual, periodo 1960-2022 de la estación Francisco Madero.	63
Figura 3.3 Representación gráfica de la serie de precipitación anual, periodo 1960-2022 de la estación Chínipas.	64
Figura 3.4 Distribución espacial de los resultados de las pruebas de Homogeneidad a las 30 estaciones, se resalta en círculos rojos las 9 estaciones no Homogéneas.	66
Figura 3.5 Tendencia de las precipitaciones, según su comportamiento: 1, casi imperceptible con mínima inclinación al alza; 2, leve a la baja; 3, a la baja o tendencia no significativamente decreciente y 4, muy baja o significativamente decreciente.	68



Figura 3.6 Distribución geográfica de la tendencia de las series para todo el periodo de estudio comprendido desde 1960-2022.	70
Figura 3.7 Distribución mensual de la precipitación promedio en la estación Francisco I. Madero para cada periodo de estudio	73
Figura 3.8 Representación geográfica de los resultados de las pruebas de estacionalidad, se muestran en círculos rojos las 11 estaciones con indicios de desplazamiento estacional.	85
Figura 4.1 Agrupación de los años en los que se detectaron cambios en el comportamiento de la media, la evolución y el promedio móvil de las series.....	87
Figura 4.2 Ecorregiones en el estado de Chihuahua según (Quintana & Solís, 2023). En rojo se muestran las estaciones que presentan indicios de desplazamiento en el periodo de lluvias.....	92



1 INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno global que altera el equilibrio y la distribución del agua en nuestro planeta, lo cual implica una amenaza a nuestras fuentes de agua dulce y, por tanto, a nuestra supervivencia. Este fenómeno reconfigura la forma en que experimentamos las estaciones del año, el régimen anual de precipitaciones, el periodo de estiaje, la intensidad máxima de las tormentas y las sequías, y que tiene consecuencias que abarcan desde sectores como la agricultura hasta la gestión del agua y la vida diaria de las personas. A medida que la Tierra experimenta alteraciones en su sistema climático, es esencial comprender en profundidad lo que significa y cómo afecta a uno de los elementos más críticos del ciclo hidrológico y de nuestro clima: las precipitaciones.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), 1992, en su artículo 1, lo define como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (Lovino et al., 2020).

La evidencia de la variación climática es cada vez más clara. Los indicios apuntan a que las actividades humanas han incrementado la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que ha llevado a un aumento en las temperaturas del aire y del océano (Méndez González et al., 2007), provocando a su vez un aumento de la evaporación y evapotranspiración (Moreno Reséndez et al., 2011). Como consecuencia las precipitaciones y la escorrentía son cada vez más fuertes y abundantes. Sin embargo, no todas las áreas estarán afectadas con estas tendencias; en las latitudes medias y subtropicales se producirán cambios en sentido contrario con tendencia a una disminución de los recursos hídricos, y al aumento de las sequías y crecidas (Duarte & Alonso, 2006), lo que incidirá, a mediano plazo, en el incremento de la desertificación.



El ciclo hidrológico es un proceso fundamental en el funcionamiento del planeta, y las precipitaciones son uno de sus componentes clave. Sin embargo, estas precipitaciones presentan gran variabilidad espacial y temporal, lo que representa grandes desafíos para su estudio y evaluación (Sharma et al., 2018). A pesar de estas dificultades, es esencial entender el clima regional, ya que esto permite planificar el manejo de los recursos naturales de un país y adaptarse a los cambios climáticos.

La presencia de lluvia durante el año es muy importante ya que influye en gran medida en el sector agrícola, en especial la agricultura de temporal, que es completamente dependiente de esta y por tanto altamente vulnerable a su variabilidad interanual e interestacional (Méndez González et al., 2007; Maces & Viera, 2018).

En México, los patrones de precipitación están detalladamente documentados y presentan una gran variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio. A nivel geográfico, la cantidad de lluvia aumenta de norte a sur, influenciada por la latitud. Estos patrones también están determinados en gran medida por la cercanía al océano Pacífico y al Golfo de México, así como por la topografía del país y los elementos de la circulación atmosférica (García Páez & Cruz Medina, 2009; Maces & Viera, 2018), así como por la teleconectividad del fenómeno del Niño (Cavazos & Hastenrath, 1990). Los estudios históricos indican que el 70% de la precipitación en México se registra de mayo a octubre (Méndez González et al., 2007). No obstante, específicamente en el norte de México, donde se encuentran las zonas más áridas del país, se han apreciado variaciones en las tendencias y cambios graduales en la magnitud, frecuencia, duración, volumen o extensión de fenómenos extremos hidroclimáticos, como las lluvias intensas, inundaciones, sequías, y olas de calor o estrés térmico, las cuales han sido ampliamente detectadas dando lugar a proclamas sobre la “muerte” de la estacionalidad en la gestión del agua (Milly et al., 2008).

En el nivel más simple, un proceso estacionario es aquel en el que las propiedades estadísticas de la distribución y la correlación no se ven afectadas y no cambian con el tiempo. Así, una serie temporal estacionaria no mostraría



ningún cambio en la media, la varianza o la forma. Para los extremos hidroclimáticos, esto implica que la distribución de precipitaciones, temperaturas, caudales o vientos extremos debería fluctuar simplemente dentro de una envolvente estacionaria de variabilidad (Slater et al., 2021).

Específicamente en la región norte de México, se ha observado un cambio en la estacionalidad de la precipitación (Mendoza-Urbe, 2022), por lo que se parte de la sospecha que dicho periodo se está desplazando hacia los meses más fríos. Estos cambios de estacionalidad se desean verificar en el presente proyecto, específicamente en el estado de Chihuahua, México.

1.1 Justificación

El conocimiento del régimen de precipitación es relevante para orientar las políticas de ordenamiento del territorio, especialmente en lo que respecta a obras de infraestructura y a diversas actividades económicas que deben ajustarse a las condiciones pluviométricas, como lo son la agricultura, ganadería y turismo. La variabilidad de las precipitaciones afecta directamente a la capacidad de infiltración, la disponibilidad de nutrientes y carbono, suministro de servicios ecosistémicos, biomasa, productividad primaria, entre otros (Aliaga et al., 2016).

Se espera que el sector más afectado económicamente por el cambio climático sea la agricultura (Lucero López et al., 2022), lo cual es preocupante, ya que el sector a su vez es determinante para la seguridad alimentaria (Feldman & Cortés, 2016). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO, (2013) la seguridad alimentaria se refiere a cuando todos tienen el acceso permanente a alimentos seguros, nutritivos y en cantidad suficiente para satisfacer sus requerimientos nutricionales y preferencias alimentarias, pudiendo llevar de esta forma una vida activa y saludable. "En 2022, el número de personas en situación de inseguridad alimentaria aguda aumentó hasta los 258 millones en 58 países." El cambio climático es visto por ello como un importante "multiplicador del riesgo de hambre". De hecho, algunas previsiones estiman que provocará 24 millones más de niños malnutridos en 2050, casi la mitad de ellos en África subsahariana (FAO, 2015).



En muchas regiones del mundo, se ha observado un cambio en el régimen de precipitaciones, lo cual implica que la cantidad de lluvia que cae durante los meses más cálidos se está reduciendo, mientras que aumenta durante los meses más fríos, específicamente en el norte de Europa y en el noreste de América (Slater et al., 2021). Los modelos climáticos sugieren que esta tendencia probablemente continuará en el futuro (Kirchmeier-Young & Zhang, 2020), lo que destaca la importancia de entender y adaptarse a estos cambios.

Por otra parte, el cambio climático afecta en los grados-días de desarrollo, índices utilizados para la estimación del desarrollo de las plantas. Estos grados-día son cruciales en numerosos sistemas de producción de hortalizas para predecir la madurez fisiológica, la fecha de cosecha y el momento de siembras sucesivas (Hoyos García et al., 2012).

En el caso específico del estado de Chihuahua, de acuerdo con (Mendoza-Uribe, 2022) predominan los climas árido, semiárido y templado subhúmedo representando el 40%, 33% y 24% respectivamente. Las precipitaciones son escasas, con un valor inferior a los 400 mm anuales (INEGI, 2017); sin embargo, aunque la escasez de agua es una limitante para la actividad agrícola, ésta se practica tanto de temporal, como de riego. Los siete cultivos más importantes son, en régimen de riego, algodón, alfalfa, maíz, nuez pecanera, manzana y durazno, de estos tres últimos, vale destacar que Chihuahua ocupa el primer lugar a nivel nacional (Quintana & Solís, 2023). En régimen de temporal, avena forrajera, maíz, sorgo forrajero y frijol (Portal Gubernamental del Estado de Chihuahua, 2020).

Cada año la agricultura de riego se desarrolla debido a varias razones, una de ellas es que: los productores evitan más el riesgo, realmente en Chihuahua depender de la generosidad o mezquindad del clima para el suministro de agua para regar los campos de cultivo y de temperaturas benignas para el desarrollo de las plantaciones es prácticamente impensable. Aun así, la agricultura de temporal sigue siendo en algunas regiones como la Sierra Tarahumara, la principal actividad agrícola. Otra razón recae, en el valor de la producción; la agricultura de temporal aportó solo el 6%, contra casi un 94% de la agricultura de riego, más de 15 veces (Quintana & Solís, 2023) para el año 2019. En la primera se pone de



manifiesto el factor clima y medioambiental, en la segunda el factor económico y por último el factor social. En el estado de Chihuahua, los municipios con los niveles más elevados de pobreza y pobreza extrema se concentran en la región suroeste, particularmente en la Sierra Tarahumara.

Uno de los cultivos más afectados por los cambios en los patrones de lluvia es el frijol, que se siembra a partir de las lluvias tempranas del verano. Se estima que un 80% de la superficie sembrada ha sido afectada, y que la falta de disponibilidad traerá por consecuencia un alza en el precio (Gobierno de Chihuahua, 2020).

La escasa disponibilidad del recurso hídrico en Chihuahua genera presión social e impacto económico considerable, ya que de este recurso dependen la agricultura y la ganadería, actividades primarias de gran importancia en la entidad (Gobierno del Estado de Chihuahua., 2005). Este hecho, desde el punto de vista científico, denota la importancia de estudiar los cambios en los patrones de precipitación en el estado, que demuestren cuantitativamente la variabilidad existente y la tendencia prevaleciente. Esta información permitirá a las autoridades diseñar políticas y estrategias de adaptación encaminadas a planear el uso de los recursos hídricos de manera sustentable. Dichas acciones se enfocarían fundamentalmente en el fortalecimiento y resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos climáticos en evolución, lo cual es más importante en regiones donde este recurso vital es escaso, como lo es el estado de Chihuahua (Mendoza-Uribe, 2022). Ante este escenario, la investigación en torno a la influencia del cambio climático en las precipitaciones y su impacto en la agricultura de temporal se vuelve imperativa.

Todo lo anterior, expone la relevancia e importancia de efectuar el estudio que se plantea en esta investigación.

1.2 Alcances y objetivos

En este apartado se presenta el objetivo general de la tesis, así como los objetivos específicos que permitieron alcanzarlo.



1.2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento del periodo de lluvias en el estado de Chihuahua con la finalidad de confirmar estacionalidad, o en su defecto identificar si se está presentando un desplazamiento del periodo hacia los meses del otoño.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Recopilar datos climatológicos diarios y mensuales confiables de la serie temporal de precipitación del estado de Chihuahua, obtenidos de las estaciones climatológicas en la región.
- 2) Realizar un análisis estadístico de la serie temporal que incluye la detección de valores atípicos, el completamiento de datos faltantes, pruebas de normalidad y homogeneidad.
- 3) Análisis de la tendencia y persistencia de la precipitación diaria mensual, evaluando la variación en la cantidad de lluvia a lo largo del año.
- 4) Aplicar pruebas de estacionalidad para determinar si existen patrones cíclicos en la distribución de la precipitación.
- 5) Análisis e interpretación de resultados obtenidos.
- 6) Discusión del impacto y relevancia en relación con la biodiversidad, la agricultura y los eventos climatológicos extremos en la región.

1.3 Hipótesis

El periodo de lluvias en el estado de Chihuahua se está desplazando hacia los meses del otoño (septiembre-noviembre).

1.4 Metodología

Se recopilaron los registros diarios y mensuales de precipitación de las estaciones climatológicas del estado de Chihuahua, utilizando como fuente la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Una vez obtenida la información, se realizó un preprocesamiento de datos para completar registros faltantes, detectar valores atípicos (outliers), y seleccionar las estaciones que cumplieran con un mínimo de 20 años de registros. Este se hizo con el objetivo de trabajar con datos fidedignos y prevenir la distorsión de los resultados. Este proceso se llevó a cabo



mediante hojas de cálculo electrónicas en el Excel. Adicionalmente, para poder tener una mejor visualización de la información, se elaboraron mapas en Sistemas de Información Geográfica (GIS) a partir de la información de las estaciones, tales como coordenadas, nombre, altura sobre el nivel medio del mar e intervalo de tiempo. Estos mapas facilitaron la imputación de datos faltantes mediante los métodos de regresión lineal y empleando datos estaciones cercanas del U.S. National Weather Service (US NWS) con condiciones similares a las estaciones con registros incompletos.

Posteriormente, se efectuó el análisis gráfico considerando el periodo móvil, la precipitación media anual y la presencia de anomalías. Los datos completados de precipitación fueron sometidos a cuatro pruebas de normalidad: La prueba Kolmogorov-Smirnov, la prueba de D'Agostino, Anderson-Darling, y la prueba de Ryan-Joiner. Los resultados de estas pruebas determinaron el siguiente paso, que consistió en evaluar la homogeneidad de la serie aplicando pruebas paramétricas o no paramétricas según el caso y terminar con pruebas de tendencia y persistencia.

Para conocer la variabilidad intraanual y el comportamiento estacional de la serie de tiempo de precipitación del estado se utilizó la teoría de estadística circular propuesta por Fisher (1993) y Dingman (2015). En caso de ausencia de estacionalidad, se identificaría hacia qué meses se desplaza el periodo de lluvias y se evaluarían los posibles impactos. Dicha metodología se representa gráficamente en la Figura 1.1.



1.4.1 Diagrama de flujo

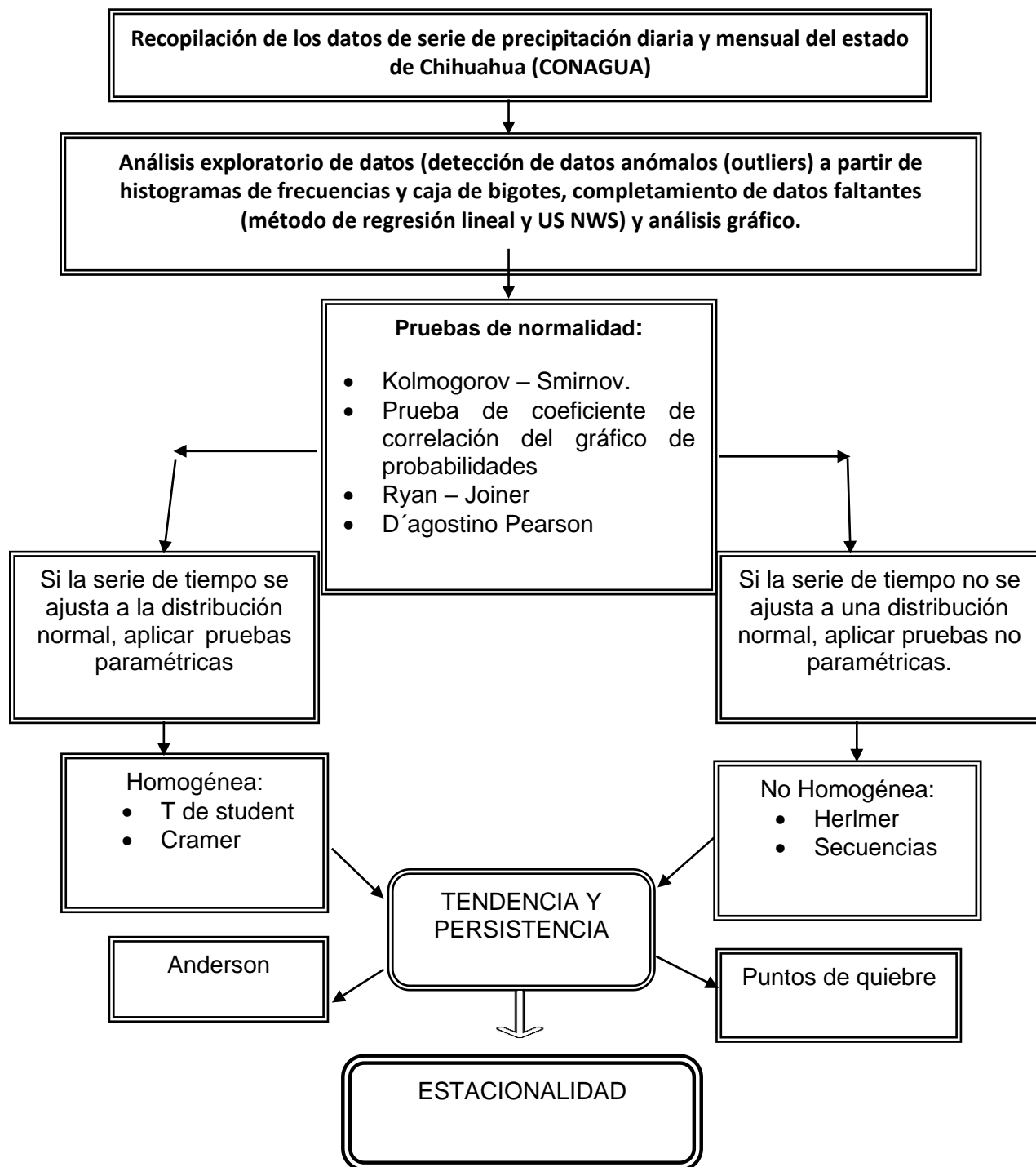


Figura 1.1 Metodología que se plantea para determinar la variabilidad estacional en el régimen de precipitaciones del estado de Chihuahua.



1.4.2 Ubicación de la zona de estudio

El estado de Chihuahua se ubica al norte de la República Mexicana, es el más grande y no cuenta con salida al mar. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte $31^{\circ} 47'$, al sur $25^{\circ} 38'$ de latitud norte; al este $103^{\circ} 18'$ y al oeste $109^{\circ} 07'$ de longitud oeste. Colinda al norte con los Estados Unidos de América; al este con los Estados Unidos de América, Coahuila de Zaragoza y Durango; al sur con Durango y Sinaloa; al oeste con Sinaloa, Sonora y los Estados Unidos de América. Comprende una superficie de $247\,487\text{ km}^2$, que lo sitúa en primer lugar en cuanto a extensión, representa 12.6% de la superficie total nacional y está integrado por 67 municipios (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003). En su territorio se pueden encontrar altitudes desde las 1000 m hasta los 3300m de elevación. La Figura 1.2 representa el plano de localización con los anteriores datos para una mejor observación espacial del área de estudio.

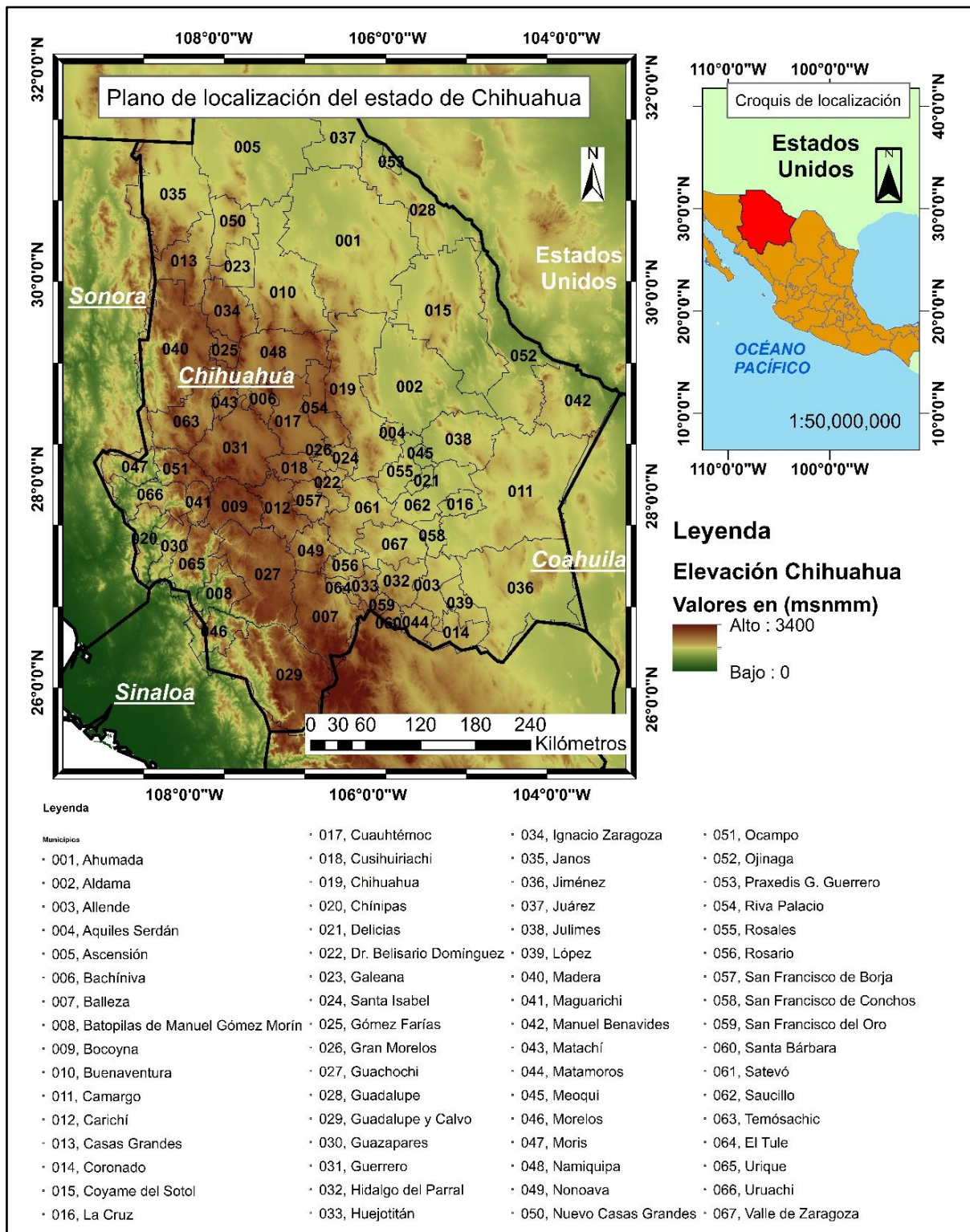


Figura 1.2 Plano de localización del área de estudio (Estado de Chihuahua). Elaboración propia utilizando SIG y la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024).



