Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

"EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA EN LAS ZONAS MEDIA Y CENTRO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ "

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

Presenta:
ING. ELIZABETH RICOY ORDAZ

Asesor:
DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE

Co-asesor(a):
MTGA. ARACELI JAIMES ARREDONDO

San Luis Potosí, S. L. P. Septiembre de 2026

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

"EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA EN LAS ZONAS MEDIA Y CENTRO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ "

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

Presenta:
ING. ELIZABETH RICOY ORDAZ

Asesor:
DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE

Co-asesor(a):
MTGA. ARACELI JAIMES ARREDONDO

San Luis Potosí, S. L. P. Septiembre de 2026

UASLP
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

FACULTAD DE INGENIERÍA

16 de julio de 2026

ING. ELIZABETH RICOY ORDAZ
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hermann Rocha Escalante y M.I. Araceli Jaimes Arredondo,** *Asesor y Coasesora del Trabajo de Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA EN LAS ZONAS MEDIA Y CENTRO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ"

Introducción.
1. Evaluación de la variabilidad climática en las Zonas Centro y Media de San Luis Potosí.
2. Análisis de sequía en las Zonas Centro y Media de San Luis Potosí.
3. Evaluación de los índices de cambio climático en las Zonas Centro y Media de San Luis Potosí.
4. Análisis y discusión de resultados.

Conclusiones y recomendaciones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

D E C L A R A C I Ó N

El presente trabajo que lleva por título:

"EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA EN LAS ZONAS MEDIA Y CENTRO DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ "

se realizó en el periodo septiembre de 2024 a septiembre de 2026 bajo la dirección del Dr. Hermann Rocha Escalante y la MTGA. Araceli Jaimes Arredondo

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Elizabeth Ricoy Ordaz

Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a Dios por darme, la perseverancia, sabiduría y todas las herramientas para poder lograr esta investigación de la mejor manera.

Agradecimientos

A Dios, por acompañarme a lo largo de este camino y darme la fortaleza para continuar, a mi madre por ser mi apoyo incondicional, a mis hermanos por estar presentes durante este proceso.

A Pablo por su paciencia, por escucharme, animarme y apoyarme cuando las cosas no salían bien.

A Chuy por ser un gran amigo, apoyo y compañía cuando tocaba desvelarme haciendo tareas.

A Pita por ser mi mayor apoyo moral y emocional en este proceso, por sus palabras de ánimo.

Al mi director de tesis, el Dr. Hermann Rocha Escalante por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo bajo su dirección, agradezco sus aportaciones y observaciones, así como la libertad que me permitió desarrollar mis ideas.

A mi codirectora la MTGA Araceli Jaimes Arredondo, por su invaluable apoyo compartiendo conmigo sus conocimientos y experiencia, además de su paciencia y disposición para orientarme en cada una de las etapas metodológicas de este trabajo.

A los miembros de mi comité titular, por el tiempo dedicado a la revisión y seguimiento de este trabajo, así como sus valiosas observaciones, comentarios y recomendaciones.

A mis compañeros de posgrado por compartir conocimientos y por ayudarnos mutuamente.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado durante la realización de mis estudios de posgrado, el cual fue fundamental para poder dedicarme a mi formación académica y al desarrollo de esta investigación.

Contenido

INTRODUCCIÓN 14
Variabilidad climática y características. 15
Diferenciación entre variabilidad climática y cambio climático. 15
Estudios específicos y reportes en México 15
Sequía y sus características. 16
Justificación 17
Hipótesis 18
Objetivo General 18
Objetivos específicos 18
1. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ 20
1.1. Delimitación y Caracterización Climatológica del Área De Estudio 20
1.1.1. Localización de la Zona Centro: 20
1.1.2. Localización de la Zona Media: 20
1.1.3. Clima de la Zona Centro: 22
1.1.3.1. Temperaturas de la Zona Centro: 23
1.1.3.2. Distribución de precipitaciones de la Zona Centro 24
1.1.4. Clima de la Zona Media: 25
1.1.4.1. Temperaturas Zona Media 27
1.1.4.2. Distribución de precipitaciones Zona Media. 29
1.2. Variabilidad Climática 30
1.2.1. Datos meteorológicos: 30
1.2.2. Estimación y procesamiento de datos: 34
1.2.3. Análisis estadístico Mann Kendall: 34
1.2.4. Evaluación de la variabilidad climática de la Zona Centro 36
1.2.5. Evaluación de la variabilidad climática de la Zona Media 47
2. ANÁLISIS DE SEQUÍA EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ. 60
2.1. Índice de precipitación estandarizado (SPI): 60
2.1.1. SPI-índice de Precipitación Estandarizado -12 Zona Centro 63
2.1.2. SPI-índice de Precipitación Estandarizado -12 Zona Media 67
2.2. Prueba de Pettit 72
2.2.1. Prueba de Pettit Zona Centro 76
2.2.2. Prueba de Pettit Zona Media 82

3. EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ. 88
3.1 Aspectos generales del cambio climático: 88
3.2. Índices de cambio climático (ICC) 89
3.3. Disponibilidad y preparación de datos diarios 92
3.4. Cálculo de índices de cambio climático mediante RClimDex 93
3.5. Análisis de los índices de cambio climático en la Zona Centro 95
3.6. Análisis de los índices de cambio climático en la Zona Media 107
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 121
4.2. Comportamiento de la precipitación 122
4.3. Comportamiento de la sequía 123
4.4. Índices de cambio climático asociados con temperatura 124
4.5. Índices de cambio climático asociados con precipitación 125
4.6. Integración de la variabilidad climática, sequía e índices de extremos 127
CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES 128
REFERENCIAS 132

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Localización de las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CONABIO. 21

Figura 2 Distribución de los tipos de clima en la Zona Centro de San Luis Potosí. 23

Figura 3 Distribución espacial de la temperatura media anual en la Zona Centro de San Luis Potosí. 24

Figura 4 Distribución espacial de la precipitación total anual en la Zona Centro de San Luis Potosí. 25

Figura 5 Distribución de los Tipos de Clima en la Zona Media de San Luis Potosí 27

Figura 6 Distribución de temperaturas Zona Media 28

Figura 7 Distribución de precipitaciones Zona Media 30

Figura 8 Métodos para estimar datos faltantes (Elaboración propia). 34

Figura 9 Hoja de cálculo para estimar el estadístico de Mann-Kendall, y el valor de la magnitud de cambio 36

Figura 10 Variación de la temperatura máxima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 44

Figura 11 Variación de la temperatura mínima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 45

Figura 12 Variación de la temperatura promedio entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia) 46

Figura 13 Variación de la temperatura máxima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia) 57

Figura 14 Variación de la temperatura Promedio entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 58

Figura 15 Variación de la temperatura mínima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 59

Figura 16 Cálculo de SPI en DrinC 62

Figura 17 Comportamiento de SPI de 12 meses anual, Zona Centro 66

Figura 18 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Media 71

Figura 19 Precipitación en el mes de diciembre, de la estación 24093, Tierra Nueva. (ZC) elaboración propia; con información de CONAGUA 2025 76

Figura 20 Interfaz de RClimdex para calcular ICC 94

Figura 21 Distribución espacial de las tendencias del índice de días de verano (SU) en la Zona Centro de San Luis Potosí, 1980–2024. 100

Figura 22 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice Simple de Intensidad Diaria de Precipitación (SDII) en la Zona Centro de San Luis Potosí, 1980–2024. 106

Figura 23 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice de Días de Verano (SU) en la Zona Media de San Luis Potosí, 1980–2024. 112

Figura 24 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice de Días Secos Consecutivos (CDD) en la Zona Media de San Luis Potosí, 1980–2024. 118

INDICE DE TABLAS

Tabla 1Distribución de climas Zona Centro elaboración propia con base en García (2004). 22

Tabla 2 Distribución de climas Zona Media 26

Tabla 3 Pruebas de homogeneidad e independencia Zona Centro 32

Tabla 4 Pruebas de homogeneidad e independencia Zona Media 33

Tabla 5 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura máxima en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 37

Tabla 6 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura promedio en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 38

Tabla 7 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura mínima en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 40

Tabla 8 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia)..... 41

Tabla 9 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura máxima en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 48

Tabla 10 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura mínima en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 50

Tabla 11 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura promedio en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia) 52

Tabla 12 Variación de la Precipitación entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 54

Tabla 13 Valores de SPI y su designación conforme a CONAGUA s.f. 63

Tabla 14 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Centro 64

Tabla 15 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Media 68

Tabla 16 Estadísticos descriptivos de precipitación de la RA (elaboración propia con información de CONAGUA, 2020) 75

Tabla 17 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de precipitación mensual de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 77

Tabla 18 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Maxima de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia)..... 78

Tabla 19 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Mínima de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 79

Tabla 20 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura promedio de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 80

Tabla 21 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de precipitación mensual de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 83

Tabla 22 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Maxima de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia)..... 84

Tabla 23 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Mínima de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia). 85

Tabla 24 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura promedio de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia). 86
Tabla 25 Índices de cambio climático de Temperatura 90
Tabla 26 Índices de cambio climático de Precipitación 91
Tabla 27 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (elaboración propia con información de CONAGUA). 97
Tabla 28 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de Precipitación (elaboración propia con información de CONAGUA). 103
Tabla 29 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (elaboración propia con información de CONAGUA). 108
Tabla 30 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de Precipitación (elaboración propia con información de CONAGUA). 115

RESUMEN

El presente estudio evalúa la variabilidad climática, la sequía y la presencia de indicios de cambio climático en las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí, mediante el análisis de registros históricos de precipitación y temperatura correspondientes al periodo 1980–2023. Para ello se utilizaron datos de estaciones climatológicas de ambas regiones, considerando temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio y precipitación. Previamente, las series fueron sometidas a pruebas de homogeneidad e independencia y se realizó la estimación de datos faltantes mediante métodos estadísticos basados en estaciones cercanas.

La variabilidad climática se evaluó mediante la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, utilizada para identificar tendencias estadísticamente significativas, complementada con la pendiente de Sen para determinar la dirección y magnitud de los cambios observados. Los resultados muestran un comportamiento heterogéneo entre estaciones y variables; sin embargo, se identificaron tendencias de incremento en diferentes series de temperatura de las zonas Centro y Media. En la Zona Centro, algunas estaciones presentaron incrementos acumulados de temperatura promedio superiores a 2 °C durante el periodo analizado.

El análisis de sequía se realizó mediante el Índice de Precipitación Estandarizado a escala de 12 meses (SPI-12). Aunque regionalmente predominaron condiciones cercanas a la normalidad, el análisis por estación permitió identificar episodios de mayor intensidad, registrándose valores inferiores a −2.0 en distintas estaciones de la Zona Centro. Asimismo, mediante la prueba de Pettitt se identificaron cambios abruptos en las series de precipitación y temperatura, observándose una mayor frecuencia de puntos de ruptura en las variables térmicas.

Para la evaluación específica del cambio climático, se calcularon los Índices de Cambio Climático (ICC) mediante RClimDex, utilizando series climatológicas diarias de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Posteriormente, los índices obtenidos fueron sometidos a un análisis de tendencia mediante la prueba de Mann-Kendall, con el propósito de determinar si los cambios observados a lo largo del periodo presentan una tendencia estadísticamente significativa.

Este procedimiento permite evaluar modificaciones en el comportamiento de los extremos climáticos y complementar los resultados obtenidos a partir de las variables climáticas convencionales. La metodología integra, por tanto, el análisis de tendencias, la magnitud de los cambios, la ocurrencia de sequías y la identificación de cambios abruptos para caracterizar la evolución climática de ambas regiones.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian diferencias espaciales y temporales entre las zonas Centro y Media, así como modificaciones relevantes en las condiciones térmicas y pluviométricas durante 1980–2023. La integración de las distintas pruebas e índices permite distinguir la variabilidad propia de las series de aquellas tendencias persistentes que pueden constituir indicios de cambio climático regional.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos atmosféricos constituyen procesos naturales que ocurren en la atmósfera y determinan, en conjunto, las condiciones meteorológicas y climáticas de una región. Variables como la temperatura y la precipitación presentan fluctuaciones en distintas escalas temporales y espaciales, las cuales forman parte de la variabilidad natural del clima. Sin embargo, cuando se presentan modificaciones persistentes en las características climáticas durante periodos prolongados, estas pueden estar relacionadas con cambios en el sistema climático.