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Base de datos de serie de precipitación de las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua.

La información sobre los registros de precipitación diaria y mensual de las estaciones meteorológicas del estado fue obtenida directamente en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), utilizando como complemento los sitios en internet como: NOAA (2023); SMN (2023). Primeramente, en CONAGUA la información que se recibió se dividió en dos partes, ambas en formato de Excel, la primera contenía los acumulados mensuales y anuales de 39 estaciones con diferente longitud de registro temporal. La otra base de datos contenía registros diarios de 25 estaciones, algunas de estas estaciones coincidían en ambas bases de datos. La Tabla 2.1 muestra un resumen de dicha información.

Debido a que la base de datos de los registros mensuales contiene más información, se determinó utilizar los registros diarios para ampliar en los casos que se pueda la información de la primera, con el objetivo de tener un mismo periodo de tiempo en todas las estaciones, en este caso, desde el 1960-2022 para un total de 63 años. También se compararon los valores acumulados anuales de cada estación común para ambas bases de datos; en la mayor parte de los casos no coincidían estos acumulados, por lo tanto, como se verá en el capítulo de “Resultado del análisis estadístico a las series de tiempo de precipitación.” se determinó cuál era el valor correcto y por qué. Para una mejor comprensión, la Figura 2.1 muestra la ubicación geográfica de cada estación.



Tabla 2.1 Resumen de estaciones del estado con su respectivo periodo de tiempo y tipo de registro (diario-mensual). Elaboración propia a partir de la información obtenida de CONAGUA.

No	Estaciones	Base de datos			
		Registros diarios		Registros mensuales	
		Años	No. de datos	Años	No. de datos
1	Abraham González	1989-2022	34	1970-2022	53
2	Bachiniva	1987-2022	36	1957-2022	66
3	Basaseachi	-	-	2000-2021	22
4	Batopilas (SMN)	1994-2022	29	1957-2022	66
5	Batovira	1994-2022	29	1975-2022	48
6	Boca Del Río	-	-	2007-2022	16
7	Camargo (DGE)	1960-2019	60	-	-
8	Cd. Juárez	1996-2022	27	1957-2022	66
9	Chihuahua (OBS)	1982-2022	41	1960-2022	63
10	Chínipas (DGE)	1994-2022	29	1957-2022	66
11	Cila Norte	-	-	2007-2019	13
12	Colina	1980-2018	39	1980-2018	39
13	Cuauhtemoc	-	-	1957-2022	66
14	Delicias (DGE)	1980-2022	43	1957-2022	66
15	Delicias (SMN)	-	-	2006-2022	17
16	El Tintero	1983-2022	40	1973-2022	50
17	Francisco I. Madero	1985-2022	38	1945-2022	78
18	Guachochi (CFE)	-	-	2000-2022	23
19	Guadalupe y Calvo (DGE)	1994-2022	29	1959-2022	64
20	Jiménez (SMN)	-	-	1957-2022	66
21	La Boquilla	1992-2022	31	1957-2022	66
22	La Mesa	1976-2022	47	1984-2022	39
23	Las Chepas	2000-2022	23	-	-
24	Las Lajas	-	-	1971-2022	52
25	Luis L. León	1990-2022	33	1990-2022	33
26	Maguarichi	-	-	2006-2022	17
27	Majalca	2002-2022	21	-	-
28	Moris	1996-2022	27	1972-2022	51
29	Nuevo Casas Grandes (OBS)	1982-2022	41	1957-2022	66
30	Ojinaga (DGE)	1991-2022	32	1957-2022	66
31	Ojinaga (SMN)	-	-	2009-2022	14
32	Parral (OBS)	1990-2022	33	1957-2022	66
33	Peñitas	-	-	1980-2022	43
34	San Gabriel	-	-	1980-2022	43
35	Tejolocachi (DGE)	1980-2022	43	1957-2022	66
36	Temosachic	-	-	1960-2022	63



No	Estaciones	Base de datos			
		Registros diarios		Registros mensuales	
		Años	No. de datos	Años	No. de datos
37	Tubares	-	-	1975-2022	48
38	Urique (SMN)	1994-2022	29	1968-2022	55
39	Valle De Zaragoza (DGE)	-	-	1969-2022	54
40	Vergel (DGE)	-	-	2009-2022	14
41	Villa Ahumada	-	-	2002-2019	18
42	Villa Coronado	2004-2022	19	2003-2022	20
Total			25		39

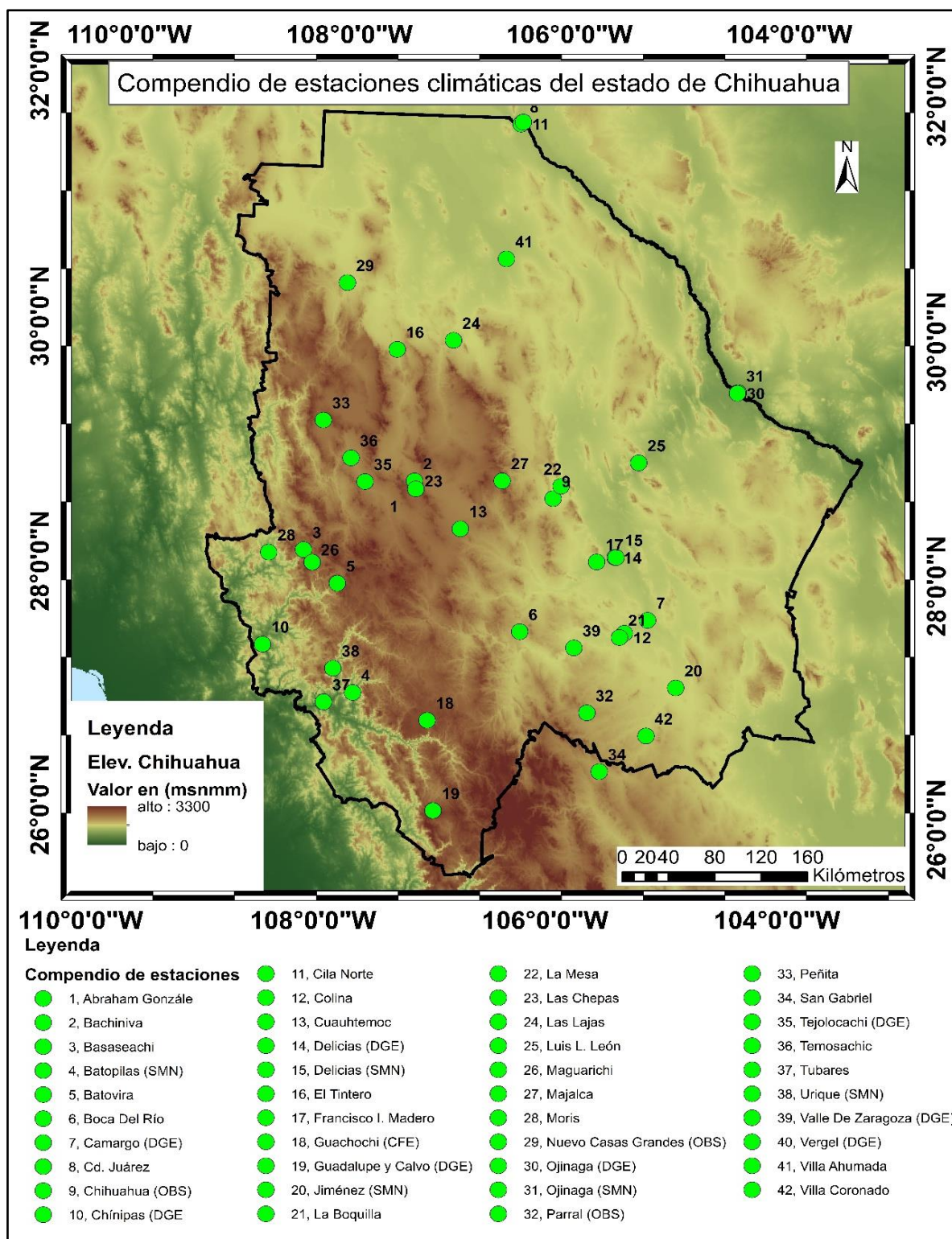


Figura 2.1 Ubicación de las estaciones climatológicas con registros de precipitación diarios y mensuales del estado de Chihuahua. Elaboración propia a partir de la información obtenida en CONAGUA.



2.2 Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)

En climatología, surge un desafío al procesar bases de datos para análisis estadísticos debido a la falta de registros diarios o mensuales en estaciones en funcionamiento regular. Esto crea lagunas en la información debido a errores humanos o informáticos, por ello, se han creado una serie de técnicas, métodos, metodologías, procedimientos, modelos estadísticos y matemáticos que permiten dar solución a esta problemática (Urrutia-Mosquera, 2010). El AED es una técnica que consiste en el análisis de los datos empleando en su mayoría gráficas para incrementar el entendimiento sobre ellos y visualizar las relaciones existentes entre las variables analizadas, es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística (UNESCO, 2006).

Realizar un análisis exploratorio de datos brinda ventajas significativas, sin importar el tipo de datos o los análisis estadísticos que se apliquen más adelante. Un examen detallado de la base de datos permite detectar errores potenciales, como datos mal ingresados, la ausencia de valores o una codificación incorrecta de las variables. Además, ayuda a identificar valores atípicos (outliers), evaluar las relaciones entre variables (correlaciones) y su posible redundancia, y llevar a cabo un análisis descriptivo mediante gráficos y resúmenes de los aspectos más relevantes (Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital & Entidad Pública Empresarial Red.es, 2021).

Los gráficos más utilizados por esta técnica son: de dispersión (scatter plots), los de caracteres (character plots), de caja (boxplot), histogramas de probabilidad (probability plots), de residuales y de medias, entre otros.

Por ejemplo, en el caso del análisis gráfico de la serie de acumulado anual de la precipitación, resulta idóneo el gráfico de dispersión con líneas suavizadas y marcadores, al cual se le puede agregar la evolución promedio, la tendencia de la serie, su media y su periodo móvil. A simple vista se pueden observar los patrones, cambios, saltos y sobre todo los valores que destaquen (máximos o mínimos) pudiendo ser casos anómalos.



Los promedios móviles son promedios calculados a partir de subgrupos de observaciones consecutivas. Se puede crear una gráfica de promedio móvil para los datos de tiempo ponderados. Se utiliza el promedio móvil para suavizar los datos y reducir las fluctuaciones aleatorias en una serie de tiempo (Soporte de Minitab, 2023). En hidrología, por lo regular se eligen periodos de 5 años. Nos muestra ciclos, años húmedos, años secos. Esto significa que se promedian cinco datos, y ese mismo número de datos se irán promediando a lo largo de la serie. Cuando se emplea este método se supone que todas las observaciones de las series de tiempo son igual de importantes para el cálculo de pronósticos. De forma sintetizada se muestra como una línea que describe la estacionalidad, a través de ella se conocen las variaciones o ciclos en la serie de tiempo. La evolución promedio de igual forma es una línea que describe el comportamiento del promedio de la serie a través de los años, tiene menos variación que la del promedio porque va tomando el valor promedio desde el primer dato de la serie hasta el año que se analice. La tendencia describe el patrón de los datos de la serie, ya sea al alza o a la baja, y la media es el promedio de la serie de tiempo. Este análisis será muy útil en la determinación de la homogeneidad de la serie, pues, puede encontrarse un punto de inflexión en el que el comportamiento de la precipitación cambie y marque un salto en la media de la serie, dividiéndola en dos partes con un comportamiento diferente.

Es verdaderamente necesario dedicar tiempo a aplicar este método para que los resultados obtenidos a partir de los análisis estadísticos aplicados sean altamente fiables y muestren la realidad de estos. De este paso depende la calidad de la investigación.

2.2.1 Datos atípicos (outliers) y análisis gráfico

Las observaciones atípicas son aquellas que presentan características diferentes a las del resto de los datos. Estos casos no se pueden clasificar simplemente como beneficiosos o problemáticos; en cambio, deben ser considerados dentro del contexto del análisis para evaluar la información que pueden aportar. Su principal inconveniente es que podrían no ser representativos



de la población general, lo que podría distorsionar significativamente los resultados de los análisis estadísticos. Sin embargo, aunque estos casos difieran de la mayoría de la muestra, podrían reflejar características de un segmento válido de la población, señalando una posible falta de representatividad en la muestra (Figueras & Gargallo, 2003; Pérez Pelea, 2019).

Para identificar estos casos atípicos, se revisa la distribución de los datos para cada variable, considerando como atípicos aquellos valores que se encuentren fuera de los rangos establecidos (Manuel Rojo, 2006). La identificación se realiza estableciendo un umbral para definir qué se considera atípico. En esta investigación, se emplearon histogramas y diagramas de caja.

2.2.1.1 Histogramas

Un histograma está formado por recuadros contiguos (adyacentes). Tiene un eje horizontal y otro vertical. El eje horizontal está identificado con lo que representan los datos (por ejemplo, precipitación mensual). El eje vertical está identificado como frecuencia o frecuencia relativa (o porcentaje de frecuencia o probabilidad). El gráfico tendrá la misma forma con cualquiera de las dos etiquetas (OpenStax, 2012). El propósito de estos es el de resumir gráficamente la distribución del conjunto univariado de datos, es decir: el centro, la dispersión, la asimetría, la presencia de valores atípicos y la ocurrencia de múltiples modas, que son utilizados como indicadores del modelo de distribución apropiado para los datos. El histograma presenta variantes como el histograma acumulativo y los histogramas acumulativos relativos (UNESCO, 2006). Según Pérez Pelea (2019) los histogramas constituyen la mejor manera de comprobar la presencia de valores atípicos en datos univariados de variables continuas.

2.2.1.2 Cajas y bigotes o box plots

Los gráficos de cajas y bigotes o boxplots, aportan una representación visual que describe la dispersión y simetría que presentan los datos observando los cuartiles (división de la distribución en cuatro partes delimitadas por los valores 0,25; 0,50 y 0,75). Estos gráficos están compuestos por tres componentes

(Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital & Entidad Pública Empresarial Red.es, 2021):

- La caja de rango intercuartílico (IQR, por sus siglas en inglés) abarca la mitad de los datos, desde el percentil 25 (Q1) hasta el percentil 75 (Q3) de la distribución. Dentro de esta caja, se ubica una línea que marca el percentil 50 (Q2), también conocida como la mediana. Esta representación visual proporciona información sobre la dispersión de los datos en función de la distancia entre Q1 y Q3, así como sobre la simetría o el sesgo de la distribución en relación con la mediana.
- Los bigotes se extienden desde ambos extremos de la caja y muestran los rangos del 25 % de los valores inferiores ($Q1 - 1,5 \text{ IQR}$) y superiores ($Q3 + 1,5 \text{ IQR}$), excluyendo los valores atípicos.
- Los valores atípicos son aquellas observaciones que caen por debajo del límite inferior ($Q1 - 1,5 \text{ IQR}$) o por encima del límite superior ($Q3 + 1,5 \text{ IQR}$) en el gráfico, identificándolos como puntos fuera del rango habitual de la distribución.

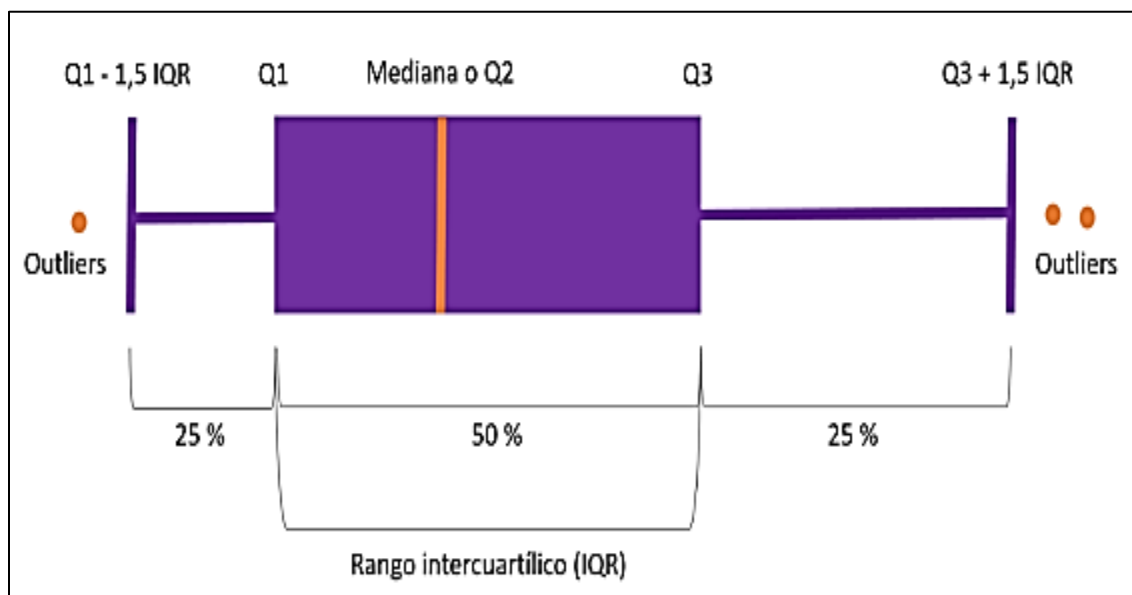


Figura 2.2 Representación visual que describe la dispersión y simetría que presentan los datos observando los cuartiles. Tomado de (Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital & Entidad Pública Empresarial Red.es, 2021)



¿Qué se debe hacer entonces con estos valores anómalos?

Como se ha explicado, los outliers, en los diagramas de caja y bigote, son puntos que se encuentran significativamente alejados del resto de los datos en un conjunto y que en gran medida pueden distorsionar la interpretación de la información y los resultados del análisis estadístico. De encontrar algún dato anómalo se puede proceder de la siguiente manera: primeramente, tomarlo como dato faltante y completarlo con cualquiera de los métodos que se explicarán en el apartado siguiente, también se puede realizar la sustitución mediante regresión simple utilizando los promedios mensuales de la serie temporal tomando en cuenta el propio dato anómalo y los valores mensuales del año que contenga dicho valor atípico. De no ser satisfactoria la correlación, se deberá realizar el mismo proceso sin tener en cuenta el dato anómalo, realizar correlaciones y regresiones entre los datos nuevamente, y de ser satisfactoria esta correlación, se cambiaría el valor del dato anómalo con la ecuación de la nueva correlación. De este tema se profundizará en el siguiente apartado.

2.3 Completamiento de registros faltantes de precipitación diaria y mensual.

2.3.1 Método de regresión lineal simple

En un análisis de regresión simple existe una variable respuesta o dependiente (y) y una variable explicativa o independiente (x). El propósito es obtener una función sencilla de la variable explicativa, que sea capaz de describir lo más ajustadamente posible la variación de la variable dependiente. La variable explicativa puede estar formada por un vector de una sola característica en el caso de la regresión lineal simple o, puede ser un conjunto de n características, atributos o dimensiones (regresión múltiple). La regresión se utiliza para predecir una medida basándonos en el conocimiento de otra y la intención final es que dado un vector de entrada x_{i+1} se persigue predecir un valor de salida y_{i+1} a partir de una función generada mediante la supervisión previamente observada de un conjunto de entrenamiento inicial $(x;y)...$ (NIST, 2003; Pereira González, 2009).



Campos Aranda (1984), menciona que el uso de la herramienta mencionada es particularmente recomendable para incrementar los registros anuales, ya sea de precipitación, temperaturas o escurrimientos. En el presente trabajo, se emplea un método para estimar los valores faltantes de y a partir de x , dado que x contiene más valores que y . Supongamos que se dispone de k pares de valores $(x;y)$ y $(n-k)$ valores adicionales de y . Primero, se calcula el coeficiente de correlación r para los k pares de valores, utilizando la ecuación (1). Este coeficiente, que varía en el intervalo $-1 \leq r \leq 1$, indica una correlación total cuando alcanza el valor de 1; si es cero, se considera que no hay correlación. La figura 2.2 resume el análisis del coeficiente de correlación entre dos variables.

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2 * S_y^2}} \quad (1)$$

Donde:

$$S_{xy} = \frac{1}{N} \sum x_i * y_i - (\bar{x}) * (\bar{y}) \quad \text{covarianza} \quad (2)$$

$$S_x^2 = \frac{\sum x_i^2}{N} - \bar{x}^2 \quad \text{varianza de las } x \quad (3)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum y_i^2}{N} - (\bar{y})^2 \quad \text{varianza de las } y \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad \text{media de las } x \quad (5)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{N} \quad \text{media de las } y \quad (6)$$

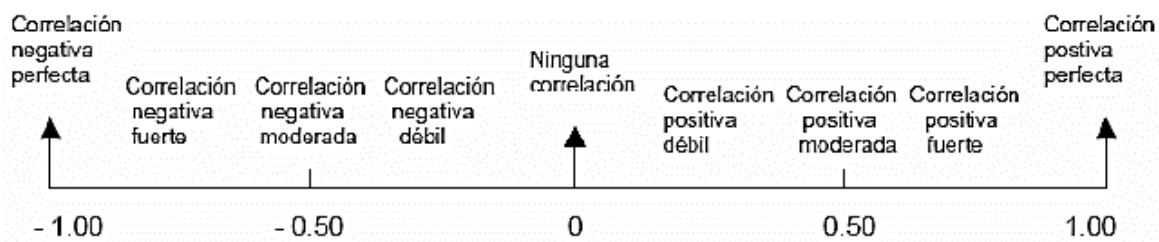


Figura 2.3 Diagrama de coeficiente de correlación entre dos variables. Tomado de (Cuellar et al., 2018)



Dado que el coeficiente de correlación r se basa en una muestra pequeña, solo proporciona una estimación del valor real de la población (ρ). Por lo tanto, es importante determinar si ρ podría ser cero. Para hacer esto, se recurre al estadístico Z , que se calcula según la ecuación 7

$$Z = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \ln\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \quad (7)$$

Se compara con el valor de Z_c que tiene distribución normal para cierto nivel de confianza, comúnmente 95%, para el cual $= 1.645$. Si $Z \geq Z_c$ no hay posibilidad de que (ρ) sea igual a cero y, por tanto, es significativo a 5%, como lo establece (Campos Aranda, 1984; Herrera-Oliva et al., 2017).

Si el coeficiente de correlación de las k parejas resultó mayor o igual a 0.8, como en (Campos Aranda, 1984; UNESCO, 2006), se considera aceptable inferir los valores faltantes de y , con una relación lineal definida por la ecuación (8), en la cual los parámetros b y m se evalúan con las parejas de valores comunes x y y , según las ecuaciones (9) y (10).

$$y = b + mx \quad (8)$$

Donde:

$$m = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (9)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (10)$$

Incluso con una alta correlación entre los registros x y y , es fundamental evaluar si usar el registro más amplio para mejorar el otro realmente resulta beneficioso, ya que las estimaciones podrían no coincidir con la realidad. La eficiencia estadística (E) permite determinar si el valor medio del registro y se optimiza y si es conveniente realizar la inferencia. Cuando (E) supera uno, la inferencia no mejorará el registro de las y_i ; sin embargo, si (E) es menor a uno, inferir los valores faltantes a partir de las x_i será más beneficioso (Campos Aranda, 1984; Salazar Moreno et al., 2022). La fórmula para calcular la eficiencia estadística se encuentra en la ecuación 11.



$$E = 1 - r^2 \left(\frac{n-m}{n} \right) + \left(\frac{n-m}{n(m-3)} \right) (1 - r^2) \quad (11)$$

donde:

m = número total de datos de y; n = número total de datos de x; r = coeficiente de correlación.

Este proceso se realizó de forma automatizada en Excel a través de los siguientes pasos. Se colocan los valores de la estación x con datos faltantes y la estación y que debe contener los datos que le faltan a la estación x. Se inserta un gráfico de dispersión seleccionando los datos y, en la pestaña "Insertar" se elige "Gráfico de dispersión". Se hace clic derecho en uno de los puntos en el gráfico de dispersión y selecciona "Agregar línea de tendencia". Asegurarse de elegir una línea de tendencia lineal y luego optar por mostrar la ecuación de la línea y el coeficiente de determinación (R cuadrado) haciendo clic derecho en la línea de tendencia y seleccionando "Formato de línea de tendencia". En la ventana que aparece, se marcan las casillas correspondientes para mostrar la ecuación y el valor de R cuadrado

En esta investigación se utilizó este método, en donde la correlación fuera mayor a 0.8 y que los datos que no se tomaran en cuenta para mejorar dicha correlación no excediera al 10 % de la población de datos del registro. Por ello, donde no se pudieron lograr estas condiciones para el completamiento de datos faltantes se utilizó el siguiente método.

2.3.2 Método del U.S. National Weather Service.

Según Campos Aranda (1984), este método, respaldado tanto teóricamente como empíricamente, permite estimar los datos faltantes en una estación A utilizando información de las estaciones cercanas. Esta técnica puede aplicarse para completar valores faltantes en registros diarios, mensuales o anuales. El proceso implica asignar un peso a los datos observados basado en una cantidad W, que es el inverso del cuadrado de la distancia D entre cada estación vecina y la



estación A. Por lo tanto, la estimación de la precipitación buscada P_x se calcula como:

$$P_x = \sum (P_i * W_i) / \sum W_i \quad (12)$$

Donde:

P_i = precipitación observada para la fecha de la faltante en las estaciones auxiliares circundantes (pueden ser como mínimo 2 en milímetros)

$W_i = 1/D_i^2$, siendo D_i la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en kilómetros (Km).

Se sugiere emplear cuatro estaciones auxiliares, seleccionando las más cercanas, de modo que cada una esté ubicada en uno de los cuadrantes definidos por ejes coordenados que atraviesan la estación con datos faltantes, típicamente los ejes norte-sur y este-oeste.

2.4 Pruebas de normalidad

En el ámbito de la ingeniería y áreas del conocimiento asociadas, es frecuente la necesidad de verificar si un pequeño conjunto de datos puede considerarse observado sobre una población con distribución normal (Cabrera et al., 2017). La misma, también conocida como distribución gaussiana, es una distribución de probabilidad continua que es fundamental en estadísticas y probabilidad. Se caracteriza por tener una forma de campana simétrica alrededor de su media, donde la mayoría de los datos se concentran cerca de la media y disminuyen hacia los extremos (González et al., (2006). Con esa finalidad, la literatura especializada en estadística ha propuesto una interesante variedad de procedimientos, denominados pruebas de hipótesis.

Ahora bien, varios procedimientos estadísticos dependen de la normalidad de la población, de modo que recurrir a una prueba de normalidad para determinar si se rechaza este supuesto constituye un paso importante en el análisis. Entre las pruebas para determinar si los datos de su muestra provienen de una población



normal, se destacan Ryan-Joiner, D'Agostino, Coeficiente de correlación de Pearson y Kolmogórov-Smirnov (Flores Tapia & Flores Cevallos, (2021).

2.4.1 Kolmogorov-Smirnov

En la prueba de Kolmogorov-Smirnov, la hipótesis nula establece que los datos provienen de una población con distribución normal, mientras que la hipótesis alternativa sugiere lo contrario. Esta prueba mide la máxima diferencia entre la función de distribución empírica de la muestra (F_n) y la función de distribución teórica (S_n). Si la diferencia calculada supera el valor crítico determinado en las tablas para un nivel de significación α , se rechaza la suposición de que los datos siguen una distribución normal (Figueras & Gargallo, 2003).

Hipótesis:

H_0 : Los datos analizados siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos analizados no siguen una distribución normal.

Si $D_n > D_{cr} \dots$ "Se rechaza H_0 , la serie no tiene una distribución normal".

$$D_n = \max |F(x) - S_n(x)| \quad (13)$$

Donde:

$F(x)$ = Distribución normal

$S_n(x)$ = Distribución empírica

D_{cr} = Valor de alfa "Error permitido" para un valor de α

D_n = Diferencia máxima entre la probabilidad normal y la probabilidad empírica.

Para un número de datos mayor a 35 la ecuación que se emplea varía de acuerdo con el nivel de significancia, como se muestra en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Valores de D_{cr} para distintos niveles de significancia. Tomado de O'Connor & Kleyner, (2011)

n/α	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01
------------	------	------	------	------	------



>35	$1.07\sqrt{n}$	$1.22\sqrt{n}$	$1.36\sqrt{n}$	$1.52\sqrt{n}$	$1.63\sqrt{n}$
-----	----------------	----------------	----------------------------------	----------------	----------------

2.4.2 Ryan-Joiner

Según Flores Tapia & Flores Cevallos (2021), el estadístico de Ryan-Joiner es utilizado para evaluar si los datos siguen una distribución normal al calcular la correlación entre los datos observados y las puntuaciones normales esperadas. Este método proporciona un coeficiente que indica la fuerza de esta correlación. Cuando este coeficiente se acerca a 1, los datos se ajustan mejor a la distribución normal esperada. Sin embargo, si el coeficiente cae por debajo de un nivel crítico establecido, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, indicando que los datos no siguen una distribución normal.

Si $R_p > C_v(n)$, se acepta la hipótesis nula, es decir que la muestra proviene de una distribución normal (Ryan & Joiner, 1976).

Para realizar esta prueba, primero se calcula la correlación entre los residuos y sus puntuaciones normales, y luego se utiliza esta correlación como estadístico de prueba, es más adecuada para muestras con más de 30 observaciones. El coeficiente de correlación se calcula de acuerdo con una ecuación 14.

$$R_p = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y}) b_i}{\sqrt{S^2(n-1) \sum b_i^2}} \quad (14)$$

Donde:

s = Desviación estándar, n = Número de datos, Y = Datos de la serie de tiempo,

b_i = Cuantil normal y,

R_p = Estadístico de la prueba de Ryan-Joiner.

$C_v(n)$ se obtiene mediante la ecuación 15, para una significancia del 5 %,

$$C_v(n) = 1.0063 - \frac{0.1288}{\sqrt{n}} - \frac{0.6118}{n} + \frac{1.3505}{n^2} \quad (15)$$

2.4.3 D' Agostino Pearson

La prueba de D'Agostino-Pearson se fundamenta en la premisa de que, cuando los datos siguen una distribución normal, la estadística de prueba sigue



una distribución chi-cuadrado con 2 grados de libertad. Por lo tanto, se desaconseja generalmente su uso para conjuntos de datos con menos de 20 elementos. Esta prueba analiza la simetría y la curtosis de la muestra para evaluar si los datos provienen de una distribución normal.

Prueba de asimetría

La distribución normal tiene una asimetría igual a cero. La prueba de asimetría determina si la asimetría de los datos es estadísticamente diferente de cero. La prueba se basa en el hecho de que, cuando los datos se distribuyen normalmente, el estadístico de prueba $Z_a = \text{Coef. Asimetría}/\text{s.e.}$ tiene una distribución normal estándar, donde Coef. Asimetría representa la asimetría de los datos de la muestra y el error estándar (s.e) viene dado por la siguiente fórmula, donde n = el tamaño de la muestra (Zaiontz, 2024).

$$s.e. = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}} \quad (16)$$

Prueba de curtosis

La distribución normal tiene una curtosis igual a cero. La prueba de curtosis determina si la curtosis de los datos es estadísticamente diferente de cero. La prueba se basa en el hecho de que, cuando los datos se distribuyen normalmente, el estadístico de prueba $Z_c = \text{Curtosis}/\text{s.e.}$ tiene una distribución normal estándar, donde curtosis representa la curtosis de los datos de la muestra y el error estándar viene dado por la siguiente fórmula, donde n = el tamaño de la muestra.

$$s.e. = 2(n-1) \sqrt{\frac{6n}{(n-2)(n-3)(n+3)(n+5)}} \quad (17)$$

El estadístico de D'Agostino está dado por la ecuación 18

$$P = \text{DISTR.CHICUAD.CD}(Z_a^2 + Z_c^2, 2) \quad (18)$$



Si $P > \alpha$ se acepta la hipótesis nula por lo que la muestra proviene de una distribución normal.

Es necesario señalar que en esta prueba, cuando el valor de la p asimetría o la p de curtosis no se encuentra dentro de los valores de los límites y se sale de las condiciones de frontera, la prueba no es válida.

2.4.4 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación es una medida precisa que evalúa la fuerza de la relación lineal entre dos variables en un análisis de correlación. En esta prueba se utiliza un gráfico de probabilidad para comparar los datos de la muestra con los cuantiles de una distribución normal. Se representa por " r " (Helsel & Hirsch, 2002). Si el valor de " r " determinado en el gráfico, es mayor que " r crítica" de la Tabla 2.3 entonces se acepta la hipótesis nula, lo que indica que los datos siguen una distribución normal.

Tabla 2.3 Coeficiente de correlación para prueba de normalidad tomado de Statistical Methods
pág. 459 (Helsel & Hirsch, 2002).

n	Nivel de significancia (α)					
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25
3	0.867	0.869	0.872	0.879	0.891	0.924
4	0.813	0.824	0.846	0.868	0.894	0.931
5	0.807	0.826	0.856	0.88	0.903	0.934
6	0.82	0.838	0.866	0.888	0.91	0.939
7	0.828	0.85	0.877	0.898	0.918	0.944
8	0.84	0.861	0.887	0.906	0.924	0.948
9	0.854	0.871	0.894	0.912	0.93	0.952
10	0.862	0.879	0.901	0.918	0.934	0.954
11	0.87	0.886	0.907	0.923	0.938	0.957
12	0.876	0.892	0.912	0.928	0.942	0.96
13	0.885	0.899	0.918	0.932	0.945	0.962
14	0.89	0.905	0.923	0.935	0.948	0.964
15	0.896	0.91	0.927	0.939	0.951	0.965
16	0.899	0.913	0.929	0.941	0.953	0.967
17	0.905	0.917	0.932	0.944	0.954	0.968



n	Nivel de significancia (α)					
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25
18	0.908	0.92	0.935	0.946	0.957	0.97
19	0.914	0.924	0.938	0.949	0.958	0.971
20	0.916	0.926	0.94	0.951	0.96	0.972
21	0.918	0.93	0.943	0.952	0.961	0.973
22	0.923	0.933	0.945	0.954	0.963	0.974
23	0.925	0.935	0.947	0.956	0.964	0.975
24	0.927	0.937	0.949	0.957	0.965	0.976
25	0.929	0.939	0.951	0.959	0.966	0.976
26	0.932	0.941	0.952	0.96	0.967	0.977
27	0.934	0.943	0.953	0.961	0.968	0.978
28	0.936	0.944	0.955	0.962	0.969	0.978
29	0.939	0.946	0.956	0.963	0.97	0.979
30	0.939	0.947	0.957	0.964	0.971	0.979
31	0.942	0.95	0.958	0.965	0.972	0.98
32	0.943	0.95	0.959	0.966	0.972	0.98
33	0.944	0.951	0.961	0.967	0.973	0.981
34	0.946	0.953	0.962	0.968	0.974	0.981
35	0.947	0.954	0.962	0.969	0.974	0.982
36	0.948	0.955	0.963	0.969	0.975	0.982
37	0.95	0.956	0.964	0.97	0.976	0.983
38	0.951	0.957	0.965	0.971	0.976	0.983
39	0.951	0.958	0.966	0.971	0.977	0.983
40	0.953	0.959	0.966	0.972	0.977	0.984
45	0.957	0.963	0.969	0.974	0.979	0.985
50	0.961	0.966	0.972	0.977	0.981	0.986
55	0.965	0.969	0.974	0.979	0.982	0.987
60	0.967	0.971	0.976	0.98	0.984	0.988
65	0.969	0.973	0.978	0.981	0.985	0.989
70	0.971	0.975	0.979	0.983	0.986	0.99
75	0.973	0.976	0.981	0.984	0.987	0.99
80	0.975	0.978	0.982	0.985	0.987	0.991
85	0.976	0.979	0.983	0.985	0.988	0.991
90	0.977	0.98	0.984	0.986	0.988	0.992
95	0.979	0.981	0.984	0.987	0.989	0.992
100	0.979	0.982	0.985	0.987	0.989	0.992



2.5 Pruebas de homogeneidad o consistencia

En los análisis climatológicos, se emplea el término "Homogeneidad de la serie", mientras que en los análisis hidrológicos se usa el término "Consistencia de la serie". Aunque son sinónimos y señalan cambios en la cantidad de lluvia medida por la estación, debido a diversas causas, hay una diferencia en las técnicas utilizadas para evaluar la homogeneidad o la consistencia. La homogeneidad se investiga generalmente mediante pruebas estadísticas, mientras que la consistencia se detecta principalmente con la técnica de la Curva Masa Doble. Las pruebas estadísticas de homogeneidad están diseñadas con una hipótesis nula y un criterio para decidir si aceptarla o rechazarla basado en su probabilidad de ocurrencia. Cuando la probabilidad es baja, se determina que la serie es no homogénea; en cambio, si la probabilidad es alta, se considera homogénea. Además, el criterio establece un umbral de significancia α que define el nivel de probabilidad bajo el cual la hipótesis nula o de normalidad se rechazará en favor de la alternativa. (Campos Aranda, 1984).

Cuando es posible especificar la distribución que sigue la hipótesis nula y las alternativas, se deben usar pruebas paramétricas; de lo contrario, se prefieren las pruebas no paramétricas. Estas últimas son menos rigurosas, pero más simples de realizar. Entre las pruebas no paramétricas se encuentran la prueba de Helmer, la de las Secuencias y la de Wald-Wolfowitz, mientras que entre las paramétricas se destacan la prueba t de Student y la de Cramer (Campos Aranda, 1984)

Según Campos Aranda (1984), la homogeneidad de una serie puede perderse debido a cambios físicos en la estación pluviométrica o modificaciones en el entorno. Las causas principales incluyen cambios en la ubicación del pluviómetro, en su exposición o reposicionamiento, en el procedimiento de observación, la construcción de embalses, deforestación, desecación de pantanos, apertura de nuevas zonas de cultivo y la industrialización en áreas cercanas. También establece que una estación debe ser reclasificada si se desplaza 8 km en distancia o 30 m en elevación.



2.5.1 Pruebas paramétricas

Las pruebas paramétricas son métodos estadísticos que requieren que se cumplan ciertas suposiciones sobre la distribución de los datos subyacentes en la población como se comentaba anteriormente. Estas pruebas se basan en parámetros específicos, como la media y la desviación estándar, de la distribución de la población, etc. Ejemplos comunes de pruebas paramétricas incluyen la prueba t de Student, y Cramer. Estas pruebas son más poderosas cuando se cumple el criterio de que la serie sigue una distribución normal.

2.5.1.1 t de Student

La prueba t estadística de Student resulta especialmente útil cuando la pérdida de homogeneidad en la serie puede atribuirse a un cambio abrupto en la media. Esta prueba tiene la capacidad de detectar inconsistencias en la media y es robusta en la mayoría de los casos, excepto cuando la duración de los dos periodos seleccionados para la comparación de sus medias es desigual, lo que podría sesgar la distribución de los datos. Una prueba se considera robusta cuando no se ve afectada significativamente por la forma de distribución de probabilidad de la serie. Por lo tanto, al aplicar la prueba t de Student, se recomienda tener en cuenta los valores de n_1 y n_2 para evitar sesgos en los resultados (Campos Aranda, 1984).

La estadística de la prueba de t de Student está definida por la ecuación 19:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} (1/n_1 + 1/n_2) \right]^{1/2}} \quad (19)$$

Donde:

t_d = Estadístico de t de Student.

n_1, n_2 = Número de datos de los periodos.

\bar{x}_1, \bar{x}_2 = Media de cada uno de los periodos.

S_1, S_2 = Varianzas de cada uno de los periodos.



El valor de t_d se contrasta generalmente con el valor crítico de la distribución de t de Student para dos colas, empleando grados de libertad $v = n_1 - n_2 - 2$, y un nivel de significancia del 5%. Los valores de t se tienen en la Tabla 2.4.

Solo se concluye que hay evidencia de inconsistencia, o falta de homogeneidad, si el valor absoluto de t_d es mayor que el valor de t .

Tabla 2.4 Valores de t para la distribución de t de Student

Grados de libertad	Nivel de significancia		Grados de libertad	Nivel de significancia	
	5%*	5%**		5%*	5%**
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.92	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.08
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.86	2.306	25	1.708	2.06
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.16	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2
16	1.746	2.12	120	1.658	1.98
17	1.74	2.11	∞	1.645	1.96

* PRUEBA DE UNA COLA

** PRUEBA DE DOS COLAS

2.5.1.2 Cramer

La prueba estadística de Cramer puede resultar más conveniente en ocasiones en las que se desea comparar la media de toda la serie con la media de una parte específica del registro para investigar la homogeneidad. Esta prueba, desarrollada por H. Cramer en 1946, es bastante útil para este propósito y complementa la prueba t de Student, especialmente cuando las muestras no



tienen un tamaño similar (n_1 y n_2). La prueba de Cramer está definida por las ecuaciones 20 y 21.

$$\tau_k = \frac{\bar{x}_k - \bar{x}}{s} \quad (20)$$

$$t_k = \left[\frac{n'(n-2)}{n - n'(1 + (\tau_k)^2)} \right]^{1/2} (\tau_k) \quad (21)$$

Donde:

\bar{x} = Media de la serie de tiempo completa.

\bar{x}_k = Media de cierta parte de la serie de tiempo.

n' = Número de datos de cierta parte de la serie de tiempo.

n = Número de datos de la serie de tiempo completa.

t_k = Estadístico de la prueba de Cramer.

S = Desviación estándar de la serie de tiempo completa.

τ_k = Relación entre la diferencia de medias y la desviación estándar

El valor de t_k se compara de igual manera con el valor de t de la distribución de Student de dos colas, igual que en la prueba anterior.

Solo se concluye que hay evidencia de inconsistencia, o falta de homogeneidad, si el valor absoluto de t_k es mayor que el valor de t .

2.5.2 Pruebas no paramétricas

Las pruebas no paramétricas son métodos estadísticos que no hacen suposiciones específicas sobre la distribución de los datos subyacentes en la población. Estas pruebas se basan en el orden de los datos, en lugar de sus valores absolutos, lo que las hace útiles cuando los datos no siguen una distribución específica. Ejemplos comunes de pruebas no paramétricas incluyen la prueba Helmer y la de Secuencias. Estas pruebas son menos sensibles a las suposiciones sobre la distribución de los datos y son útiles cuando se trabaja con muestras pequeñas o datos que no se ajustan bien a una distribución normal.

2.5.2.1 Secuencias

Según Campos Aranda (1984), esta prueba es bastante común y altamente sensible; se basa en la identificación y conteo de secuencias o rachas (u) en la



serie temporal, ya sea por encima o por debajo de la mediana. Primero, se determina la mediana de la serie: si el número de datos n es par, se ordenan y selecciona el valor central; si es impar, se promedia entre los dos valores centrales. Luego, cada dato se clasifica como A si está por encima de la mediana y como B si está por debajo. Se cuenta el número de secuencias continuas de A o B, y para que la serie se considere homogénea, este número debe caer dentro de un rango específico establecido para la prueba, la Tabla 2.5, muestra los rangos de u para el número de años de registro (n).

Tabla 2.5 Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo

Número de datos	Rango de u	Número de datos	Rango de u
12	5-8	32	13 - 20
14	5-10	34	14 - 21
16	6-11	36	15 - 22
18	7-12	38	16 - 23
20	8-13	40	16 - 25
22	9-14	50	22 - 30
24	9-16	60	26 - 36
26	10-17	70	31 - 41
28	11-18	80	35 - 47
30	12-19	100	45 - 57

2.5.2.2 Helmert

La prueba de Helmert es una herramienta estadística usada para detectar cambios abruptos, tendencias o variaciones en series de datos climatológicos, como las precipitaciones anuales. Esta prueba analiza las desviaciones de cada evento en comparación con su valor promedio y clasifica las desviaciones en secuencias (S) si son del mismo signo consecutivamente, o cambios (C) si el signo varía. Todos los años, excepto el primero, contribuyen a formar secuencias o cambios. En una serie homogénea, la diferencia entre el número total de secuencias y cambios debe aproximarse a cero, dentro de un margen de error que depende de la longitud de la serie (n). La ecuación que define la prueba de Helmert es:



$$S - C = \pm \sqrt{n - 1} \quad (22)$$

Donde:

S = Número de secuencias en la serie de tiempo.

C = Número de cambios en la serie de tiempo.

Cuando el número de secuencias supera al de cambios, esto indica que alguna variación en la media o una tendencia en los datos está generando inconsistencias en el registro, posiblemente debido a un cambio en la ubicación de la estación pluviométrica. Por otro lado, si el número de cambios es mayor que el de secuencias, esto sugiere la presencia de oscilaciones en el valor medio, lo cual requerirá una investigación más detallada para determinar la causa (Campos Aranda, 1984).