En este contexto, a Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC,1992), en su artículo 1, se define al cambio climático como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables.

El cambio climático se manifiesta mediante modificaciones persistentes en diferentes componentes del sistema climático, entre ellos la temperatura y la precipitación. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), la temperatura media de la superficie global durante el periodo 2011–2020 fue aproximadamente 1.09 °C superior a la registrada durante 1850–1900. Asimismo, se han identificado cambios en los patrones de precipitación, cuya distribución y magnitud presentan diferencias espaciales entre regiones. Estas modificaciones pueden ser evaluadas mediante el análisis de series climatológicas de largo plazo, permitiendo identificar tendencias y cambios en el comportamiento de las variables climáticas.

El incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero asociado con las actividades humanas constituye uno de los principales factores del calentamiento observado. El IPCC (2021) señala que la influencia humana ha calentado de manera inequívoca la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, y que sus efectos ya se manifiestan en diversos eventos climáticos extremos. Entre los cambios observados se encuentran modificaciones en la frecuencia o intensidad de los

extremos de temperatura, las precipitaciones intensas y las sequías, aunque su comportamiento y nivel de evidencia varían entre regiones (IPCC, 2021).

Variabilidad climática y características.

La variabilidad climática se refiere a las variaciones del estado medio del clima y de otras características estadísticas, como la desviación estándar y la ocurrencia de eventos extremos, en diferentes escalas temporales y espaciales. Estas variaciones pueden originarse por procesos internos naturales del sistema climático o por factores externos. Su análisis permite identificar fluctuaciones en variables como la temperatura y la precipitación y reconocer diferencias en su comportamiento a través del tiempo y entre distintas regiones (IPCC, 2021).

Diferenciación entre variabilidad climática y cambio climático.

La variabilidad climática y el cambio climático son conceptos relacionados, pero se diferencian principalmente por la naturaleza y persistencia de los cambios observados. De acuerdo con la World Meteorological Organization (WMO, 2011), la variabilidad climática comprende las fluctuaciones de las condiciones climáticas que se presentan en diferentes escalas temporales y espaciales. Por otra parte, el cambio climático se refiere a modificaciones persistentes en el estado del clima, identificables a partir de cambios en sus valores medios o en la variabilidad de sus propiedades durante periodos prolongados. Esta diferenciación permite distinguir las fluctuaciones propias de la variabilidad climática de los cambios sostenidos que caracterizan al cambio climático.

Estudios específicos y reportes en México

En México se han desarrollado diversos estudios orientados al análisis del cambio climático y sus posibles efectos a escala regional. Entre ellos, Magaña *et al.* (2000) evaluaron escenarios regionales del clima actual y del cambio climático futuro para el país mediante el uso de modelos climáticos, con el propósito de identificar posibles modificaciones en las condiciones de temperatura y precipitación. Los autores destacan la importancia de regionalizar los escenarios

climáticos para evaluar la vulnerabilidad ante posibles cambios en el clima, particularmente por sus implicaciones en sectores sensibles como la agricultura y la disponibilidad de recursos hídricos (Magaña *et al.*, 2000).

El Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014) analizó los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en diferentes regiones del mundo. Para México y la región de América Central se identificaron riesgos asociados con el incremento de la temperatura, cambios en la precipitación, disponibilidad de recursos hídricos y ocurrencia de eventos climáticos extremos. El informe señala que los efectos del cambio climático pueden variar entre regiones debido a las diferencias en exposición, vulnerabilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2014).

De igual manera la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha desarrollado investigaciones orientadas al estudio del cambio y la variabilidad climática. Entre estos trabajos se incluyen análisis de los cambios observados y proyectados en variables climáticas, así como evaluaciones de sus posibles impactos sobre sistemas naturales y humanos. Estas investigaciones han permitido caracterizar el comportamiento histórico del clima y generar proyecciones para diferentes escenarios futuros en el territorio nacional (Estrada *et al*., 2023).

Sequía y sus características.

La sequía es un fenómeno climático caracterizado por una disminución o déficit de la disponibilidad de agua respecto a las condiciones consideradas normales durante un periodo determinado. Su definición y caracterización pueden variar de acuerdo con las condiciones climáticas de cada región, debido a que un mismo déficit de precipitación puede producir efectos diferentes dependiendo de las características del lugar. Por esta razón, no existe un único umbral de déficit pluviométrico aplicable a todas las regiones, lo que ha dado lugar al desarrollo de diferentes métodos e índices para identificar, cuantificar y comparar los periodos secos (Marcos Valiente, 2001).

La sequía puede clasificarse de acuerdo con el componente del sistema que resulta afectado. Entre las principales categorías se encuentran la sequía meteorológica, relacionada con un déficit de precipitación respecto a las condiciones normales; la sequía agrícola, asociada con una disponibilidad insuficiente de humedad en el suelo para satisfacer las necesidades de los cultivos; la sequía hidrológica, vinculada con la disminución de los recursos hídricos superficiales y subterráneos; y la sequía socioeconómica, que se presenta cuando la disponibilidad de agua resulta insuficiente para satisfacer determinadas demandas de la sociedad (Marcos Valiente, 2001).

Justificación

El estudio de la variabilidad y el cambio climático resulta relevante debido a sus posibles implicaciones sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. En San Luis Potosí, se han identificado cambios y diferentes tendencias en variables como la temperatura y la precipitación, por lo que resulta necesario realizar análisis a escala regional que permitan reconocer las particularidades del comportamiento climático dentro del territorio estatal (SEGAM, 2018).

Diversos estudios realizados en San Luis Potosí han abordado esta problemática desde distintas regiones y perspectivas. Jaimes Arredondo (2022) evaluó la vulnerabilidad hídrico-ambiental ante los efectos de la variabilidad y el cambio climático en las regiones Altiplano y Huasteca, considerando además la importancia de fenómenos hidrometeorológicos extremos como las sequías. or otra parte, Torres Aldana (2022) analizó la variabilidad y el cambio climático en la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del río Verde, lo que evidencia la importancia de realizar evaluaciones regionales para caracterizar el comportamiento climático del estado.