2.6 Pruebas de tendencia y persistencia

Todos los análisis y estudios que se realizan utilizando registros o conjuntos de datos anuales se sustentan en una serie de requisitos fundamentales. Estos incluyen que el conjunto de datos sea coherente, carezca de tendencias, no esté sesgado y no constituya un proceso cuya variabilidad esté regida por una distribución de probabilidades específica. La coherencia implica que todos los datos medidos pertenezcan a la misma población y, por lo tanto, tengan una media constante a lo largo del tiempo; este atributo se conoce como homogeneidad, y las pruebas para verificarlo buscan cambios significativos en la media.

Según Campos Aranda (2014), la presencia de tendencias en los datos se manifiesta cuando existe una correlación significativa (positiva o negativa) entre los datos y el tiempo. La presencia de una tendencia convierte a la serie en no estacionaria, y puede ser causada por cambios en el uso del suelo u otros factores ambientales. Por último, la aleatoriedad en un conjunto de datos significa que los valores observados son exclusivamente el resultado de procesos naturales (como la lluvia o el escurrimiento); cuando no hay aleatoriedad, el conjunto de datos



exhibe persistencia. La persistencia se define como la tendencia de los datos en una serie a recordar la magnitud de sus valores anteriores o a ser influenciados por ellos. Para evaluar este fenómeno, se utiliza el coeficiente de autocorrelación, que cuantifica la dependencia entre cada elemento y sus antecesores a lo largo de un cierto periodo de tiempo, denominado "retardo" o "retraso". La expresión para calcularlo se muestra en la ecuación 23.

$$r_k = \frac{\left[\frac{1}{n-k} \sum X_i X_{i+k} - \frac{1}{(n-k)^2} \sum X_i (\sum X_{i+k}) \right]}{\sqrt{\frac{1}{n-k} \sum X_i^2 - \frac{1}{(n-k)^2} (\sum X_i)^2} \sqrt{\frac{1}{n-k} \sum X_{i+k}^2 - \frac{1}{(n-k)^2} (\sum X_{i+k})^2}} \quad (23)$$

Donde:

r_k = Coeficiente de correlación serial de orden k.

k = Desfasamiento o retraso entre eventos, cuyo valor es 1.

X_i = Datos de la serie de tiempo, donde i es el número de la posición del dato.

Según Campos Aranda (1984), se puede indicar que valores de $r_1 < 0.30$ procedentes de registros cortos, no son estadísticamente diferentes de cero. En series con marcada persistencia, r_1 puede acercarse a uno. Aunque, puede pasar que r_1 sea negativo, lo cual es poco común en series hidrológicas, ya que esto requeriría que altos valores en la serie sean seguidos por bajos valores de manera constante.

Dado lo anterior, el coeficiente de correlación serial de orden uno, calculado mediante la ecuación 23, no debe ser aceptado automáticamente, sino que debe ser sometido a pruebas estadísticas para determinar si es significativo o si se debe únicamente a errores de muestreo. Estas pruebas pueden ser paramétricas, como la prueba de R. L. Anderson, o no paramétricas, como el criterio del "punto de quiebre" en la serie (Campos Aranda, 1984).

2.6.1 Prueba paramétrica de Anderson

Esta prueba se ilustra mediante un gráfico (Figura 2.4). Si el valor obtenido de r_k a través de la ecuación 23 cae dentro de las zonas delimitadas por las curvas

de control para un nivel de significancia del 5%, entonces no se considera estadísticamente distinto de cero, lo que sugiere que no hay persistencia presente.

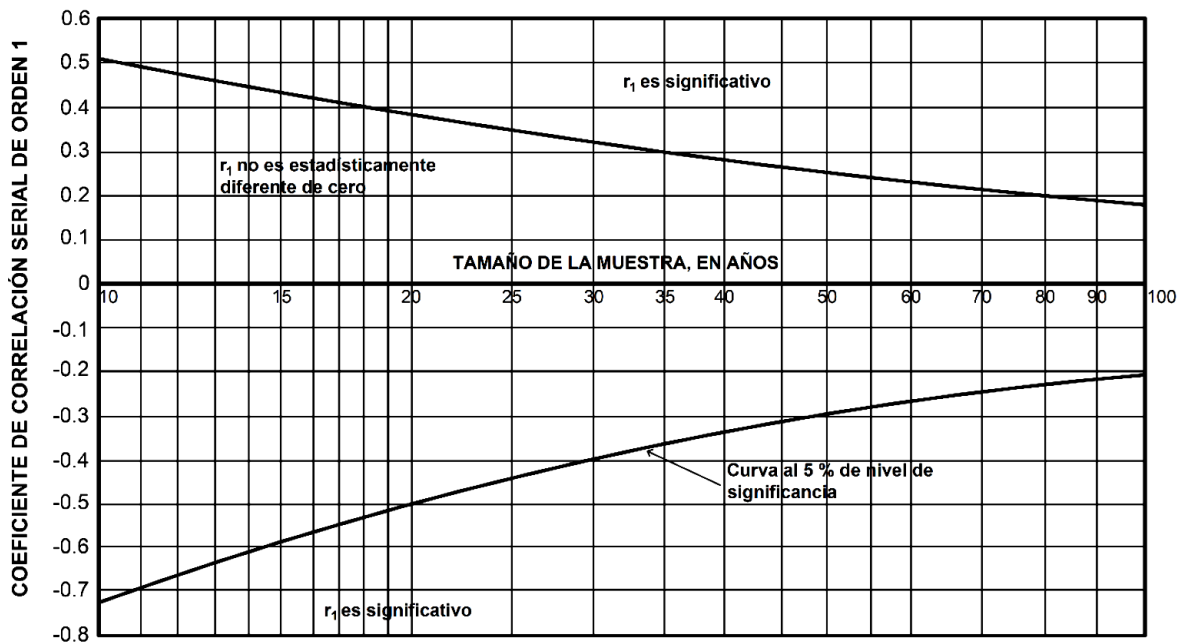


Figura 2.4 Prueba del coeficiente de correlación serial según Anderson para persistencia. Tomado de (Campos Aranda, 1984)

2.6.2 Prueba no paramétrica punto de quiebre

En una serie cronológica de precipitación o escurrimientos anuales la persistencia se manifiesta por un número reducido de picos y bajos, en comparación con los que se tendría si la serie fuera aleatoria. Un pico es definido cuando $X_{i-1} < X_i > X_{i+1}$, y un bajo cuando $X_{i-1} > X_i < X_{i+1}$. Se evalúa el número de picos y bajos designados por m y se calcula la estadística u , por la ecuación 24:

$$u = \frac{m - [2(n - 2)/3]}{\sqrt{(16n - 29)/90}} \quad (24)$$

Donde

m = Número de quiebres (picos altos y bajos).

n = Tamaño de la muestra.

Dado que 1.96 corresponde al valor crítico de la distribución normal estándar para un nivel de significancia del 5%, se considera que hay persistencia



en la serie cuando el valor absoluto de u es mayor que 1.96; si no es así, la serie se clasifica como aleatoria (Campos Aranda, 1984).

2.7 Pruebas de estacionalidad

El estudio de las precipitaciones a lo largo del año es crucial para comprender el clima de una región. La identificación de los meses en los que se concentran las lluvias, la duración de estos periodos y la cantidad total de la misma son aspectos fundamentales para entender la pluviometría estacional. Estos factores desempeñan un papel clave en la configuración de la biodiversidad y tienen un impacto significativo en una amplia gama de aspectos ambientales, económicos y sociales que van desde la gestión de humedales y la disponibilidad de recursos hídricos hasta la planificación forestal, la prevención de incendios, la erosión del suelo y el turismo (Aguilar-Alba et al., 2018), además, determinan en gran medida la estacionalidad de otras cantidades hidrológicas, como el caudal y recarga de aguas subterráneas (Dingman, 2015). Dentro de todas estas, cabe destacar una actividad crucial y sin precedentes para la supervivencia y el desarrollo humano como es el caso de la agricultura, por lo tanto, es importante conocer la variabilidad estacional, o intraanual, de las precipitaciones.

La metodología que se utilizará en esta investigación es la de estadística circular propuesta por (Fisher, 1993; Dingman, 2015), o la también llamada como coeficiente de estacionalidad de Markham, donde se expresa que el tiempo a lo largo del año está representado en un círculo y cada mes se le asigna un ángulo Φ_m , medido en el sentido de las agujas del reloj desde el 1 enero, hasta la fecha de mitad del siguiente mes, esta información se puede observar con mejor claridad y exactitud en la Tabla 2.6. Gráficamente se asemeja a un conjunto de flechas de distinta longitud partiendo del centro en distintas direcciones (Ezber, 2018). Al proyectar sobre los ejes resulta:

La dirección del vector Φ_R y la magnitud P_R se calculan como:

$$\Phi'_R = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right) \quad (25)$$



$$P_R = (S^2 + C^2)^{1/2} \quad (26)$$

$$S = \sum_{m=1}^{12} P_m * \sin(\Phi_m) \quad (27)$$

$$C = \sum_{m=1}^{12} P_m * \cos(\Phi_m) \quad (28)$$

Donde:

P_m son los datos mensuales de precipitación y Φ_m son los 12 ángulos temporales mensuales dados en la Tabla 2.6. El tiempo promedio de ocurrencia Φ_R se calcula considerando los signos de S y C que determinan el vector resultante en el cuadrante del círculo, para ello:

$$\Phi_R = \Phi'_R \quad \text{si } S > 0 \text{ y } C < 0 \quad (29)$$

$$\Phi_R = \Phi'_R + 180^\circ \quad \text{si } C < 0 \quad (30)$$

$$\Phi_R = \Phi'_R + 360^\circ \quad \text{si } S < 0 \text{ y } C > 0 \quad (31)$$

El índice de estacionalidad I_S , se define, como el cociente entre el módulo resultante entre P_R y la precipitación total anual P_m (Markham, 1970).

$$I_S = \frac{P_R}{\sum_{m=1}^{12} P_m} \quad (32)$$

I_S es un índice adimensional que varía desde 0 (todos los meses con la misma precipitación) hasta 1 (toda la precipitación ocurre en un único mes). Por tanto, valores bajos de I_S indican precipitaciones distribuidas a lo largo del año y valores altos de I_S , precipitación concentrada en pocos meses.

Como nota aclaratoria, para el caso en cuestión, es decir el estado de Chihuahua, se le llamará precipitación cuando se hable del acumulado anual, incluyendo tanto las precipitaciones líquidas como las sólidas (nieve) según sea el caso; y lluvias, para el periodo húmedo, haciendo referencia solamente la precipitación líquida que ocurre en los meses cálidos (junio - octubre).



Tabla 2.6 Ángulos y funciones de ángulo para calcular el índice de estacionalidad y el tiempo promedio de ocurrencia de datos mensuales. Tomado de Dingman (2015).

Meses	Mediados de mes		Seno	Coseno	Principio de mes	
	Día del año	ángulo Φ_m (Grados)			Día del año	ángulo Φ_m (Grados)
Enero	16	15.7808	0.2720	0.9623	1	0.9863
Febrero	45.5	44.8767	0.7056	0.7086	32	31.5616
Marzo	75	73.9726	0.9611	0.2761	60	59.1781
Abril	105.5	104.0548	0.9701	-0.2428	91	89.7534
Mayo	136	134.1370	0.7177	-0.6964	121	119.3425
Junio	166.5	164.2192	0.2720	-0.9623	152	149.9178
Julio	197	194.3014	-0.2470	-0.9690	182	179.5068
Agosto	228	224.8767	-0.7056	-0.7086	213	210.0822
Septiembre	258.5	254.9589	-0.9657	-0.2595	244	240.6575
Octubre	289	285.0411	-0.9657	0.2595	274	270.2466
Noviembre	319.5	315.1233	-0.7056	0.7086	305	300.8219
Diciembre	350	345.2055	-0.2554	0.9668	335	330.4110

Como se comentó al inicio de esta investigación el clima está cambiando y el supuesto de estacionalidad estricta ya no está justificada; sin embargo, aún se investiga la forma correcta de introducir esta variabilidad en los cálculos climatológicos. Con la aplicación de este método se pretende localizar temporalmente la época de lluvias a lo largo del año.

Comprender la fase y la amplitud de los ciclos hidroclimatológicos es crucial para diversas áreas, como la planificación agrícola, la gestión de embalses para la producción de energía hidroeléctrica y el suministro de agua para uso doméstico, industrial y agrícola. También es esencial para el diseño de estrategias de prevención y mitigación de desastres naturales invernales y para la implementación de campañas de vacunación frente a enfermedades recurrentes relacionadas con el clima. En el ámbito agrícola, por ejemplo, los ciclos anuales y semestrales influyen significativamente en los procesos fenológicos; en cultivos como los cítricos y el mango, la floración está estrechamente relacionada con la distribución temporal de las lluvias o las variaciones de temperatura (Orduz-Rodríguez et al., 2010). En el cultivo del algodón, la gestión del agua es



especialmente crítica debido a la sensibilidad del cultivo a las lluvias cercanas a la cosecha. Asimismo, la vegetación natural está influenciada por estos factores (Morissette et al., 2009). Además, los ciclos fenológicos de numerosos insectos, incluyendo polinizadores, herbívoros y vectores de enfermedades, también dependen de las fases de los fenómenos hidroclimáticos (Cantor Gómez, 2011).

Asimismo, los cambios en la frecuencia e intensidad de las lluvias en el estado de Chihuahua demandan el desarrollo y aplicación de un plan de adaptación al cambio climático en las principales actividades socioeconómicas, que permita ajustar las demandas de recursos hídricos de manera sustentable (Mendoza-Urbe, 2022).



3 RESULTADO DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO A LAS SERIES DE TIEMPO DE PRECIPITACIÓN.

3.1 Análisis exploratorio de datos de precipitación (AED)

Como se puede apreciar en la Tabla 2.1, hay algunas estaciones que no cumplen con el criterio de tener al menos 20 años de registro histórico, por lo que no se tomarán en el análisis de estacionalidad, como es el caso de: Boca de Río, CILA Norte, Delicias (SMN), Maguarichi, Ojinaga (SMN), Vergel (DGE), Villa Ahumada, y Villa Coronado. Otras estaciones, aunque sí cumplan con este requisito, cuentan con más de un 20 % de datos faltantes como son: Basaseachi, Guachochi, Majalca y Las Chepas. En total 12 estaciones fueron eliminadas y 30 aceptadas para aplicar métodos estadísticos según la metodología planteada.

Como se comentaba en el epígrafe 2.1, se compararon los totales anuales de las estaciones climáticas que coincidían en ambas bases de datos, en la mayor parte de los casos los valores eran diferentes. Para determinar cuáles eran los correctos se verificó la información en las estaciones vecinas, es decir que los valores fueran consistentes, ya que el fenómeno de la precipitación, a diferencia de la temperatura ocupa menor área espacial y es aleatorio; la Tabla 3.1 muestra un mejor ejemplo de lo anterior. En el caso de la estación La Mesa resultaron ser idóneos los valores de los acumulados anuales procedentes de la base de datos de registros diarios para los años 2003 y 2004; mientras que en la estación Delicias, el acumulado anual correcto para el año 2001 fue el de la base de datos de registros mensuales.



Tabla 3.1 Comparación entre los valores acumulados anuales procedentes de ambas bases de datos (diario y mensual).

	Estación analizada		Estaciones cercanas (auxiliares)		
	La Mesa		Chihuahua	L.L. León	Delicias
Elevación (msnm)	1173		1428	1080	1173
Distancia (Km)	Acum. Mensual (mm)	Acum. Diario (mm)	20.23	67.21	73.74
2003	42.9	274.3	352.8	340	216.3
2004	268.3	344.9	668.1	599.5	542.9
	Delicias		Francisco Madero	Chihuahua	
Elevación (msnm)	1173		1242	1428	
Distancia (Km)	Acum. Mensual	Acum. Diario	16.5	79.33	
2001	140.9	336.1	164.3	272.6	

Este método se utilizó de igual forma para la detección de los valores atípicos ya que los histogramas y los gráficos de caja de bigotes detectaban valores inusuales, que realmente no lo eran. Se analizaron los valores contiguos (anterior y siguiente) y la ocurrencia de ciclones tropicales en esas fechas. En otros casos, con mayor frecuencia en los meses de poca precipitación como enero, febrero y marzo, los errores fueron atribuidos al desplazamiento del punto decimal como error de captura. Para corregir los outliers se emplearon dos métodos, el primero, a través de regresión lineal con las estaciones vecinas, manteniendo un coeficiente de correlación por encima de 0.8; y el segundo, utilizando los promedios de la propia estación, siempre y cuando solo existiera un valor atípico por año y mes en toda la serie. La Figura 3.1 muestra el plano de las 30 estaciones que pasan a la siguiente etapa de análisis.

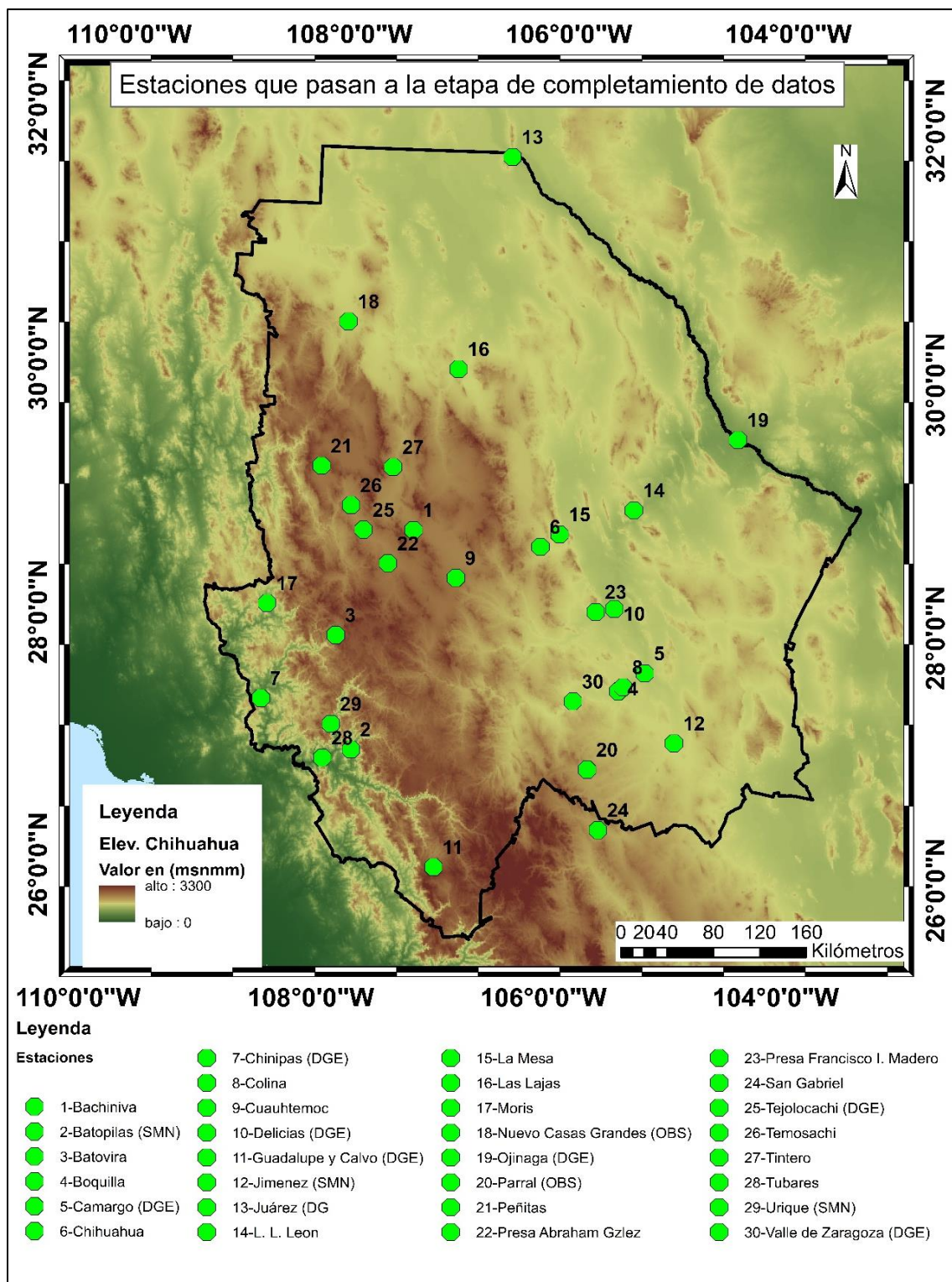


Figura 3.1 Estaciones climatológicas que pasan a la etapa de completamiento de datos.



3.2 Completamiento de registros faltantes de precipitación mensual.

Para definir el método de completamiento a utilizar en cada estación se siguieron las siguientes pautas:

- A las estaciones que tuvieran menos de un 20 % de datos faltantes, que mantuvieran un coeficiente de correlación lineal igual o mayor a 0.8 ($r \geq 0.8$) y que los datos que no se tomaran en cuenta para mejorar dicha correlación no excediera al 10 %, se les aplicó Regresión Lineal Simple (RLS).
- A las demás, que no cumplieran con la condición anterior, se utilizó el método de U.S. National Weather Service (US NWS) utilizando como mínimo 3 estaciones cercanas

La Tabla 3.2 muestra un resumen en cuanto a estación - método de completamiento para una mejor comprensión. Como se muestra 12 estaciones fueron completadas por el método de RLS y 8 con el US NWS, las demás (10 estaciones) estaban completas.



Tabla 3.2 Resumen de estaciones y método de completamiento de datos a emplear según la naturaleza de estos. Elaboración propia.

Estaciones	Latitud	Longitud	Datos faltantes (1960-2022) (%)	Valores completados con registro diario (%)	Valores atípicos	Método RLS	Método US NWS
Abraham González	28.501	-107.47	15.8	0	0	x	
Bachíniva	28.771	-107.256	4.8	0	0	x	
Batopilas (SMN)	27.017	-107.73	0.3	1.2	0	x	
Batovira	27.918	-107.904	27	0	5		x
Camargo DGE)	27.69	-105.183	9.52	0	0	x	
Cd. Juárez (DGE)	31.736	-106.486	3.17	0	2	x	
Chihuahua	28.671	-106.13	0	0	0	Estación completa	
Chínipas (DGE)	27.393	-108.536	0	0	1	Estación completa	
Colina	27.577	-105.371	32.3	1	0		x
Cuauhtemoc	28.405	-106.867	0	0	12	x	
Delicias (DGE)	28.194	-105.464	0	0	0	Estación completa	
Francisco I. Madero	28.167	-105.627	0	0	0	Estación completa	
Guadalupe y Calvo (DGE)	26.108	-106.975	3.4	0.9	0		x
Jiménez (SMN)	27.140	-104.914	4.8	0	0	x	
L. L. León	28.978	-105.312	7.9	0	0	x	
La Boquilla	27.543	-105.412	0	0	0	Estación completa	
La Mesa	28.773	-105.964	24.1	12.7	0		x
Las Lajas	30.054	-106.907	15.9	0	0	x	
Moris	28.147	-108.52	19	0.6	0		x
N. Casas Grandes (OBS)	30.397	-107.907	0	0	0	Estación completa	
Ojinaga (DGE)	29.55	-104.4	0	0	0	Estación completa	
Parral (OBS)	26.916	-105.667	0	0	3	Estación completa	
Peñitas	29.251	-108.093	36.1	0	2		x
San Gabriel	26.439	-105.559	33.3	0	0		x
Tejolocachi (DGE)	28.759	-107.698	0	0	0	Estación completa	
Temosachic	28.95	-107.817	0	0	0	Estación completa	



Estaciones	Latitud	Longitud	Datos faltantes (1960-2022) (%)	Valores completados con registro diario (%)	Valores atípicos	Método RLS	Método US NWS
Tintero	29.263	-107.457	20.6	0	0	x	
Tubares	26.941	-107.978	23.8	0	1		x
Urique (SMN)	27.213	-107.914	12.7	0	0	x	
Valle de Zaragoza (DGE)	27.454	-105.807	14.3	0	1	x	
Total						12	8

3.3 Pruebas de normalidad

En el presente apartado, se explica cómo se realizan las diferentes pruebas de normalidad: Ryan-Joiner, D'Agostino, Coeficiente de correlación de Pearson y Kolmogórov-Smirnov. Este paso es fundamental para conocer el tipo de pruebas estadísticas a emplear en la serie, ya sean paramétricas o no paramétricas.

Para ello se especifica que la serie se aproxima a una distribución normal (DN) si cumple las siguientes pautas:

- Si tiene 3 o más pruebas con el resultado de DN
- Si tiene 2 pruebas con DN y 2 pruebas que no se aproxima a una distribución normal (NSDN)
- Si 2 resultan DN, 1 no aplica y la otra NSDN se determinó que la serie se aproxima a un comportamiento normal.

De no cumplir con ninguno de los criterios anteriores la serie no se aproxima un comportamiento normal. La Tabla 3.3 muestra el resumen de las pruebas de normalidad.

Tabla 3.3 Resultados de las pruebas de normalidad aplicada a las series de precipitación anual en el periodo de 1960-2022.

Pruebas de Normalidad						
No.	Estación	Kolmogorov Smirnov	Coef. de Correlación	Ryan Joiner	D'agostino Pearson	Resultado
1	Abraham González	DN	DN	DN	DN	DN
2	Bachíniva	DN	DN	DN	DN	DN
3	Batopilas (SMN)	DN	DN	DN	DN	DN
4	Batovira	DN	DN	DN	DN	DN
5	Camargo DGE)	DN	DN	DN	DN	DN
6	Cd. Juárez (DGE)	DN	DN	DN	DN	DN
7	Chihuahua	DN	DN	DN	DN	DN
8	Chínipas (DGE)	DN	DN	NSDN	NSDN	DN
9	Colina	DN	DN	DN	DN	DN
10	Cuauhtemoc	DN	DN	DN	DN	DN
11	Delicias (DGE)	DN	DN	NSDN	No aplica	DN
12	Francisco I. Madero	DN	DN	NSDN	No aplica	DN
13	Guadalupe y Calvo (DGE)	DN	DN	DN	DN	DN
14	Jiménez (SMN)	DN	NSDN	DN	DN	DN



Pruebas de Normalidad						
No.	Estación	Kolmogorov Smirnov	Coef. de Correlación	Ryan Joiner	D'agostino Pearson	Resultado
15	L. L. León	DN	DN	NSDN	No aplica	DN
16	La Boquilla	DN	DN	DN	DN	DN
17	La Mesa	DN	DN	DN	DN	DN
18	Las Lajas	DN	DN	DN	DN	DN
19	Moris	DN	DN	DN	DN	DN
20	Nuevo Casas Grandes (OBS)	DN	DN	DN	DN	DN
21	Ojinaga (DGE)	DN	DN	DN	DN	DN
22	Parral (OBS)	DN	DN	DN	DN	DN
23	Peñitas	DN	DN	DN	DN	DN
24	San Gabriel	DN	DN	DN	DN	DN
25	Tejolocachi (DGE)	DN	DN	DN	DN	DN
26	Temosachic	DN	DN	NSDN	No aplica	DN
27	Tintero	DN	DN	NSDN	No aplica	DN
28	Tubares	DN	DN	DN	DN	DN
29	Urique (SMN)	DN	DN	NSDN	DN	DN
30	Valle de Zaragoza (DGE)	DN	DN	DN	DN	DN

De las 30 series analizadas todas se aproximan a un comportamiento normal, es decir, a todas se le aplicarán pruebas paramétricas (t de Student y Cramer) según el apartado 2.5.1, para determinar la homogeneidad.

3.4 Pruebas de homogeneidad

Según el epígrafe 2.5, el análisis de homogeneidad de las estaciones climatológicas desentraña un enigma esencial: ¿son consistentes las mediciones de una estación a lo largo del tiempo, o se han visto alteradas por factores externos? Este análisis busca determinar si una estación climatológica proviene de una población uniforme o si la homogeneidad ha sido perturbada por cambios físicos en el entorno o, incluso, por señales emergentes de cambio climático. En esencia, se trata de discernir si las variaciones observadas en los datos climáticos son producto de fenómenos naturales o de influencias antrópicas, lo que implica una evaluación minuciosa de la integridad de los registros meteorológicos.



Las pruebas paramétricas, como las de t de Student y Cramer, comparan el estadístico de la media, en la primera, las medias de cada periodo y en la segunda la media de un periodo con la media total de la serie. Estas pruebas tienen la capacidad de detectar inconsistencias o saltos en la serie temporal, a diferencia de las no paramétricas que se basan en el orden de los datos, en lugar de sus valores absolutos.

En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de las pruebas de t de Student y Cramer para la estación Francisco Madero, el año de inflexión o cambio que se identificó fue el 1993 como se observa en la Figura 3.2. Antes de ese año, los valores de precipitación se mantenían por encima de la media total; luego la serie cambió y los valores comenzaron a disminuir, oscilando por debajo de la misma media. Lo mismo se aprecia también con la línea de periodo móvil. No obstante, según las pruebas realizadas, la serie se mantiene homogénea.

Como se explicó en el apartado 2.5, las pruebas de homogeneidad tienen la capacidad de detectar inconsistencias en la media de la serie, por ello es por lo que se divide en dos periodos, cuyo punto divisorio o punto de inflexión evidencia un comportamiento diferente o un salto a ambos lados de la serie en cuanto a: la media, la tendencia y la evolución del promedio. A partir de estas diferencias fue que para cada estación se determinó ese año de cambio.

La Tabla 3.5 y la Figura 3.3 muestran los resultados de las mismas pruebas efectuadas a la serie temporal de Chínipas, dando como resultado no homogéneo y el año de cambio es el 1991.



Tabla 3.4 Resultado de las pruebas de Homogeneidad paramétricas (t de Student y Cramer) de la estación Francisco Madero.

t de Student				Cramer			
periodo 1	1960-1993	periodo 2	1994- 2022	Media total=			303.083
X_1	326.16	$X_2=$	276.03	Desviación total=			109.608
$n_1=$	34	$n_2=$	29	n=			63
$S^2_1=$	11416.18	$S^2_2=$	11742.45	T	0.2105	T	-0.246
v= $n_1+n_2-2= 61$				$T_{k1}=$	1.8287	$T_{k2}=$	-1.828
Td(abs)		t crítico calc (5%)		Tk		t crítico(5%)	
1.8147	<		1.9996	1.8287	<		1.9996
La serie de tiempo es HOMOGÉNEA				La serie de tiempo es HOMOGÉNEA			

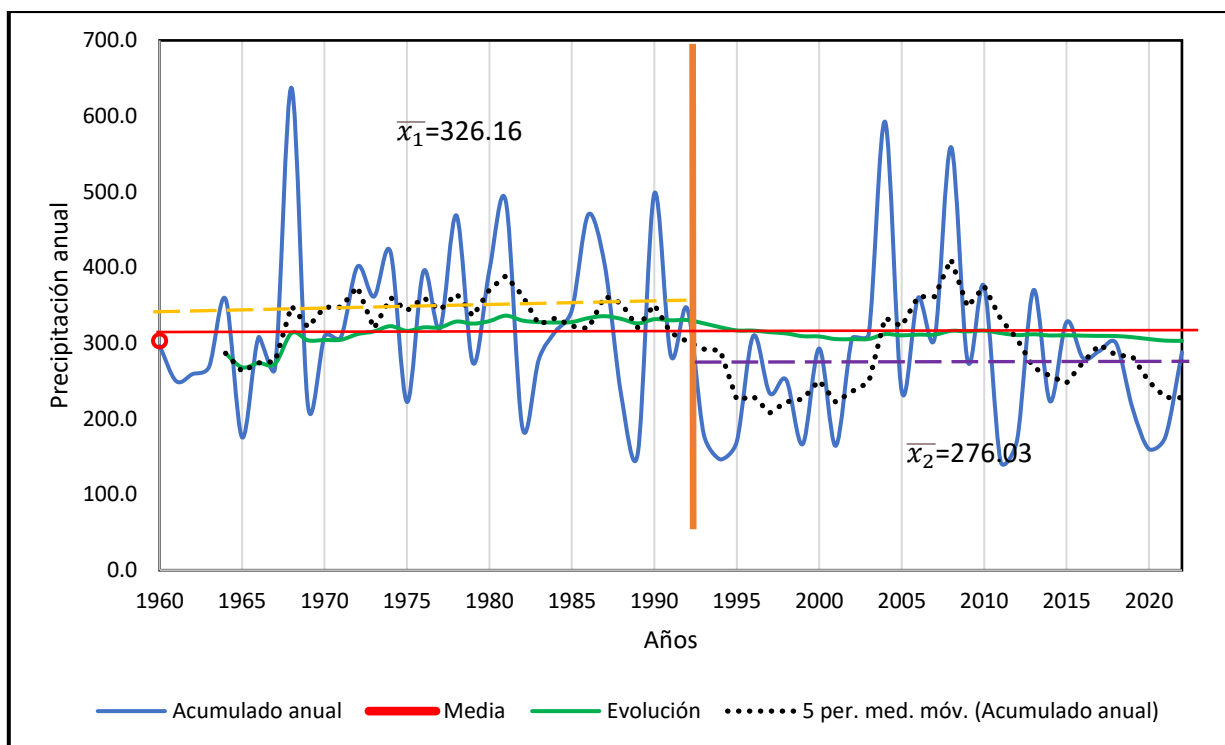


Figura 3.2 Representación gráfica de la serie de precipitación anual, periodo 1960-2022 de la estación Francisco Madero.



Tabla 3.5 Resultado de las pruebas de Homogeneidad paramétricas (t de Student y Cramer) de la estación Chínipas

t de Student				Cramer			
periodo 1	1960-1991	periodo 2	1992- 2022	Media total=			818.091
X ₁	922.525	X ₂ =	710.288	Desviación total=			236.860
n ₁ =	32	n ₂ =	31	n=			63
S ² ₁ =	67628.649	S ² ₂ =	22420.39	T	0.4409	T	-0.4551
v= n ₁ +n ₂ -2= 61				T _{k1} =	3.9133	T _{k2} =	-3.9133
Td(abs)		t crítico calc (5%)		Tk		t crítico(5%)	
3.8900	<		1.9996	3.8900	<		1.9996
La serie de tiempo es NO HOMOGÉNEA				La serie de tiempo es NO HOMOGÉNEA			

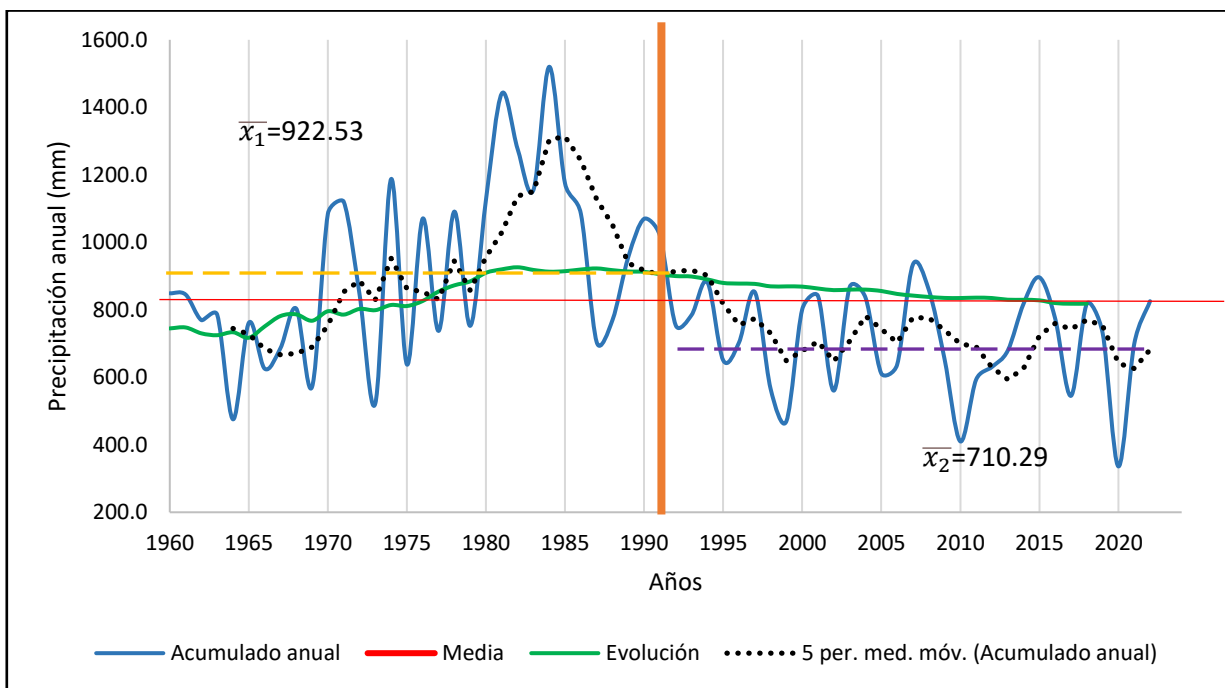


Figura 3.3 Representación gráfica de la serie de precipitación anual, periodo 1960-2022 de la estación Chínipas.



Tabla 3.6 Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a los valores de precipitación anual de las estaciones climatológicas.

#	Estación	<i>Pruebas paramétricas</i>		<i>Resultado</i>	1er periodo	2do periodo
		t de Student	Cramer			
1	Abraham González	H	H	H	1960- 1994	1995- 2022
2	Bachíniva	H	H	H	1960- 1994	1995- 2022
3	Batopilas (SMN)	H	H	H	1960- 1997	1998- 2022
4	Batovira	NH	NH	NH	1960- 1993	1994- 2022
5	Camargo DGE)	H	H	H	1960- 1993	1994- 2022
6	Cd. Juárez (DGE)	H	H	H	1960- 1992	1993- 2022
7	Chihuahua	H	H	H	1960- 1994	1995- 2022
8	Chínipas (DGE)	NH	NH	NH	1960- 1991	1992- 2022
9	Colina	H	H	H	1960- 1994	1995-2022
10	Cuauhtemoc	H	H	H	1960- 1992	1993- 2022
11	Delicias (DGE)	NH	NH	NH	1960- 1993	1994- 2022
12	Francisco I. Madero	H	H	H	1960- 1993	1994- 2022
13	Guadalupe y Calvo (DGE)	NH	NH	NH	1960- 1993	1994- 2022
14	Jiménez (SMN)	H	H	H	1960- 1992	1993- 2022
15	L. L. León	H	H	H	1960- 1992	1993- 2022
16	La Boquilla	H	H	H	1960- 1994	1994-2022
17	La Mesa	NH	NH	NH	1960- 1990	1995- 2022
18	Las Lajas	H	H	H	1960- 1992	1993- 2022
19	Moris	H	H	H	1960- 1993	1994- 2022
20	Nuevo Casas Grandes (OBS)	H	H	H	1960- 1993	1994- 2022
21	Ojinaga (DGE)	NH	NH	NH	1960- 1993	1994- 2022
22	Parral (OBS)	H	H	H	1960- 1991	1992- 2022
23	Peñitas	NH	NH	NH	1960- 1979	1980- 2022
24	San Gabriel	H	H	H	1960- 1987	1988- 2022
25	Tejolocachi (DGE)	NH	NH	NH	1960- 1994	1995- 2022
26	Temosachic	NH	NH	NH	1960- 1994	1995- 2022
27	Tintero	H	H	H	1960- 1994	1995- 2022
28	Tubares	H	H	H	1960- 1996	1997-2022
29	Urique (SMN)	H	H	H	1960- 1997	1998- 2022
30	Valle de Zaragoza (DGE)	H	H	H	1960- 1994	1995-2022

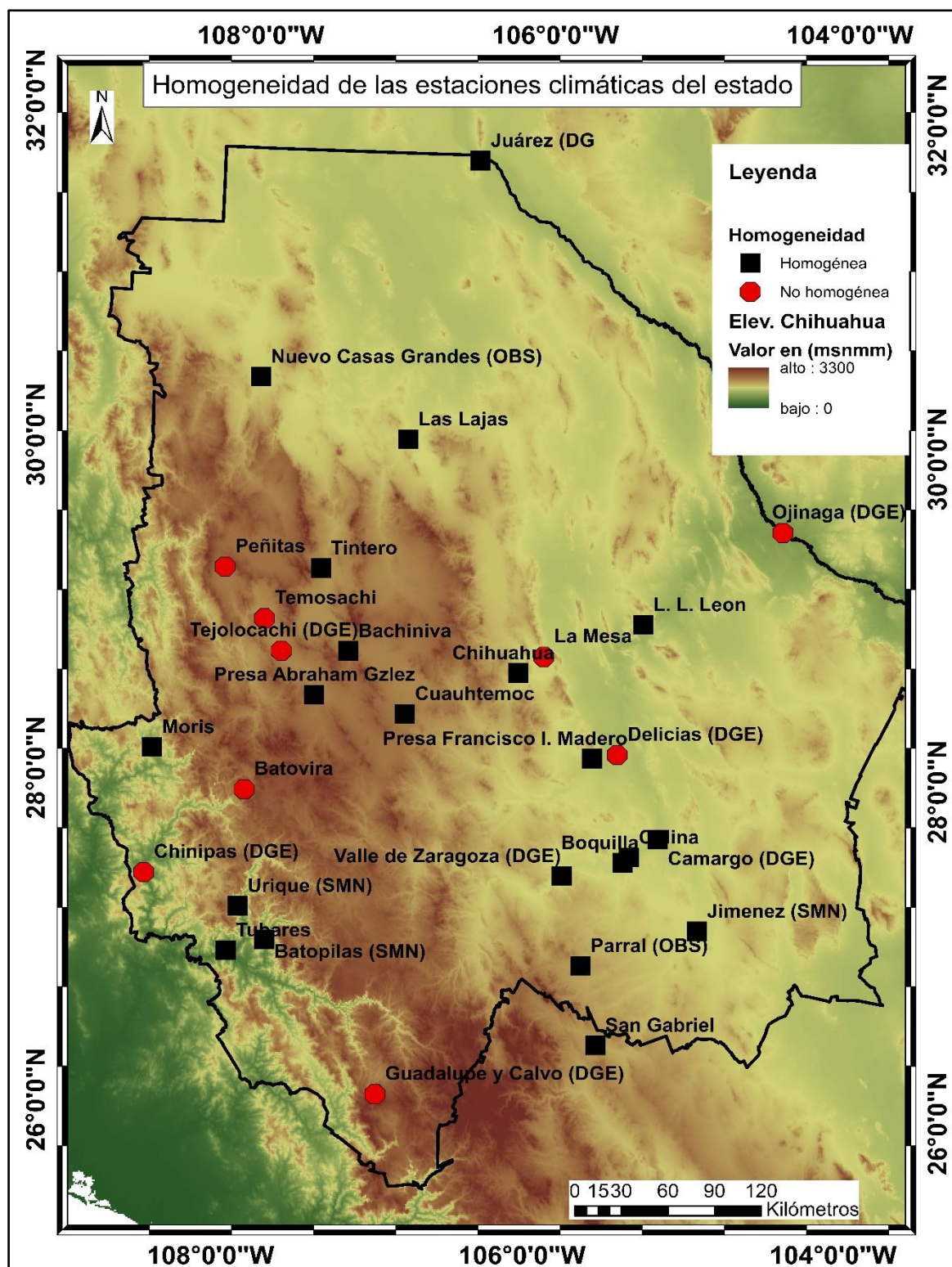


Figura 3.4 Distribución espacial de los resultados de las pruebas de Homogeneidad a las 30 estaciones, se resalta en círculos rojos las 9 estaciones no Homogéneas.



A modo de resumen los resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las 30 estaciones se pueden observar en la Tabla 3.6 y en la Figura 3.4. Se representa con (H) las series homogéneas y con (NH) las no homogéneas. También se puede identificar el año de cambio señalado en el primer periodo resaltado con color negro. Este valor resultará como punto de división temporal-espacial en las series de precipitación para realizar las pruebas de estacionalidad. Se encontró que 9 series temporales resultaron ser no homogéneas (Batovira, Chínipas DGE, Delicias DGE, Guadalupe y Calvo DGE, La Mesa, Ojinaga DGE, Peñitas, Temosachic y Tejolocachi DGE).

3.5 Pruebas de tendencia y persistencia

Conforme se estableció en el apartado 2.6, y según el diagrama de flujo de la investigación, dado que todas las series se ajustan a una distribución normal, se justifica aplicar pruebas paramétricas. Por lo tanto, a todas las estaciones se le aplicara la prueba de Anderson. Las Tabla 3.7 y Tabla 3.8 muestran los resultados obtenidos, y la Figura 3.5 y Figura 3.6 muestran los cuatro tipos de comportamientos de la tendencia y la distribución geográfica respectivamente.

Tabla 3.7 Comportamiento y clasificación de la tendencia para las series temporales de precipitación.