La disponibilidad del agua constituye otro elemento relevante para el análisis climático regional. Hernández Constantino (2020) identificó un incremento de la demanda de agua subterránea en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí asociado con el crecimiento urbano y las actividades

socioeconómicas, además de señalar que la variabilidad de la precipitación influye en la disponibilidad de agua para la recarga natural del sistema acuífero. Estos antecedentes muestran la relación existente entre las condiciones climáticas y la disponibilidad de los recursos hídricos, particularmente en regiones donde el abastecimiento depende en gran medida del agua subterránea.

La relevancia de esta investigación radica en su potencial para proporcionar información vital sobre Variabilidad Climática, Sequia y Cambio Climático local permitiendo a las autoridades, investigadores y comunidades locales comprender mejor la dinámica de las regiones y tomar decisiones informadas para la gestión eficiente del agua.

Hipótesis

Existen indicios estadísticamente significativos de cambio climático, variabilidad climática y sequía en las Zonas Media y Centro de San Luis Potosí, evidenciados por un aumento en la temperatura media y una disminución en la precipitación anual en al menos los últimos 30 años.

Objetivo General

Evaluar la variabilidad climática, el cambio climático y su relación con la frecuencia de sequías en las Zonas Media y Centro de San Luis Potosí mediante el estudio de datos históricos de precipitación y temperatura, para identificar patrones y tendencias que permitan comprender las alteraciones en el clima regional.

Objetivos específicos

I. Evaluar las tendencias históricas de temperatura y precipitación en las zonas Media y Centro de San Luis Potosí en al menos los últimos 43 años, utilizando análisis estadísticos avanzados para determinar cambios significativos relacionados con la variabilidad.

II. Realizar un análisis de sequía para las zonas Media y Centro mediante un análisis de índice de precipitación estandarizado (SPI) por sus siglas en ingles.

III. Identificar la presencia de cambio climático a través de los índices de cambio climático del ETCCDI mediante un análisis de tendencias.

IV. Interpretar los resultados climáticos obtenidos de las dos zonas de San Luis Potosí para identificar patrones meteorológicos y su impacto en el análisis del cambio climático de la entidad.

1. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ

1.1. Delimitación y Caracterización Climatológica del Área De Estudio

El área de estudio de esta investigación se concentra en dos zonas del estado de San Luis Potosí: la Zona Centro y la Zona Media. Estas regiones fueron seleccionadas debido a su relevancia climática e hidrológica y como continuación de los trabajos para tener el diagnostico de Variabilidad Climática, Cambio Climático y Sequia de todo el estado de San Luis Potosi.

1.1.1. Localización de la Zona Centro:

La Zona Centro se localiza en la porción central del estado de San Luis Potosí y comprende los municipios señalados en la (Figura 1). Esta región presenta condiciones climáticas predominantemente secas y semisecas, aunque existen variaciones relacionadas con la altitud y el relieve. Desde el punto de vista hidrológico, en esta parte del estado predominan corrientes superficiales de carácter intermitente, cuya presencia se encuentra estrechamente relacionada con la temporada de lluvias; asimismo, los recursos hídricos subterráneos constituyen una fuente importante para el abastecimiento de la población y el desarrollo de las actividades productivas (INEGI, 2012).

En cuanto a la cobertura vegetal, en la región central del estado se presentan comunidades adaptadas a condiciones áridas y semiáridas, entre las que destacan diferentes tipos de matorral, pastizal y otras asociaciones vegetales cuya distribución está relacionada con las características climáticas, topográficas y edáficas de la región (CONABIO & Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2019).

1.1.2. Localización de la Zona Media:

Como se muestra en la (Figura 1), la Zona Media se localiza en la porción centro-oriental del estado de San Luis Potosí y presenta condiciones climáticas generalmente más cálidas que la Zona

Centro, asociadas con sus características de altitud y relieve. Desde el punto de vista hidrológico, destaca la presencia del río Verde y de diversos manantiales y cuerpos de agua que constituyen recursos importantes para el abastecimiento de la población y el desarrollo de actividades productivas en la región (INEGI, 2012).

En cuanto al uso del suelo, en la Zona Media se desarrollan principalmente actividades agrícolas y pecuarias, además de la presencia de asentamientos urbanos. La vegetación presenta una transición entre las condiciones secas y semisecas del interior del estado y las condiciones de mayor humedad hacia el oriente, por lo que se encuentran diferentes comunidades vegetales, entre ellas matorrales, pastizales y vegetación asociada con ambientes de mayor humedad. (CONABIO & Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2019)