Comportamiento	No. de estaciones	Significado según la línea de tendencia para el periodo de estudio (1960-2022)
Casi imperceptible	3	Pendiente prácticamente recta con mínima inclinación al alza
Leve a la baja	12	Disminución de la precipitación en el rango de los 5-40 mm
A la baja (no significativamente decreciente)	9	Disminución de la precipitación en el rango de los 50-100 mm
Muy baja (significativamente decreciente)	6	Disminución de la precipitación en más de 100 mm

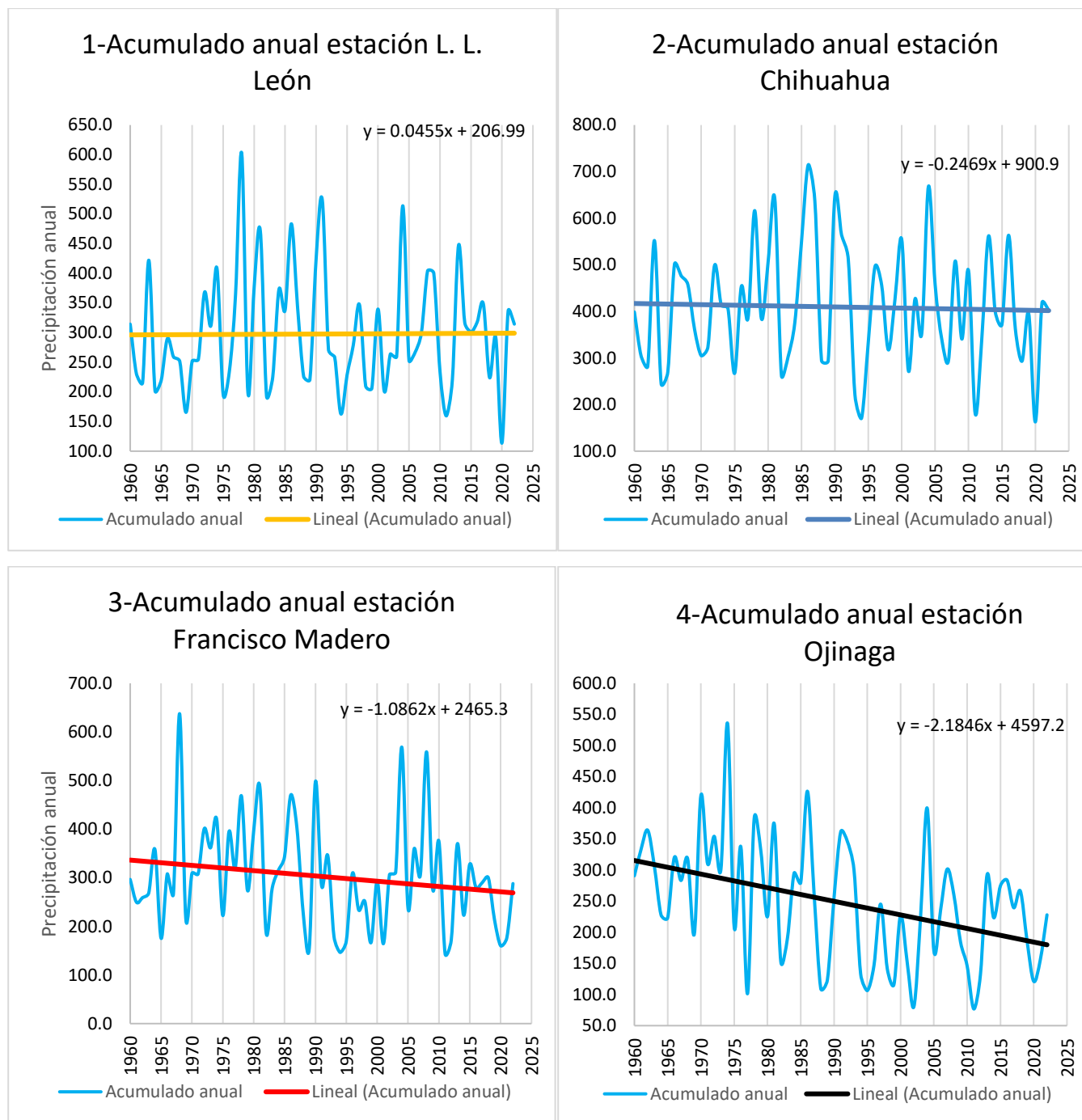


Figura 3.5 Tendencia de las precipitaciones, según su comportamiento: 1, casi imperceptible con mínima inclinación al alza; 2, leve a la baja; 3, a la baja o tendencia no significativamente decreciente y 4, muy baja o significativamente decreciente.



Tabla 3.8 Resultados de las pruebas de tendencia y persistencia aplicadas a los valores de precipitación anual de las estaciones climatológicas

No.	Estaciones	Homogeneidad	Prueba paramétrica	Tendencia
			Anderson	
1	Abraham González	H	No Persistente	Casi imperceptible
2	Bachíniva	H	No Persistente	Casi imperceptible
3	Batopilas (SMN)	H	No Persistente	A la baja
4	Batovira	NH	Persistente	Muy baja
5	Camargo DGE)	H	No Persistente	Leve a la baja
6	Cd. Juárez (DGE)	H	No Persistente	Leve a la baja
7	Chihuahua	H	No Persistente	Leve a la baja
8	Chínipas (DGE)	NH	Persistente	Muy baja
9	Colina	H	No Persistente	Leve a la baja
10	Cuauhtemoc	H	No Persistente	A la baja
11	Delicias (DGE)	NH	No Persistente	A la baja
12	Francisco I. Madero	H	No Persistente	A la baja
13	Guadalupe y Calvo (DGE)	NH	Persistente	Muy baja
14	Jiménez (SMN)	H	No Persistente	Leve a la baja
15	L. L. León	H	No Persistente	Leve a la baja
16	La Boquilla	H	No Persistente	Leve a la baja
17	La Mesa	NH	No Persistente	A la baja
18	Las Lajas	H	No Persistente	Leve a la baja
19	Moris	H	No Persistente	Leve a la baja
20	Nuevo Casas Grandes (OBS)	H	No Persistente	Casi imperceptible
21	Ojinaga (DGE)	NH	Persistente	Muy baja
22	Parral (OBS)	H	No Persistente	Leve a la baja
23	Peñitas	NH	Persistente	A la baja
24	San Gabriel	H	No Persistente	A la baja
25	Tejolocachi (DGE)	NH	No Persistente	Muy baja
26	Temosachic	NH	Persistente	Muy baja
27	Tintero	H	No Persistente	A la baja
28	Tubares	H	No Persistente	Leve a la baja
29	Urique (SMN)	H	No Persistente	Leve a la baja
30	Valle de Zaragoza (DGE)	H	No Persistente	A la baja

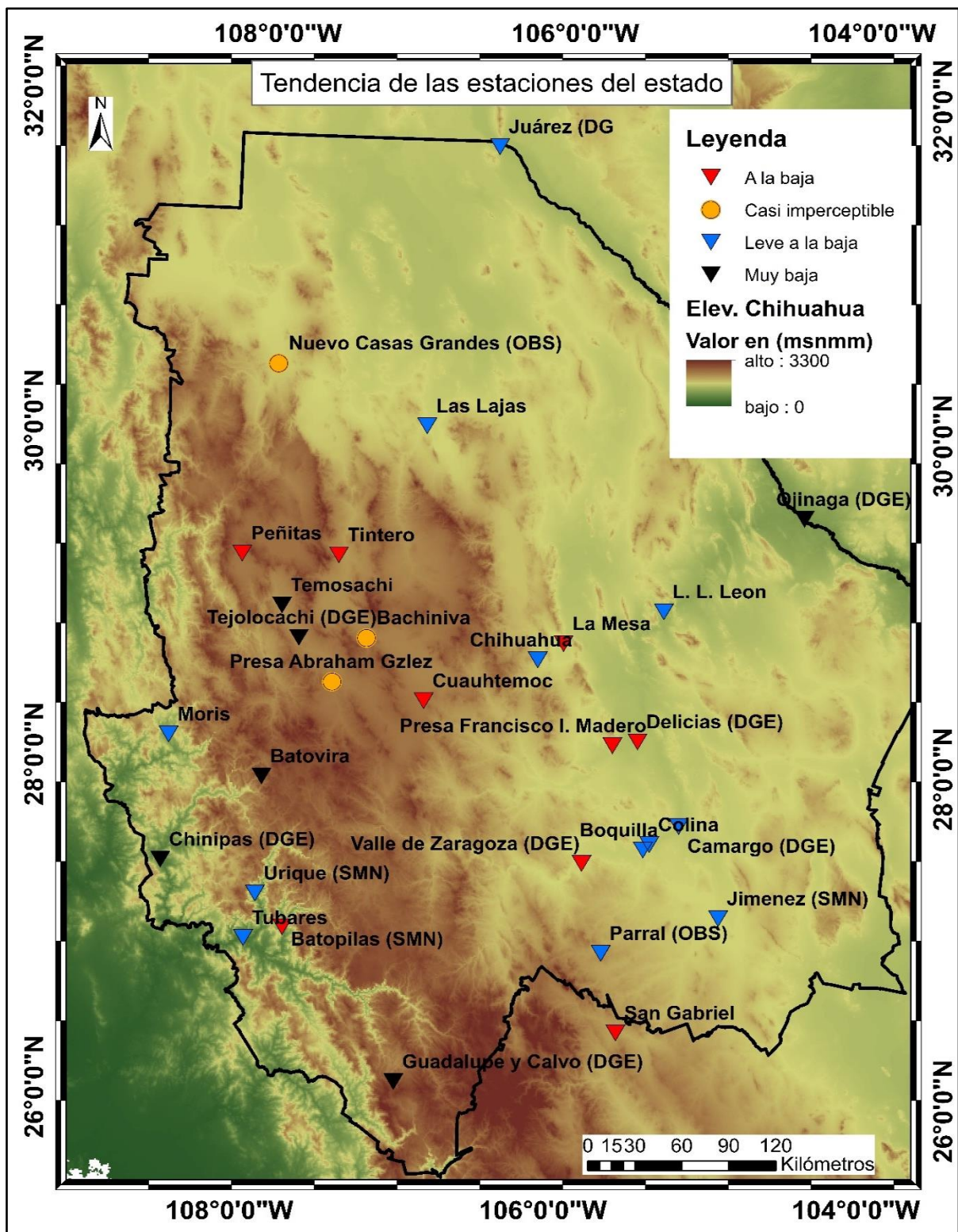


Figura 3.6 Distribución geográfica de la tendencia de las series para todo el periodo de estudio comprendido desde 1960-2022.



3.6 Pruebas de estacionalidad

Como se comentó en el apartado 2.7, la metodología que se utilizó en esta investigación es la propuesta por Fisher (1993) y que está documentada también en Dingman (2015), comúnmente llamada como coeficiente de estacionalidad de Markham. En donde se calculan dos coeficientes, S y C : el tiempo promedio de ocurrencia Φ_m , que determina la fecha probable de ocurrencia de la precipitación según la Tabla 2.6, y el índice de estacionalidad adimensional I_s , que varía desde 0 (todos los meses con la misma precipitación) hasta 1 (toda la precipitación ocurre en un único mes).

Para una mejor comprensión, supongamos que se obtiene un promedio de ocurrencia Φ_m con un valor de 220 grados, teniendo en cuenta para su cálculo los valores de seno y coseno de mediados de mes; además, el índice de estacionalidad $I_s = 0.6$. A partir de estos valores se puede inferir que la lluvia promedio ocurre aproximadamente a mediados del mes de agosto, y que la dispersión de la misma ocurre en 5 meses aproximadamente alrededor de la fecha, es decir, se puede ubicar el periodo de lluvias desde junio a octubre con la mayor probabilidad en agosto. La Tabla 3.9 evidencia lo dicho anteriormente.

Tabla 3.9 Relación entre el Índice de estacionalidad I_s con los meses del año.

%	100	92	83	75	67	58	50	42	33	25	17	8
meses	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
I_s	0	0.09	0.18	0.27	0.36	0.45	0.55	0.64	0.73	0.82	0.91	1.00

Cuando se aplicaron las pruebas de Homogeneidad, se determinó para cada serie anual, el año de cambio o punto de división temporal-espacial, que divide la serie en dos periodos con diferentes características como: la media, la tendencia y la evolución del promedio. A cada uno de estos periodos dentro de la misma serie se le aplicaron las pruebas de estacionalidad. La evidencia de que se desplace o no el periodo de lluvia y, en qué proporción ocurre, depende de los coeficientes I_s y Φ_m . En el caso de la estación Presa Francisco Madero como muestra la Figura 3.2 los periodos en los que se dividió la serie fueron desde 1960-1993 y 1994-2022. Se obtuvieron los



promedios mensuales para cada uno de esos periodos y con esos valores se efectuaron las pruebas de estacionalidad como se muestra en la Tabla 3.10. La Figura 3.7 muestra los promedios acumulados por meses para cada periodo.

Tabla 3.10 Resultados de pruebas de estacionalidad a la estación Francisco I. Madero

1er periodo 1960-1993 (34 años)			
Meses	Pm (mm)	S _i	C _i
Enero	8.4	2.293	8.114
Febrero	4.5	3.158	3.172
Marzo	2.8	2.677	0.769
Abril	8.0	7.794	-1.951
Mayo	10.8	7.761	-7.531
Junio	31.9	8.674	-30.694
Julio	74.2	-18.336	-71.929
Agosto	76.6	-54.016	-54.249
Septiembre	69.0	-66.633	-17.905
Octubre	23.5	-22.706	6.101
Noviembre	6.7	-4.739	4.760
Diciembre	9.7	-2.479	9.386
Total	326.161	-136.55	-151.956

2do periodo 1994-2022 (29 años)			
Meses	Pm (mm)	S _i	C _i
Enero	5.8	1.573	5.567
Febrero	3.5	2.454	2.464
Marzo	3.4	3.267	0.938
Abril	2.7	2.610	-0.653
Mayo	8.2	5.920	-5.744
Junio	24.8	6.745	-23.868
Julio	71.0	-17.527	-68.754
Agosto	66.9	-47.213	-47.417
Septiembre	47.5	-45.850	-12.320
Octubre	25.1	-24.231	6.511
Noviembre	12.1	-8.541	8.578
Diciembre	5.1	-1.296	4.909
Total	276.026	-122.089	-129.791

Parámetros	1960-1993	1994-2022
S=	-136.55	-122.09
C=	-151.96	-129.79
PR=	204.30	178.19
Φm=	221.94	223.25
Is=	0.63	0.65

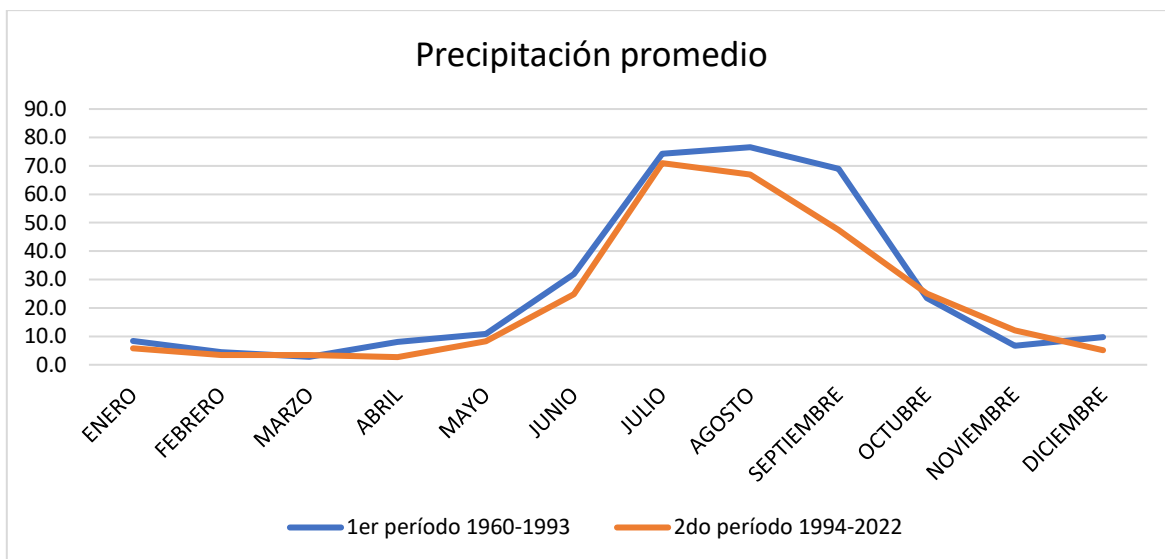


Figura 3.7 Distribución mensual de la precipitación promedio en la estación Francisco I. Madero para cada periodo de estudio

Se puede expresar que, a partir de estos resultados, hubo una reducción de las precipitaciones promedios de 50.14 mm, expresada de forma porcentual equivaldría al 15.37%. En cuanto al coeficiente de estacionalidad, este varió de 0.63 a 0.65, lo que indica que disminuye el tiempo en el que pueden ocurrir las precipitaciones o se reduce el periodo de lluvias, se acorta el periodo; por otra parte, disminuye el porciento de lluvia que cae en estiaje (diciembre- mayo) y aumenta el porciento de lluvia en los meses de octubre y noviembre. En cuanto al promedio de ocurrencia Φ_m , los valores cambiaron desde 221 días a 223 días, lo que indica que hay un pequeño desplazamiento hacia finales de agosto o que puede existir una tendencia hacia los meses más fríos.

Este análisis se efectuó a todas las estaciones, y los resultados detallados se muestran en las tablas Tabla 3.11 y Tabla 3.12



Tabla 3.11 Resultado de las pruebas de estacionalidad para las 30 estaciones.

Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	/s	Pm	P _R	Φm	/s			
Abraham González	2000	491.33	298.69	219.10	0.61	486.00	322.93	220.74	0.66	5.33	1.08%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.61 a 0.66), hay una reducción de la precipitación media anual del 1.08 % (5.33 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia de junio a octubre
Bachíniva	2017	453.39	290.76	220.54	0.64	435.65	296.92	222.45	0.68	17.74	3.91%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.64 a 0.68), hay una reducción de la precipitación media anual del 3.91 % (17.74 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Batopilas (SMN)	570	676.82	309.25	226.70	0.46	654.07	356.05	223.82	0.54	22.7	3.36%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa (0.45-0.54), hay una reducción de la precipitación media anual del 3.36 % (22.7 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Batovira	2160	879.00	340.52	226.79	0.39	666.81	299.98	220.15	0.45	212.2	24.14%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa (0.39-0.45), hay una reducción de la precipitación media anual del 24.14 % (212.2 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (Jun-sep), aumenta % de lluvia en noviembre
Camargo (DGE)	1250	362.67	226.31	219.34	0.62	322.28	196.49	221.13	0.61	40.4	11.14%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que decrece (0.62 a 0.61), hay una reducción de la precipitación media anual del 11.14 % (40.4 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-ago), aumenta % de lluvia en noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Cd. Juárez (DGE)	1135	256.66	108.21	234.70	0.42	241.10	103.60	230.03	0.43	15.6	6.06%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), sin incremento (0.42-0.42), hay una reducción de la precipitación media anual del 6.06 % (15.6 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en noviembre
Chihuahua	1428	418.87	259.38	219.13	0.62	399.65	260.14	220.49	0.65	19.22	4.59%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.62 a 0.65), hay una reducción de la precipitación media anual del 4.59% (19.22 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), disminuye lluvia % de lluvia en junio aumenta % de lluvia en octubre y noviembre.
Chínipas (DGE)	440	922.53	518.15	223.46	0.56	710.29	436.36	220.90	0.61	212.2	23.01%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.56 a 0.61), hay una reducción de la precipitación media anual del 23.01% (212.2 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre.



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Colina	1214	348.33	218.89	221.08	0.63	341.61	225.12	218.62	0.66	6.7	1.93%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.63 a 0.66), hay una reducción de la precipitación media anual del 1.93 % (6.7 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-ago), aumenta % de lluvia en noviembre
Cuauhtemoc	1935	473.17	307.13	219.68	0.65	431.33	300.15	219.46	0.70	41.83	8.84%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.65 a 0.70), hay una reducción de la precipitación media anual del 8.84 % (41.83 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en junio y noviembre
Delicias (DGE)	1173	317.34	187.77	221.52	0.59	251.89	155.59	220.70	0.62	65.45	20.62%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.59 a 0.62), hay una reducción de la precipitación media anual del 20.62% (65.45 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en junio, octubre y noviembre
Francisco I. Madero	1242	326.16	204.30	221.94	0.63	276.03	178.19	223.25	0.65	50.14	15.37%	Alto grado de estacionalidad (Agosto) que se incrementa



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
												ligeramente (0.63 a 0.65), hay una reducción de la precipitación media anual del 15.37% (50.14 mm). Disminuye el % de lluvia que cae estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), disminuye lluvia % de lluvia en junio aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Guadalupe y Calvo (DGE)	2316	1160.60	553.75	224.61	0.48	822.60	433.74	213.88	0.53	338.0	29.12%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa (0.48-0.53), hay una reducción de la precipitación media anual del 29.12 % (338 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep)
Jiménez (SMN)	1370	358.66	225.71	216.10	0.63	335.02	209.52	218.56	0.63	23.6	6.59%	Alto grado de estacionalidad (agosto) sin incremento (0.63 a 0.63), hay una reducción de la precipitación media anual del 6.59 % (23.6 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
L. L. León	1080	310.94	192.92	220.10	0.62	290.43	161.41	221.94	0.56	20.51	6.60%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que decrece (0.62-0.56), hay una reducción de la precipitación media anual del 6.6 % (20.51 mm). Aumenta el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), disminuye el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
La Boquilla	1323	318.20	199.51	219.53	0.63	304.01	201.90	218.54	0.66	14.2	4.46%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.63 a 0.66), hay una reducción de la precipitación media anual del 4.46 % (14.2 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-ago), aumenta % de lluvia en noviembre
La Mesa	1173	383.10	235.84	219.60	0.62	305.48	186.79	220.52	0.61	77.62	20.26%	Alto grado de estacionalidad (agosto) sin incremento (0.61 a 0.61), hay una reducción de la precipitación media anual del 20.26 % (77.62 mm). Se mantienen prácticamente iguales el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), y en temporada húmeda (Jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Las Lajas	1450	362.96	204.19	223.41	0.56	319.18	192.30	225.14	0.60	43.8	12.06%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.56 a 0.60), hay una reducción de la precipitación media anual del 12.06 % (43.8 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre
Moris	754	799.75	406.91	223.19	0.51	743.12	447.92	217.53	0.60	56.6	7.08%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.50 a 0.60), hay una reducción de la precipitación media anual del 7.08 % (56.6 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Nuevo Casas Grandes (OBS)	1468	340.14	179.81	225.09	0.53	327.42	178.30	225.56	0.54	12.7	3.74%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa ligeramente (0.52-0.54), hay una reducción de la precipitación media anual del 3.74 % (12.7 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Ojinaga (DGE)	800	291.62	142.91	218.06	0.49	199.67	82.83	226.26	0.41	91.9	31.53%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que decrece (0.49-0.42), hay una reducción de la precipitación media anual del 31.53 % (91.9 mm). Aumenta el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), disminuye el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Parral (OBS)	1720	523.40	366.77	218.93	0.70	473.64	310.65	219.07	0.66	49.8	9.51%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que decrece (0.70 a 0.66), hay una reducción de la precipitación media anual del 9.51 % (49.8 mm). Aumenta el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), disminuye el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Peñitas	2135	595.79	248.18	224.23	0.42	550.58	272.27	221.61	0.49	45.2	7.59%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa ligeramente (0.42-0.5), hay una reducción de la precipitación media anual del 7.59 % (45.2 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (Jun-oct)



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
San Gabriel	1750	509.67	332.22	220.72	0.65	457.55	322.50	220.19	0.70	52.1	10.23%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.65 a 0.70), hay una reducción de la precipitación media anual del 10.23 % (52.1 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre
Tejolocachi (DGE)	1920	571.13	303.45	229.05	0.53	438.58	278.24	219.41	0.63	132.6	23.21%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.53 a 0.63), hay una reducción de la precipitación media anual del 23.21 % (132.6 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre
Temosachic	1932	518.10	270.80	224.10	0.52	432.12	261.45	219.88	0.61	86.0	16.60%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.52 a 0.60), hay una reducción de la precipitación media anual del 16.60 % (86 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (Jun-sep)



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Tintero	2450	361.80	207.35	224.45	0.57	343.63	217.34	219.91	0.63	18.2	5.02%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.57 a 0.63), hay una reducción de la precipitación media anual del 5.02 % (18.2 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (Jun-sep)
Tubares	300	844.81	410.90	226.11	0.49	669.19	374.46	220.35	0.56	175.6	20.79%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa (0.45-0.54), hay una reducción de la precipitación media anual del 20.79 % (175.6 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (Jun-sep)
Urique (SMN)	763	773.55	396.21	223.39	0.51	748.55	441.50	219.99	0.56	25.0	3.23%	Bajo grado de estacionalidad (agosto), que se incrementa (0.51-0.56), hay una reducción de la precipitación media anual del 3.23 % (25 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre



Estación	Elevación	Periodo 1				Periodo 2				Red (mm)	% reducción	Observaciones
		Pm	P _R	Φm	Is	Pm	P _R	Φm	Is			
Valle de Zaragoza (DGE)	1340	456.23	300.22	219.60	0.66	405.96	272.23	216.76	0.67	50.3	11.02%	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa (0.66 a 0.67), hay una reducción de la precipitación media anual del 11.2 % (50.3 mm). Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (Dic-Mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (jun-sep), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre.