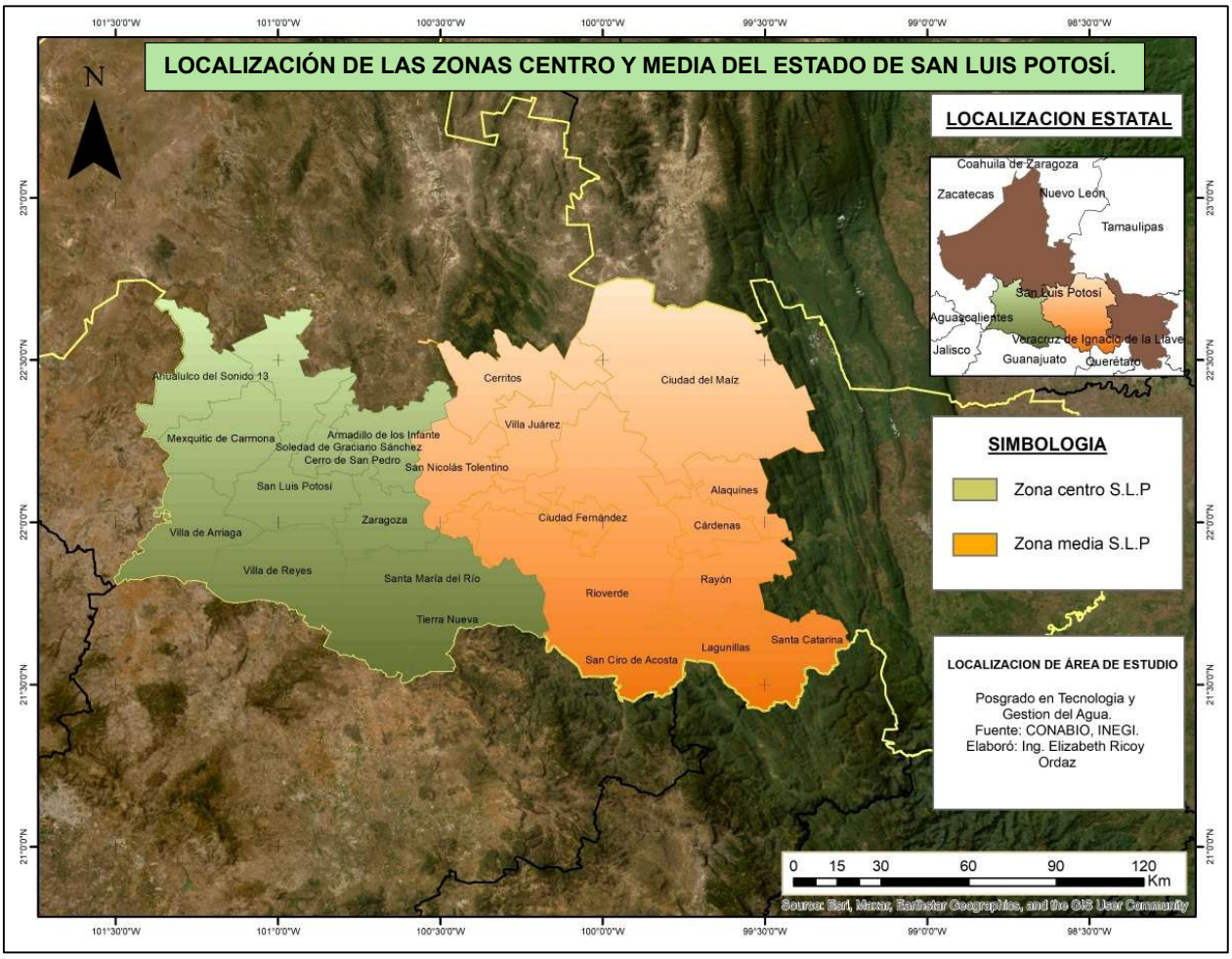


Figura 1 Localización de las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí. Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CONABIO.

1.1.3. Clima de la Zona Centro:

La Zona Centro presenta predominantemente climas secos y semisecos, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (2004). En el área de estudio se identifican diferentes variantes climáticas, cuya distribución y principales características se presentan en la (Tabla 1).

Tabla 1Distribución de climas Zona Centro elaboración propia con base en García (2004).

Clave	Tipo de clima	Características principales	Municipios donde se presenta
BS1hw	Seco estepario cálido subhúmedo con lluvias en verano	Semiárido cálido y menos seco - Más calor y algo más de humedad que BS0 - veranos lluviosos, inviernos secos	Extremo sur: Tierra Nueva y límites con la Zona Media
BS1kw	Seco estepario templado subhúmedo con lluvias en verano	Transición hacia climas más húmedos - Aún semiárido - Ligeramente más húmedo que BS0kw - Temperaturas templadas - Lluvias en verano	Villa de Reyes, Santa María del Río, Villa de Zaragoza, Villa de Arriaga, Ahualulco, Mexquitic, Cerro de San Pedro, Armadillo.
BS0hw	Seco estepario cálido con lluvias en verano	Semiárido cálido - Más calor que BS0kw (>19°C) - Lluvias en verano - inviernos secos - Riesgo de sequía prolongada	Santa María del Río (sur), Tierra Nueva, Ahualulco
BS0kw	Seco estepario templado con lluvias en verano	Semiárido templado - Lluvias en verano (jun-sep) - inviernos secos con heladas - 16-19°C promedio anual - ~370-400 mm de lluvia anual	San Luis Potosí, Soledad, Cerro de San Pedro, Villa de Reyes, Zaragoza

La distribución espacial de los tipos de clima presentes en la Zona Centro se muestra en la (Figura 2).