Tabla 3.12 Resumen de las estaciones que presentan indicios de un desplazamiento del periodo de lluvias hacia los meses más fríos (octubre-noviembre)

Estación	Desplazamiento (días)	Observaciones	
Abraham González	1	Alto grado de estacionalidad (agosto) que se incrementa en el intervalo de (0.61 a 0.66), hay una reducción de la precipitación media anual del 1.08 % al 20.26%	Disminuye el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), aumenta el % de lluvia en temporada húmeda (junio-septiembre), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre.
Bachíniva	2		
Camargo (DGE)	2		
Chihuahua	1		
Francisco I. Madero	2		
Jiménez (SMN)	2		
La Mesa	1		



Estación	Desplazamiento (días)	Observaciones	
Las Lajas	2	Bajo grado de estacionalidad (Agosto), que decrece en el intervalo de (0.62-0.42), hay una reducción de la precipitación media anual del 6.6 % al 31.53%	
Parral (OBS)	1		
L. L. León	1		
Ojinaga (DGE)	8		Aumenta el % de lluvia que cae en estiaje (dic-mayo), disminuye el % de lluvia en temporada húmeda (junio-septiembre), aumenta % de lluvia en octubre y noviembre

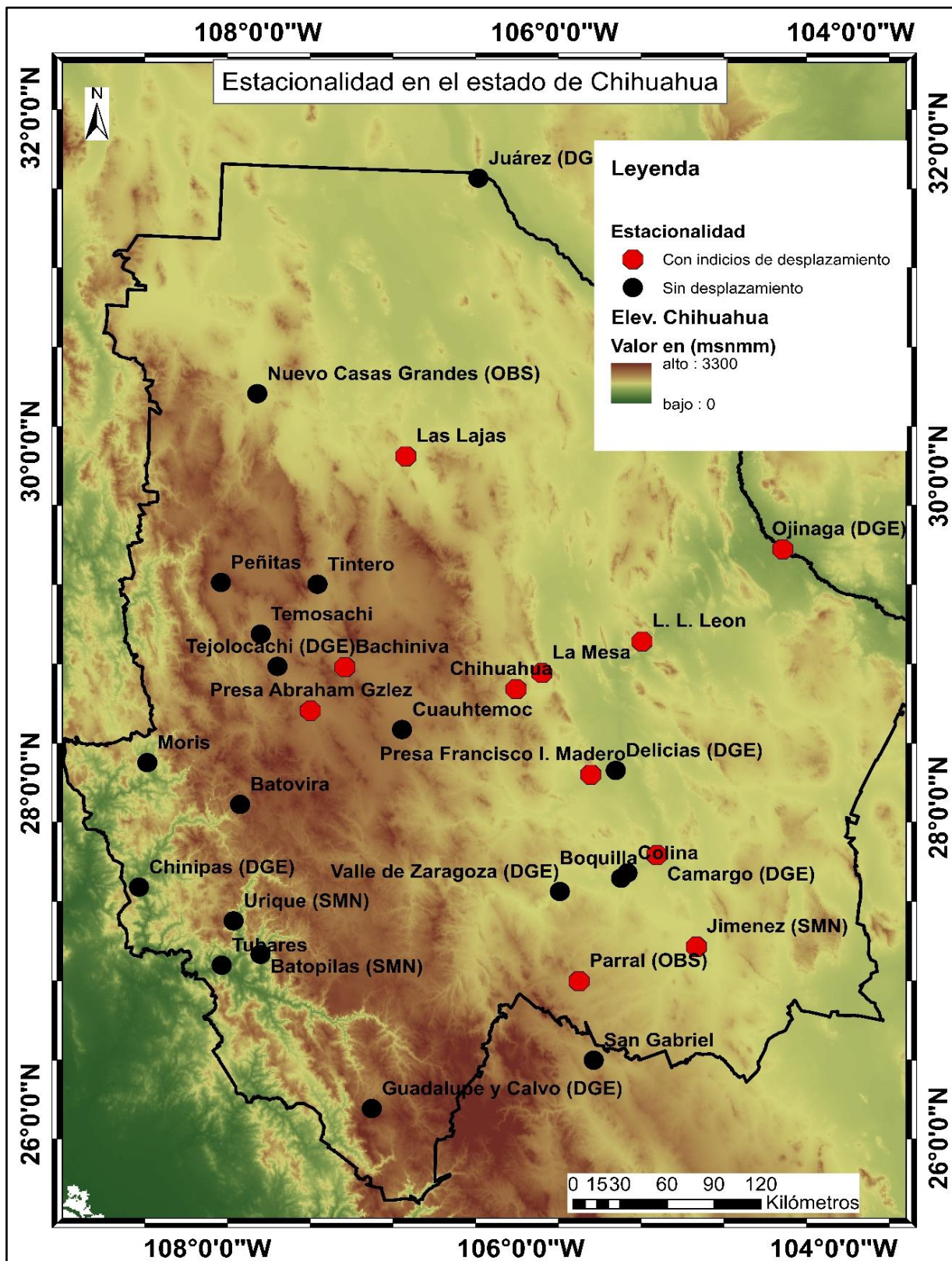


Figura 3.8 Representación geográfica de los resultados de las pruebas de estacionalidad, se muestran en círculos rojos las 11 estaciones con indicios de desplazamiento estacional.



4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados aportan evidencia a la hipótesis del desplazamiento de las lluvias hacia el otoño. En este capítulo se retoman los resultados obtenidos, con la finalidad de analizar con mayor detalle sus implicaciones y hasta las limitaciones de estos.

4.1 Resumen y análisis de las pruebas estadísticas efectuadas para cada serie

- En base a las pruebas de normalidad, los datos del 100% de las estaciones analizadas se aproxima al comportamiento de la distribución normal. lo que indica que están distribuidos de manera que forman una curva de campana simétrica alrededor de la media. Esta característica permite aplicar diversas técnicas estadísticas para el análisis y la inferencia de pruebas de hipótesis y muy importante, el completamiento de datos con regresiones.
- Debido a que todas las series se ajustan a la distribución normal, se aplicaron pruebas paramétricas para determinar la homogeneidad, en este caso las de Cramer y t de Student. El 30% (9 series) de las estaciones resultaron tener un comportamiento no homogéneo (Batovira, Chínipas DGE, Delicias DGE, Guadalupe y Calvo DGE, La Mesa, Ojinaga DGE, Peñitas, Temosachic y Tejolocachi DGE). Como se explicó en el apartado 3.4 estas pruebas buscan determinar se la serie climatológica proviene de una población uniforme o si la homogeneidad ha sido perturbada por cambios físicos en el entorno o, incluso, por señales emergentes de cambio climático. Resulta que estas 9 series poseen una tendencia muy baja o significativamente decreciente y son las que por ende reportan una mayor disminución en las precipitaciones anuales. La estación Peñitas, localizada en la parte norte de la sierra, presenta una reducción media anual del orden de 45 mm, que representa un 7.6 % del total. En la estación de Guadalupe y Calvo, localizada al sur del estado de Chihuahua, también en la sierra, la reducción aproximada es de 340 mm, representando el 29.12 % de la precipitación anual.
- A partir de la aplicación de las pruebas de homogeneidad, se detectaron los años en los que la serie se dividía en dos periodos. La Figura 4.1 muestra los

resultados. Como se observa, los años que más se repiten son el 1993 y el 1994 con un total de 8 y 9 estaciones respectivamente, para un 56.6 % entre ambos, seguido del año 1992 con 5 estaciones, representando el 16.6 %.

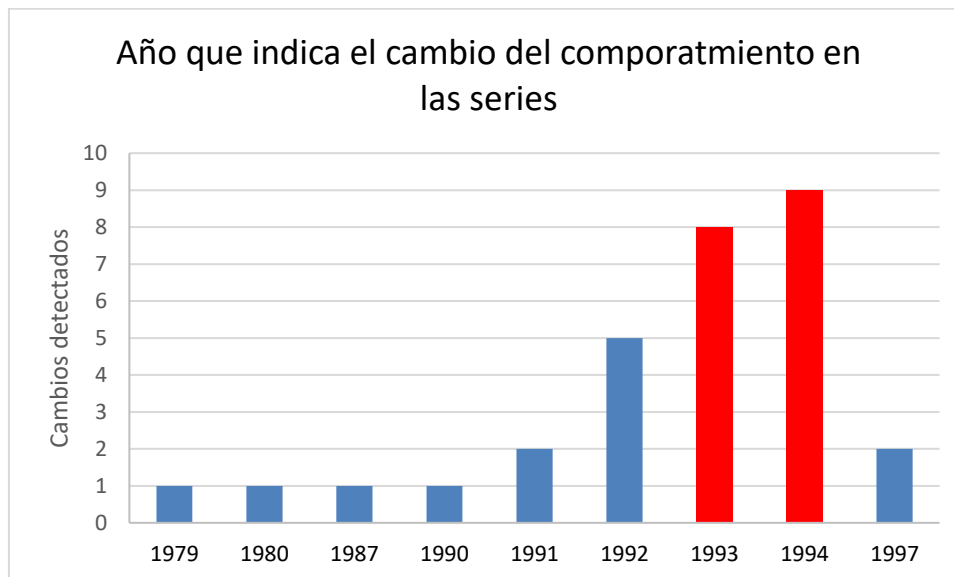


Figura 4.1 Agrupación de los años en los que se detectaron cambios en el comportamiento de la media, la evolución y el promedio móvil de las series.

- Respecto a las pruebas de tendencia y persistencia se puede expresar que, de las 30 estaciones, el 90 % presenta una tendencia decreciente que va desde los 5 mm hasta más de 100 mm. El 10 % restante (3 estaciones) prácticamente no tiene tendencia o es casi imperceptible, pero con una pequeña inclinación al alza (Tabla 4.1). Respecto a las pruebas de persistencia, la prueba paramétrica de Anderson, el 20 % (6 estaciones) resultaron en un comportamiento persistente, coincidiendo en su mayoría con las estaciones que presentan tendencia muy baja o significativamente decreciente, y el resto, 80 % (24 estaciones) sin persistencia. Este hecho indica que los valores de las series no muestran una tendencia a mantenerse en un nivel o dirección durante un periodo prolongado. En otras palabras, los cambios en los valores de la serie no tienen una memoria a largo plazo, y las fluctuaciones tienden a ser aleatorias y de momento, no se observa un patrón predecible o duradero.



Tabla 4.1 Interpretación de las pruebas de tendencia efectuada a cada serie.

Estaciones	Cantidad	Tendencia	
Abraham González, Bachíniva, Nuevo Casas Grandes (OBS)	3	Casi imperceptible	Pendiente prácticamente recta con mínima inclinación al alza
Camargo DGE), Cd. Juárez, Chihuahua, Colina, Jiménez (SMN), L. L. León, La Boquilla, Las Lajas, Moris, Parral, Tubares y Urique	12	Leve a la baja	Disminución de la precipitación en el rango de los 5-40 mm
Batopilas (SMN), Cuauhtemoc, Delicias (DGE), Francisco I. Madero, La Mesa, Peñitas, San Gabriel, Tintero y Valle de Zaragoza	9	A la baja	Disminución de la precipitación en el rango de los 50-100 mm
Batovira, Chínipas (DGE), Guadalupe y Calvo (DGE), Ojinaga (DGE), Tejolocachi (DGE) y Temosachic	6	Muy baja	Disminución de la precipitación en más de 100 mm

- En cuanto a los resultados obtenidos en las pruebas de estacionalidad, según la Tabla 3.12, de las 30 estaciones, 11 (36%) presentan un aumento en el tiempo promedio de ocurrencia Φ_m , dando indicios de que el periodo de precipitaciones se está comenzando a desplazar hacia los meses más fríos. Esto viene dado por el hecho de que, en esas estaciones, el porcentaje de lluvia en los meses de octubre y noviembre aumenta, y disminuye en junio. El resto de las estaciones, que sería el 63.4 %, expresan un comportamiento contrario al anterior, el tiempo promedio de ocurrencia Φ_m disminuye, lo que indica que las lluvias comienzan adelantadas o mejor dicho, que la concentración del periodo lluvioso se ubica finales de julio o en los primeros días de agosto.
- Respecto al índice de estacionalidad I_s , 27 estaciones, representando el 90 %, presentan un acortamiento del periodo de lluvias, solo 3 estaciones (10 %) que son: L. L. León, La Mesa y Ojinaga, evidencian un aumento del mismo periodo. Al analizar la información, se observó que en estas estaciones aumenta el porcentaje de lluvia que cae durante el estiaje (diciembre-mayo) y disminuye el porcentaje de lluvia en temporada húmeda (junio-septiembre), por lo que la diferencia entre los porcentajes de lluvias por mes se acorta. La prueba de estacionalidad indica que llueve en más meses del año. *No está lloviendo más,*



lo que ocurre es una redistribución del periodo de lluvias y un acortamiento notable del mismo, así como un incremento porcentual en los meses de octubre y noviembre.

- En el estado de Chihuahua se observan dos condiciones simultáneas: por un lado, la disminución de la precipitación media anual y, por otro, un posible desplazamiento del periodo de lluvias. El traslape de los efectos hace que se enmascare el último, por lo que resulta difícil su interpretación. A lo anterior, se le adiciona que los datos de precipitación disponible para esta investigación son los acumulados mensuales, por lo que es posible que con los datos diarios pudiera hacerse un análisis del posible desplazamiento de forma más detallada.

4.2 Impacto de los resultados

Dado lo errático de los temporales lluviosos, ya de por sí la agricultura de temporal en Chihuahua tiene una tendencia a la baja, tanto en superficie sembrada como en el valor de la producción. En 2010, la agricultura de temporal cubría el 55,7% de la superficie sembrada, pero para 2019 esa proporción había disminuido a 42,9%, es decir, aproximadamente 12 puntos porcentuales menos (Quintana & Solís, 2023). La brecha se amplió aún más en 2019, ya que la producción de la agricultura de temporal representó únicamente el 6% del total, mientras que la agricultura de riego alcanzó cerca del 94%, superando en más de 15 veces a la agricultura de temporal.

Este hecho evidencia dos puntos fundamentales: el primero, se pone en riesgo la soberanía y la seguridad alimentaria del estado, precisamente porque los cultivos que se desarrollan en la modalidad de riego son conocidos por ser altamente comerciales y no para producir alimentos básicos como el maíz amarillo, alfalfa, chile verde y frijol. En segundo lugar, la excesiva sobreexplotación de los acuíferos, lo que implica la disminución del caudal de ríos, arroyos y el cegamiento de manantiales. En la sierra, principal zona provisor de agua a Chihuahua, todo esto genera un círculo vicioso de menor volumen de lluvia o de nieve, mayor sequedad y calor, y menos agua en los ecosistemas. Estos cambios ponen en grave riesgo no solo la sustentabilidad de los



sistemas productivos, sino también los ecosistemas y la misma supervivencia de las generaciones futuras.

Existen siete ecorregiones en el estado de Chihuahua (Quintana & Solís, 2023), cada una con características propias en cuanto a clima, hidrología, recursos naturales. En este caso, se compararán en cuanto a tres cultivos de temporal: avena forrajera, maíz y frijol, con el objetivo de identificar, en conjunto con las estaciones que presentan indicios de desplazamiento del periodo de lluvias, las zonas más propensas a estos impactos y en las que se deberá de tomar medidas de adaptación para proteger el desarrollo de la agricultura de temporal.

De estas siete zonas, se puede resumir que hay cuatro que combinan la agricultura de temporal y la de riego, como son: Lomeríos del Sur, Llanos del Centro, Noroeste y Babícora. Solo una practica puramente la agricultura de temporal para el autoconsumo, que es la de Sierra Tarahumara, y las restantes dos ecorregiones, Desiertos y Conchos practican la agricultura de riego. La Figura 4.2 y la Tabla 4.2 muestran la ubicación y división espacial de estas ecorregiones, así como las estaciones que presentan indicios de desplazamiento estacional, representadas en color rojo y las características en cuanto a agricultura que cada una presenta respectivamente.

Tabla 4.2 Resumen de ecorregiones del estado de Chihuahua y el tipo de agricultura que fomentan.

Elaboración propia a partir de la información encontrada en Análisis de los diferentes tipos de agricultura para la conceptualización de una nueva ruralidad en el norte de México: el caso de Chihuahua.

No.	Ecorregión	Descripción
01	Desiertos	Distritos de riego
02	Conchos	Distritos de riego (agua superficial en mayoría)
03	Lomeríos del Sur	Combinación de agricultura de riego y temporal. En riego (alfalfa, maíz y nuez), y en temporal (avena forrajera, maíz y sorgo forrajero)
04	Llanos del Centro	Combinación de agricultura de riego y temporal. En riego (alfalfa, algodón y nuez), y en temporal (avena forrajera, frijol y sorgo forrajero)
05	Noroeste	Combinación de agricultura de riego y temporal. En riego (maíz amarillo y manzana a gran escala), y en temporal (avena forrajera, maíz, frijol y sorgo forrajero)
06	Babícora	Combinación de agricultura de riego y temporal. En riego (maíz amarillo y manzana), y en temporal (avena forrajera, maíz, frijol)



07	Sierra Tarahumara	Agricultura de autoconsumo de temporal (maíz y frijol intercalada con calabaza y la avena forrajera)
----	----------------------	--

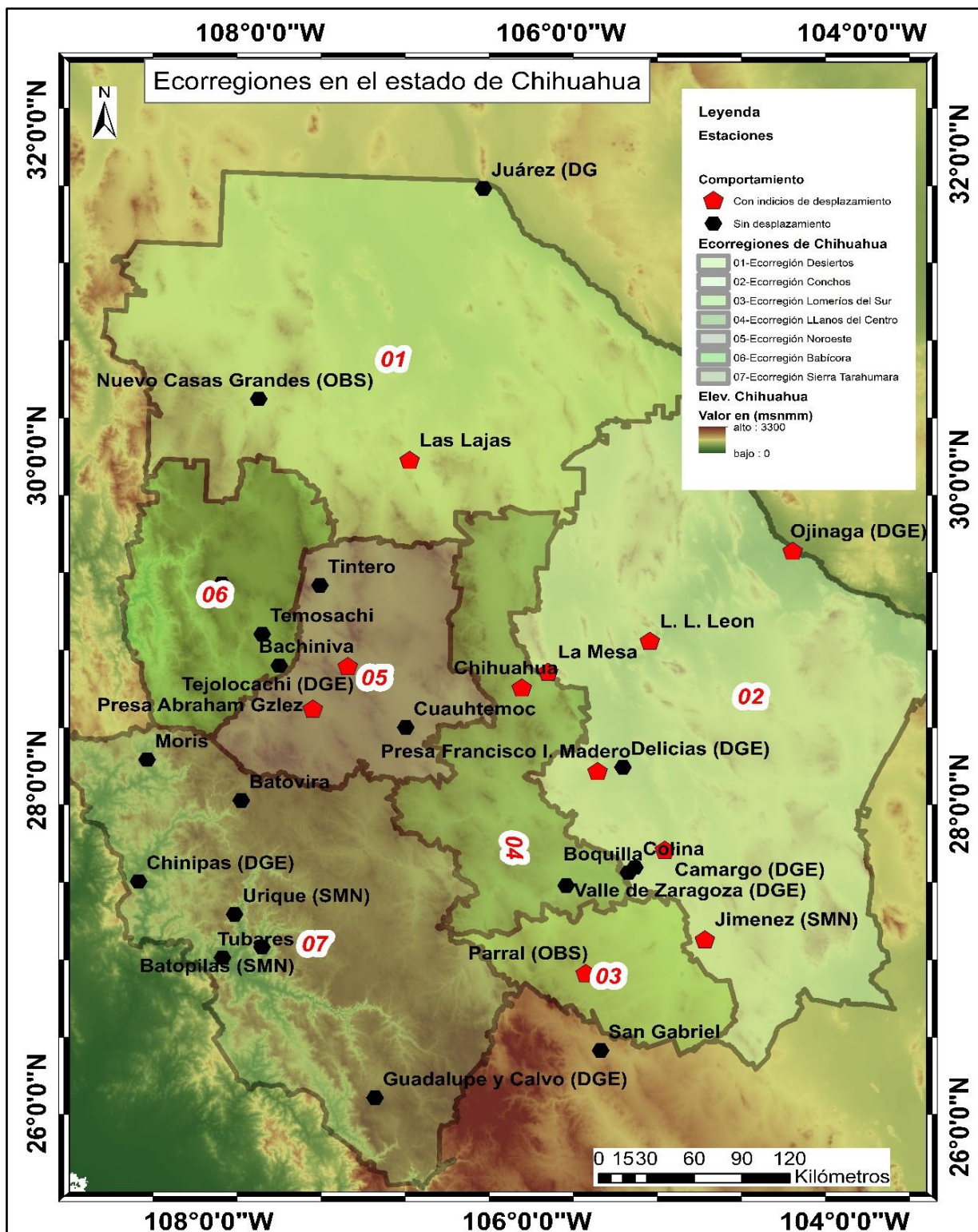


Figura 4.2 Ecorregiones en el estado de Chihuahua según (Quintana & Solís, 2023). En rojo se muestran las estaciones que presentan indicios de desplazamiento en el periodo de lluvias.



Como se muestra en la Figura 4.2 la región que podría tener mayores afectaciones es la 2 (Conchos) con un total de 6 estaciones. Sin embargo, esta zona práctica una agricultura de riego, utilizando fuentes superficiales y subterráneas. La ecorregión 1 (Desiertos), considerada como la zona más árida, también presenta la estación de Las Lajas con afectación, pero dado lo escaso de las lluvias, la agricultura de temporal es prácticamente imposible. Las demás regiones, excepto la 6 (Babícora) y la 7 (Sierra Tarahumara), que aparentemente no cuentan con ninguna estación con desplazamiento, presentan un mayor riesgo de siniestralidad en las cosechas.

A pesar de que actualmente la zona 7 no presenta inicios de desplazamiento, las siete estaciones meteorológicas que se encuentran en el área presentan una fuerte tendencia a la baja y una amplia reducción del periodo de lluvias, así como un ligero incremento de la lluvia en los meses de octubre y noviembre como es el caso de Urique, Moris, Chínipas y Batopilas. Además, esta zona en particular no cuenta con sistemas tecnificados de riego y produce solamente bajo temporal y totalmente para abastecerse.

En el caso del maíz, según la Agenda técnica agrícola de Chihuahua (SAGARPA, 2015) la fecha de siembra bajo temporal suele ser desde el inicio de junio, a mediados de julio para la zona de Delicias. Si recordamos que esta estación no presentó indicios de desplazamiento, pero las estaciones cercanas sí, como la de Francisco I. Madero, la cual se ubica a menos de 20 Km de esta. Quizás sería prudente desplazar la fecha a mediados y finales de julio; el cultivo de maíz forrajero ofrece a los productores una solución para proporcionar alimento al ganado bovino durante la temporada de estiaje, que puede durar hasta 180 días al año. La técnica de ensilaje se presenta como la opción más económica y eficiente para almacenar y conservar el forraje, un alimento nutritivo que los animales aceptan fácilmente.

En el caso del frijol, según las variedades, tiene una fecha óptima de siembra que abarca desde el 15 de junio hasta el 10 de julio, para las zonas de Guerrero, Cuauhtémoc, Chihuahua y Cusihuiriachi. También se recomienda lo mismo, sembrar a mediados o finales de julio. La avena forrajera es vital en diversas formas, ya sea como forraje verde, ensilado, henificado o para la producción de grano. Este cultivo proporciona una rica combinación de fibra soluble, proteínas, ácidos grasos



insaturados, vitaminas, minerales y fitoquímicos, que pueden ayudar a prevenir múltiples enfermedades (Bustillos et al., 2017). Para el cultivo, se recomienda utilizar la variedad del ciclo precoz del 15 al 31 de julio como dice la agenda tecnológica.

A todo lo anterior se le suman las siguientes recomendaciones: introducir la variedad que sea más tolerante a la sequía o que tengan ciclos de crecimiento más cortos, adaptándose así a la temporada de lluvias; implementar sistemas de riego que complementen solamente la falta de lluvias naturales y no toda la demanda del cultivo; e introducir prácticas de labranza mínima y el uso de coberturas vegetales para mejorar la retención de agua en el suelo. Así mismo, es fundamental invertir en programas que eduquen a los agricultores sobre nuevas técnicas y tecnologías para adaptarse al cambio climático.

Esta investigación se centra en el impacto en el sector agrícola, fundamentalmente en la agricultura de temporal. Sin embargo, es un hecho que la disminución de las precipitaciones, el acortamiento del periodo húmedo y hasta su desplazamiento conllevan a una cadena de afectaciones en todos los sectores, empezando por la afectación de servicios ecosistémicos principales como la polinización y el control de plagas, la recarga de los acuíferos. Además, con el aumento de las lluvias durante el otoño (cuando la vegetación esta menos desarrollada), la erosión (pérdida de suelo) también puede aumentar. Esto tiene consecuencias en el aumento del riesgo de inundaciones y colmatación de pequeños arroyos.

Con esta tesis se pretende hacer reflexionar y enfatizar la urgencia de adoptar estrategias de adaptación efectivas. Es imperativo que tanto los responsables de políticas como los agricultores y las comunidades adopten un enfoque integrado y colaborativo para enfrentar estos desafíos. Solo mediante una acción concertada y basada en evidencia se podrá mitigar los efectos adversos del cambio climático y promover un desarrollo agrícola sostenible que garantice la resiliencia económica, social y ecológica en el futuro.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se expresa de forma clara y resumida los descubrimientos obtenidos en la investigación, las implicaciones de ellos y algunas recomendaciones.

5.1 Conclusiones

La información sobre los registros de precipitación diaria y mensual de las estaciones meteorológicas del estado fue obtenida directamente en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), utilizando como complemento los sitios en internet como: NOAA (2023); SMN (2023). De los 42 registros (39 estaciones con acumulados mensuales y 25 con valores diarios), 22 estaciones tenían en común ambas bases de datos. Luego de hacer el análisis de la información, se determinó que solo 30 estaciones eran aptas para aplicar técnicas estadísticas abarcando un periodo de 63 años (1960-2022). Los datos de lluvia diaria no están disponibles en todo el periodo de las series de tiempo analizadas.

La imputación de datos faltantes se realizó a través de dos métodos, regresión lineal simple (RLS), con la que se completaron 12 estaciones y el método del National Weather Service (US NWS) con el que se completaron 8 estaciones, las restantes 10 tenían toda la información o estaban completas. Luego del análisis, detección y corrección de los valores atípicos se aplicaron las pruebas de normalidad y homogeneidad. El 100% de las estaciones resultaron ajustarse a la distribución normal (DN) y solo 9 resultaron no homogéneas. El periodo, o los años que más se repitieron como punto de división temporal-espacial fueron 1993 y 1994 con un total de 17 estaciones para un 56.6 %.

Se aplicaron pruebas paramétricas en la determinación de la homogeneidad, tendencia y persistencia de las 30 series temporales. El 80 % resultó tener un comportamiento no persistente y el resto (20 %) persistente, coincidiendo con las estaciones con una tendencia muy baja. El 90 % presenta una tendencia decreciente que va desde los 5 mm hasta más de 100 mm, mientras que el 10 % restante (3 estaciones) prácticamente no tiene tendencia o es casi imperceptible, pero con una pequeña inclinación al alza en no más de 10 mm de incremento anual.



De las 30 estaciones, 11 presentan indicios de que el periodo de lluvias se está comenzando a desplazar hacia los meses más fríos, representando el 36.6 % del total, Esto se debe a que el tiempo promedio de ocurrencia Φ_m aumenta, esto viene dado por el hecho de que en esas estaciones el porcentaje de lluvia en los meses de octubre y noviembre aumenta, y disminuye en junio, a su vez, el periodo de lluvias se está acortando, llueve menos tiempo en el año como lo indica el índice de estacionalidad. Es decir, están ocurriendo dos fenómenos, la disminución de las precipitaciones y una redistribución interanual de la misma. Se puede observar un patrón geográfico sobre todo en la parte árida y semiárida del estado y lo que puede interpretarse como el inicio del desplazamiento estacional en la parte centro oeste de la sierra.

Con esta investigación se pone en alerta a las instancias gubernamentales, a todos los productores y agricultores de la región, principalmente a los de temporal, para que adopten las medidas que se plantean. Estas medidas están enfocadas en evitar la siniestralidad de las cosechas y poder aprovechar al máximo el periodo de lluvias, para poder evitar o cuando menos mitigar pérdidas económicas, disgustos sociales, y primordial, la sobreexplotación de los acuíferos para la agricultura de riego. Todo lo necesario para tener una cultura hídrica responsable.

5.2 Recomendaciones

Primeramente, se debe tomar conciencia con las evidencias que se demuestran en cada una de las investigaciones relacionadas con el cambio climático en el planeta, es un hecho, no una utopía. El cambio climático no se refiere sólo a que el clima cambia, siempre lo ha hecho desde la formación del planeta, sino a que hay un agente antrópico que ha modificado la tasa de dicho cambio, acelerándolo e incluso modificando las tendencias naturales.

A partir de esta idea, se recomienda encarecidamente brindarle una mayor importancia a monitorear todas las variables climáticas como son: temperatura, evaporación, humedad, presión atmosférica, evapotranspiración, entre otras, a través de las estaciones meteorológicas, incrementar la red y especializar a sus



trabajadores, con el objetivo de tener una fuente confiable de datos y facilitar el análisis de la información.

6 REFERENCIAS

- Aguilar-Alba, M., Camarillo, J. M., García-Barrón, L., Morales, J., & Sousa, A. (2018). Análisis comparado de la metodología para determinar la estacionalidad de la precipitación. <http://www.globalclimatemonitor.org>
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., Alberdi-Algañaraz, E. D., Bohn, V. Y., & Piccolo, M. C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261–280. <https://doi.org/10.18172/cig.2867>
- Bustillos, D. V., Arias, H. R., Ochoa Rivero, J. M., De La Mora, C., & Bustillos, V. (2017). Pronóstico productivo de la avena forrajera de temporal por efecto del cambio climático en el noroeste de Chihuahua, México.
- Cabrera, G., Zanazzi, J. F., Zanazzi, J. L., & Boaglio, L. (2017). Comparación de potencias en pruebas estadísticas de normalidad, con datos escasos. *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 4.
- Campos Aranda, D. F. (1984a). *Procesos del ciclo Hidrológico - Volumen 1 - Tomo 1* (Vol. 1). Universidad Autónoma de San Luis de Potosí.
- Campos Aranda, D. F. (1984b). *Procesos del ciclo Hidrológico - Volumen 1 - Tomo 2*. Editorial Universitaria Potosina.
- Campos Aranda, D. F. (2014). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 355–358.
- Cantor Gómez, D. C. (2011). Evaluación y análisis espaciotemporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología colombiana. Universidad Nacional de Colombia.
- Cavazos, T., & Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10(4), 377–386. <https://doi.org/10.1002/joc.3370100405>



- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). (1992).
- Cuellar, J. C., Arciniegas, J. L., & Hamilton Ortiz, J. (2018). Modelo para la medición de QoE en IPTV (J. I. Carlos V, Ed.). Editorial Universidad ICESI.
- Dingman, S. L. (2015). Physical Hydrology (3ra ed.).
- Duarte, C. M., & Alonso, S. (2006). Cambio global : impacto de la actividad humana sobre el sistema tierra. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Ezber, Y. (2018). Seasonality of Precipitation in Turkey: Present and Future Assessments. *Sakarya University Journal of Science*, 22(5), 1288–1297. <https://doi.org/10.16984/aufenbilder.313172>
- FAO. (2015). Cambio Climático, Seguridad Alimentaria y Nutrición. <https://www.fao.org/fsnforum/es/consultation/climate-change-food-security-and-nutrition>
- Feldman, A. J. L., & Cortés, D. H. (2016). Climate Change and Agriculture: A Review of the Literature with Emphasis on Latin America: Vol. LXXXIII (Issue 4).
- Figueras, S., & Gargallo, P. (2003). Análisis exploratorio de datos (A.E.D.).
- Fisher, N. I. (1993). Statistical Analysis of Circular Data. https://books.google.com.mx/books?id=wGPj3EoFdJwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=S&f=false
- Flores Tapia, C. E., & Flores Cevallos, K. L. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov. 23(2), 83–106. <http://orcid.org/0000-0002-1892http://orcid.org/0000-0003>
- García Páez, F., & Cruz Medina, I. R. (2009). Variability of rainfall in the north pacific region of México.
- Gobierno de Chihuahua. (2020). Portal Gubernamental del Estado de Chihuahua. <https://chihuahua.gob.mx/contenidos/ocasiona-sequia-danos-catastroficos-en-907-de-agricultura-de-temporal-en-chihuahua>
- Gobierno del Estado de Chihuahua. (2005). Plan Estatal de Desarrollo 2004-2010.



- González, N., Abad, J., & Lèvy, J. P. (2006). Capítulo 3: Normalidad y otros supuestos en análisis de covarianzas. In *Modelización con estructuras de covarianzas* (pp. 31–57).
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources* (Vol. 4). <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>
- Herrera-Oliva, C. S., Campos-Gaytán, J. R., & Carrillo-González, F. M. (2017). Estimation rainfall missing values by linear regression method: Case study Guadalupe Basin, Baja California, Mexico (Vol. 25).
- Hoyos García, C., Osorio, M., Gonzalo, J., Ardila, C., Ríos, M., Paola, A., Londoño, C., Villegas, J., del Carmen, S., & Aeropónico, P. (2012). Acumulación de Grados-Día en un Cultivo de Pepino (*Cucumis sativus* L.) en un Modelo de Producción Aeropónico. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 65(1), 6389–6398. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179924340009>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2003). *Síntesis de información geográfica del estado de Chihuahua*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (2017). *Conociendo Chihuahua*. www.inegi.org.mx
- OpenStax. (2012). *Histogramas, polígonos de frecuencia y gráficos de series temporales* (Introducción a la estadística). <https://openstax.org/books/introducci%C3%B3n-estad%C3%ADstica/pages/2-2-histogramas-poligonos-de-frecuencia-y-graficos-de-series-temporales>
- Kirchmeier-Young, M. C., & Zhang, X. (2020). Human influence has intensified extreme precipitation in North America. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921628117/-/DCSupplemental.y>
- Lovino, M. A., Müller, G. V., & Sgroli, L. C. (2020). ¿Cómo ha cambiado la precipitación en la provincia de Santa Fe?
- Lucero López, C. Y., Ubaldo, L., Esparza, C., Martín, S., Legarreta González, A., Olivas García, J. M., Uranga Valencia, L. P., & Lujan-Álvarez, C. (2022). Impacto del cambio climático en la agricultura del Distrito de Riego 005 Chihuahua, México. <https://www.kobotoolbox.org>



- Maces, S. G. V., & Viera, M. A. D. (2018). Geostatistical estimation of the spatial distribution of mean monthly and mean annual rainfall in Nuevo León, Mexico (1930-2014). *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(5), 106–127. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-05>
- Manuel Rojo, J. (2006). Análisis descriptivo y exploratorio de datos.
- Markham, C. G. (1970). Sci-Hub | Seasonality of precipitation in the United States. *Annals of the Association of American Geographers*, 60(3), 593–597 | 10.1111/j.1467-8306.1970.tb00743.x. <https://sci-hub.se/10.1111/j.1467-8306.1970.tb00743.x>
- Méndez González, J., Návar Cháidez, J. D. J., & Ontiveros, V. G. (2007). Analysis of rainfall trends (1920-2004) in Mexico (65).
- Mendoza-Urbe, I. (2022). Identification of changes in the rainfall regime in Chihuahua's state (México). *Geographical Research Letters*, 48(1), 111–132. <https://doi.org/10.18172/cig.5049>
- Milly, P., Betancourt, J., Falkenmark, M., & Hirsch, R. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1151915>
- Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, & Entidad Pública Empresarial Red.es. (2021). Guía práctica de introducción al Análisis Exploratorio de Datos.
- Moreno Reséndez, A., Aguilar Durón, J., & Luévano González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*.
- Morisette, J. T., Richardson, A. D., Knapp, A. K., Fisher, J. I., Graham, E. A., Abatzoglou, J., Wilson, B. E., Breshears, D. D., Henebry, G. M., Hanes, J. M., & Liang, L. (2009). Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: Phenological research in the 21 St. Century. In *Frontiers in Ecology and the Environment* (Vol. 7, Issue 5, pp. 253–260). <https://doi.org/10.1890/070217>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), N. W. S. (2023). National Weather Service. <https://www.weather.gov/>
- NIST. (2003). e-Handbook of Statistical Methods.



- O'Connor, P. D. T., & Kleyner, A. (2011). Appendix 3: Kolmogorov–Smirnov Tables. In *Practical Reliability Engineering* (pp. 455–456). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119961260.app3>
- Ordúz-Rodríguez, J. O., Javier Monroy, H., & Fisher, G. (2010). Comportamiento fenológico de la mandarina en el piedemonte del Meta, Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013). Seguridad y soberanía alimentaria. In <https://www.fao.org/3/ax736s/ax736s.pdf>.
<https://www.fao.org/3/ax736s/ax736s.pdf>
- Pereira González, A. (2009). Análisis predictivo de datos mediante técnicas de regresión estadística. Universidad Complutense de Madrid.
- Pérez Pelea, L. (2019). Valores atípicos en los datos, ¿cómo identificarlos y manejarlos? *Revista Del Jardín Botánico Nacional* •, 40, 99–107.
- Portal Gubernamental del Estado de Chihuahua. (2020). Ocasiona sequía daños catastróficos en 90.7% de agricultura de temporal en Chihuahua.
<https://chihuahua.gob.mx/contenidos/ocasiona-sequia-danos-catastroficos-en-907-de-agricultura-de-temporal-en-chihuahua>
- Quintana, V. M., & Solís, M. (2023). Análisis de diferentes tipos de agricultura para la conceptualización de una nueva ruralidad en el norte de México: el caso de Chihuahua. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- Ryan, T. A., & Joiner, B. L. (1976). *Normal Probability Plots and Tests for Normality*.
- SAGARPA. (2015). *Agenda técnica agrícola de Chihuahua*.
- Salazar Moreno, R., López-Cruz, I., Rojano Aguilar, A., Santillan Illescas, J., Pineda Pineda, J., Fitz Rodríguez, E., Alberto Salvador Escalante Estrada, J., Isabel Escalante Estrada Cid Aguilar Carpio, Y., Loera Martínez, J., Andrea Pedro Juárez, F., Sepúlveda Jiménez, D., Sánchez-Toledano, B., Cuevas-Reyes, V., Palmeros Rojas, O., Borja Bravo, M., Victoria Gómez Águila, M., López Aguilar, C., Tonatiuh Castellanos Serrano, L., Alfredo Castellanos Suárez, J., & Eduardo Sepúlveda Robles, D. (2022). Estimación de datos faltantes en series de precipitación de la ciudad de México.



Servicio meteorológico Nacional (SMN) del Gobierno de México. (2023). Información Estadística Climatológica.

<https://smn.CONAGUA.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Slater, L. J., Anderson, B., Buechel, M., Dadson, S., Han, S., Harrigan, S., Kelder, T., Kowal, K., Lees, T., Matthews, T., Murphy, C., & Wilby, R. L. (2021). Nonstationary weather and water extremes: A review of methods for their detection, attribution, and management. In *Hydrology and Earth System Sciences* (Vol. 25, Issue 7, pp. 3897–3935). Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3897-2021>

Soporte de Minitab. (2023). ¿Qué es un promedio móvil? <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/time-series/supporting-topics/moving-average/what-is-a-moving-average/>

UNESCO. (2006). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe.

Urrutia-Mosquera, J. A. (2010). Metodología para la imputación de datos faltantes en Meteorología. <https://www.researchgate.net/publication/308024316>

Zaiontz, C. (2024). D'Agostino-Pearson Test / Real Statistics Using Excel. <https://real-statistics.com/tests-normality-and-symmetry/statistical-tests-normality-symmetry/dagostino-pearson-test/>



7 CURRICULUM VITAE

Mi nombre es Alba Durán Companioni, tengo 28 años, soy graduada de Ingeniería Civil, grado alcanzado en el año 2019 en la Universidad Central Marta Abreu de las Villas (UCLV), Villa Clara, Cuba. Cuento con tres años de experiencia profesional en la industria de la construcción. Comencé como Especialista C en Obras de Arquitectura e Ingeniería, en la empresa EMPRESTUR Ciego de Ávila, con subsede en La Habana, Cuba, donde me encargaba de la supervisión de la obra, la elaboración de los presupuestos, preparaciones técnicas y certificaciones de la producción, en esta empresa estuve aproximadamente 1 año y 4 meses. Luego me trasladé a mi provincia natal Sancti- Spíritus, Cuba; específicamente la UEB Empresa de Prefabricado y Premezclado, con el cargo de Especialista A en Prefabricado y Premezclado, mis funciones abarcaban el análisis y la calidad de áridos y cementos, creación y puesta en marcha de nuevas dosificaciones para la producción de asfaltos y hormigones más ligeros y económicos, la producción y diseño de moldes para celosías, balaustrada, lavaderos, adocretos, paneles, losas, entre otros, estuve 1 año y 3 meses. Luego de forma simultánea a este último trabajo empecé en Empresa de Proyectos e Investigaciones de Villa Clara UEB Sancti Spíritus, donde realicé una función similar a mi primer trabajo pero esta vez en obras hidráulicas como: conductoras, plantas de tratamiento de residuales, etc. Finalmente me postulé para la maestría en Ingeniería en Hidrología que ofrecía la UACH, comencé todo el proceso con todo lo que conllevaba, me aprobaron y ahora estoy redactando el currículum que irá en la última página de mi tesis para obtener el grado de máster dos años después. Durante este tiempo he adquirido nuevas habilidades entorno a: cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas y superficiales, manejo sostenible de cuencas, diseño hidráulico e hidrológico urbano, gobernanza del agua, hidrología ambiental, manejo de softwares de Sistemas de Información Geográfica (GIS), programación en Excel, etc.

Correo Electrónico: albitaduran199607@gmail.com

Esta tesis/disertación fue mecanografiada por <Alba Durán Companioni>.