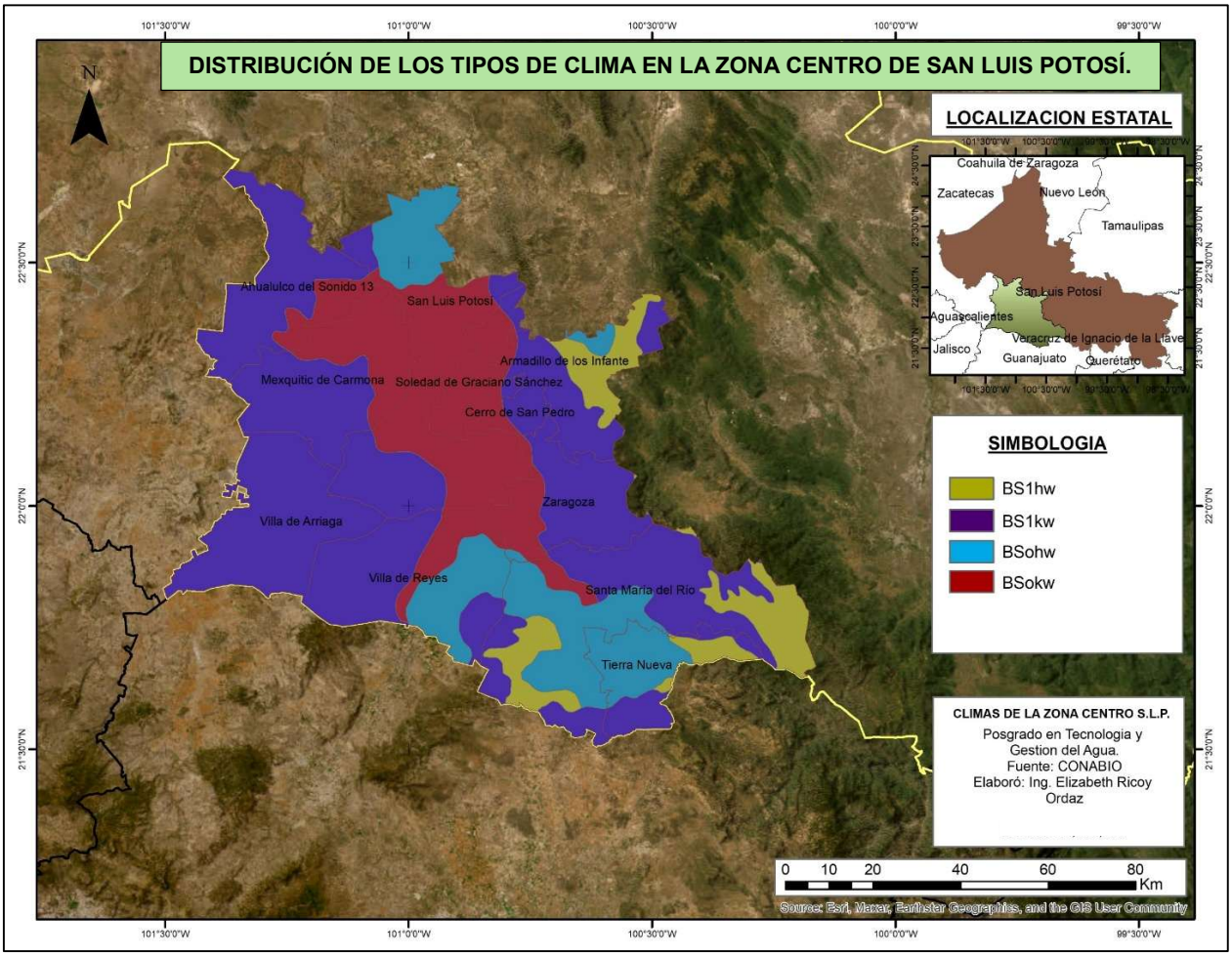


Figura 2 Distribución de los tipos de clima en la Zona Centro de San Luis Potosí.

1.1.3.1. Temperaturas de la Zona Centro:

La temperatura media anual en la Zona Centro presenta variaciones espaciales dentro del área de estudio. Los valores oscilan aproximadamente entre 12 y 22 °C; las temperaturas más bajas, de 12 a 16 °C, se presentan principalmente en sectores de Villa de Arriaga y Villa de Reyes, mientras que los intervalos de 16 a 20 °C abarcan una mayor extensión territorial. Los valores más elevados, entre 20 y 22 °C, se localizan de manera puntual hacia los sectores oriental y suroriental de la región. Estas diferencias se relacionan con las características geográficas y climáticas presentes en la Zona Centro (INEGI, 2012; CONABIO, 2019).

La distribución espacial de las temperaturas de la Zona Centro se muestra en la (figura 3).

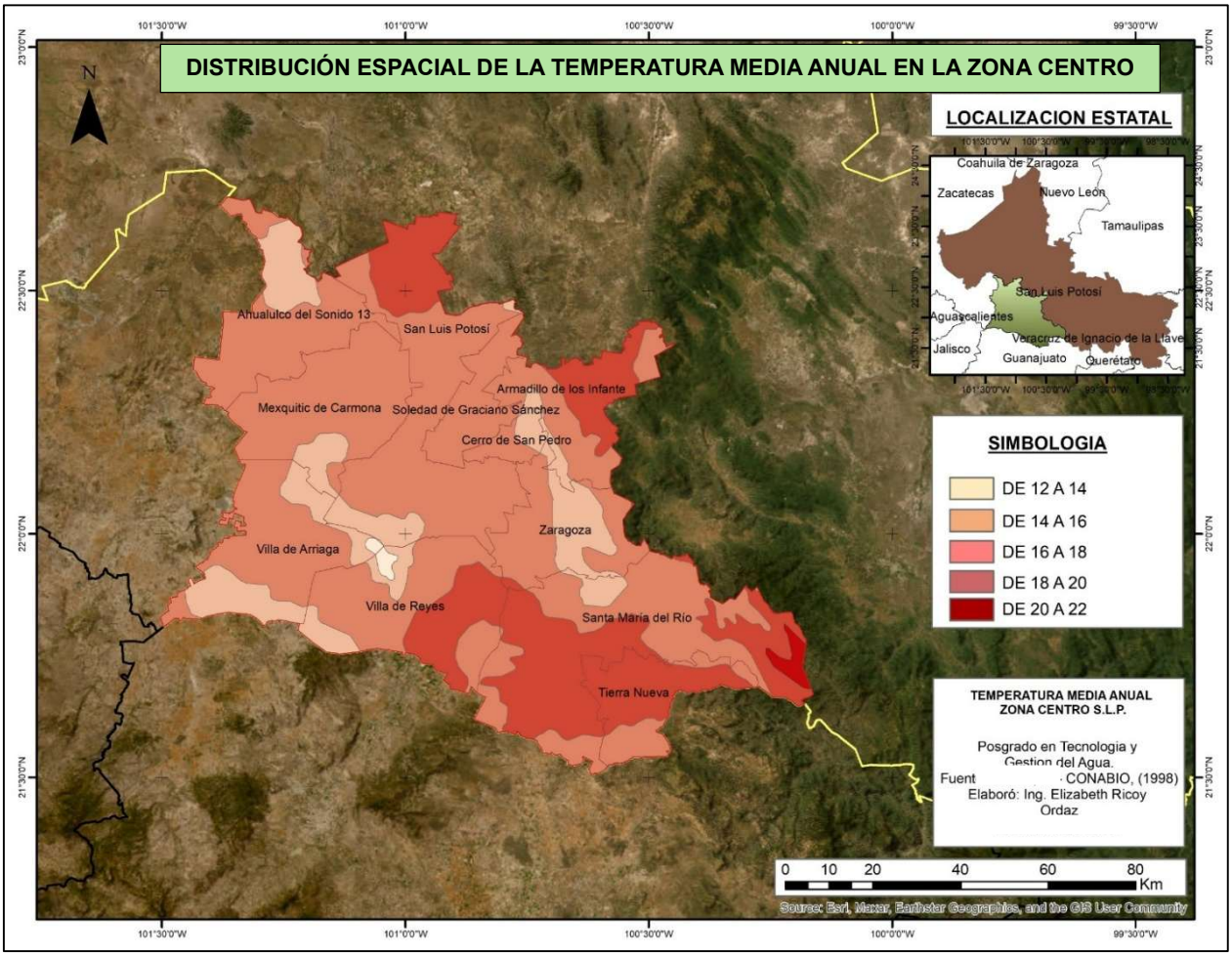


Figura 3 Distribución espacial de la temperatura media anual en la Zona Centro de San Luis Potosí.

1.1.3.2. Distribución de precipitaciones de la Zona Centro

La precipitación media anual en la Zona Centro del estado de San Luis Potosí presenta condiciones propias de regiones secas y semisecas, con una distribución estacional de las lluvias predominantemente durante el verano (INEGI, 2012; CONABIO, 2019). Los valores oscilan aproximadamente entre 300 y 800 mm/año, mostrando diferencias espaciales dentro del área de estudio. Los menores acumulados, entre 300 y 400 mm/año, se concentran principalmente en el sector central y centro-occidental, mientras que los intervalos de 400 a 600 mm/año presentan una mayor extensión territorial. Por su parte, los valores más elevados, de 600 a 800 mm/año, se localizan principalmente hacia el oriente y suroriente, particularmente en sectores próximos al

límite con la Zona Media. En conjunto, se observa un gradiente espacial caracterizado por un incremento de la precipitación hacia el oriente y sureste de la región.

La distribución espacial de las precipitaciones de la Zona Centro se muestra en la (Figura 4).

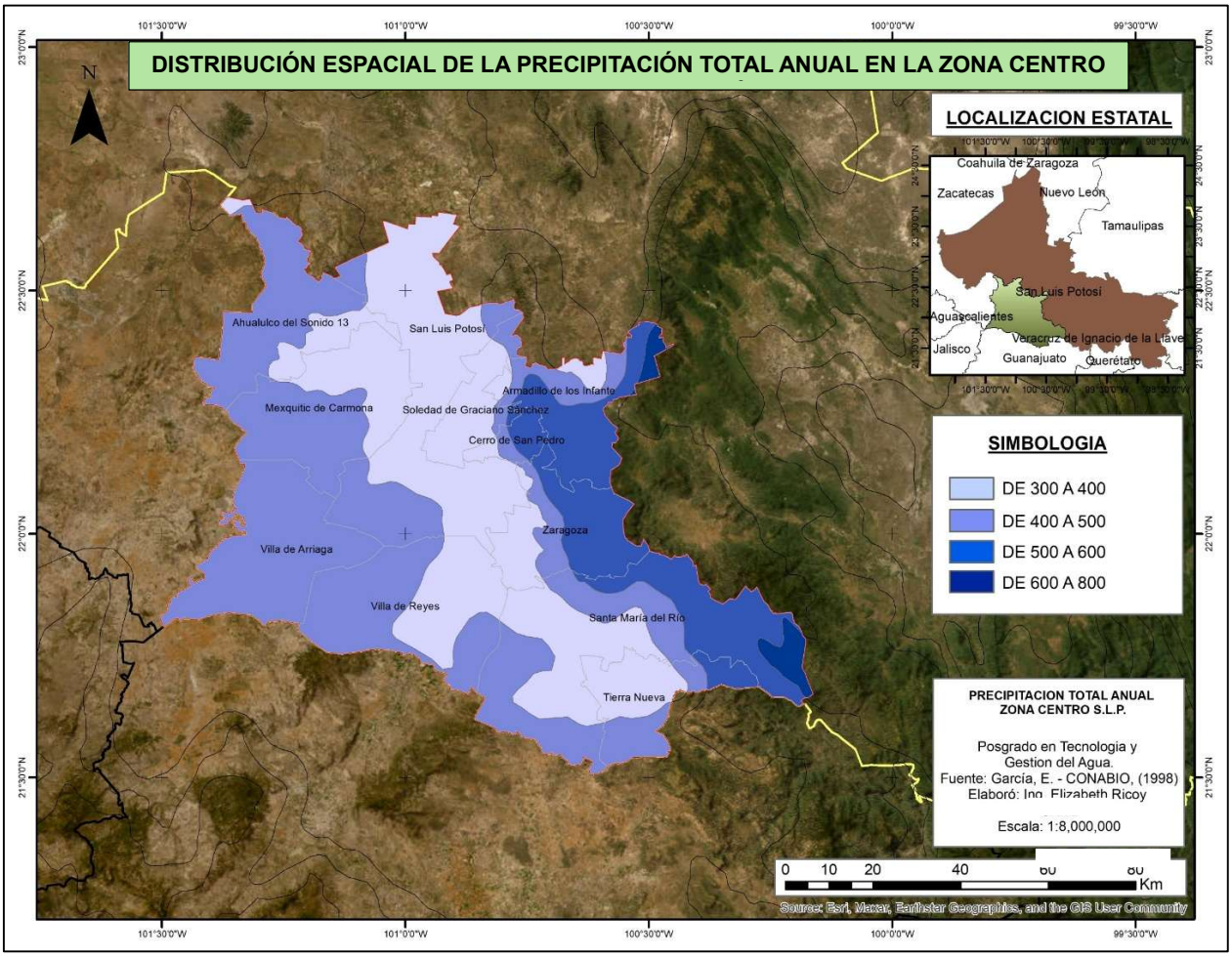


Figura 4 Distribución espacial de la precipitación total anual en la Zona Centro de San Luis Potosí.

1.1.4. Clima de la Zona Media:

La Zona Media presenta tres tipos principales de clima, de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (2004): templado, tropical y seco estepario. Estos tipos de clima presentan distintas variantes y una distribución espacial diferenciada dentro del área de estudio, como se muestra en la (Tabla 2).

Tabla 2 Distribución de climas Zona Media

Clave	Tipo de clima	Características principales	Municipios donde se presenta
(A)C(m)	Templado húmedo con lluvias todo el año	- Templado- Alta humedad- Lluvias todo el año	Zonas altas montañosas en el límite con la Huasteca
(A)C(w1)	Templado subhúmedo con lluvias en verano	- Templado- Lluvias en verano- Subhúmedo	Sierra de Ciudad del Maíz
A(C)w2	Transición tropical-subtropical con verano lluvioso, seco	- Transición entre tropical y templado- Lluvias verano- Inviernos secos	Oriente de Ciudad del Maiz, Alaquinez, Cárdenas, Rayon.
Aw1	Tropical con lluvias en verano, semicálido subhúmedo	- Temperaturas >22 °C- Lluvias en verano- invierno seco- Mayor humedad que el Aw2	Zona centro de Santa Catarina
Aw2	Tropical con lluvias en verano, más seco	- Similar al Aw1 pero más seco- Temperaturas altas- Lluvias en verano- Sequías más marcadas	Oriente de Santa Catarina
BS1(h')w	Seco esteparío cálido con menor precipitación (muy seco)	- Variante aún más seca- Alta temperatura- Muy baja precipitación- Lluvias concentradas en verano	Sur de San Ciro de Acosta
BS1hw	Seco esteparío cálido subhúmedo	- Semiárido cálido- Lluvias en verano- Temperatura media >19 °C	Mayor parte de la Zona Media
BS1kw	Seco esteparío templado subhúmedo	- Semiárido templado- Algo más húmedo que BSokw- Templado con lluvias de verano	Occidente de la Zona Media
BSokw	Seco esteparío templado	- Semiárido templado- Lluvias de verano- Típico del Altiplano Potosino	Norte de Rioverde

Clave	Tipo de clima	Características principales	Municipios donde se presenta
C(w2)	Templado con lluvias en verano (más seco)	- Clima templado- Lluvias verano- Menor humedad que (A)C(m) o (A)C(w1)	Oriente de Alaquines

La (Figura 5) muestra la ubicación geográfica de la distribución de los climas existentes de la Zona Media.

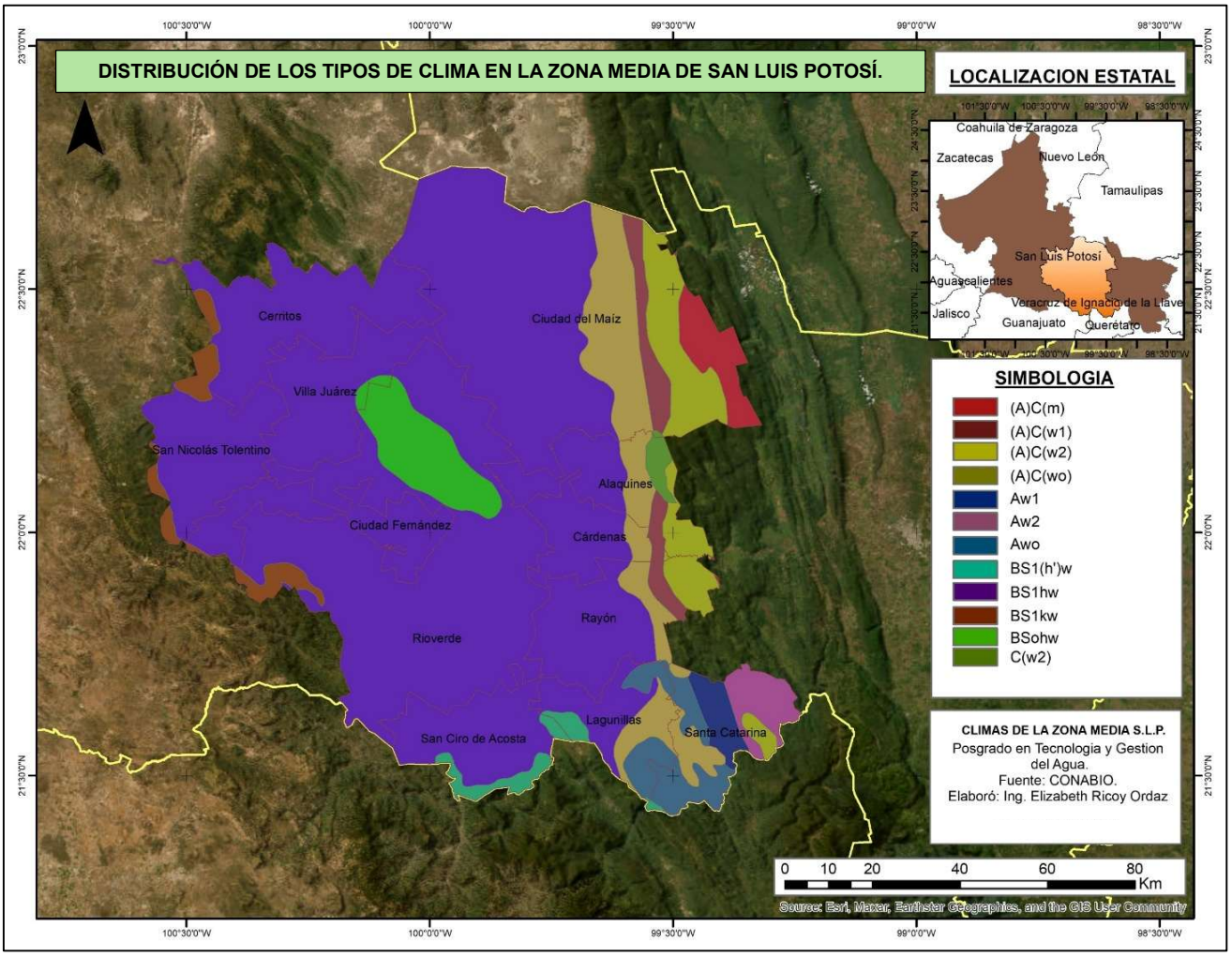


Figura 5 Distribución de los Tipos de Clima en la Zona Media de San Luis Potosí

1.1.4.1. Temperaturas Zona Media.

la temperatura media anual en la Zona Media presenta variaciones espaciales relacionadas con las condiciones geográficas y climáticas de la región (INEGI, 2012; CONABIO, 2019). Los valores

oscilan aproximadamente entre 18 y 26 °C. Las temperaturas más bajas, de 18 a 20 °C, se presentan principalmente en sectores de mayor altitud, como San Nicolás Tolentino, la zona occidental de Cerritos y Alaquines. Los intervalos de 20 a 24 °C abarcan una mayor extensión territorial e incluyen municipios como Ciudad del Maíz, Rioverde, Villa Juárez, Cárdenas y San Ciro de Acosta. Por su parte, las temperaturas más elevadas, de 24 a 26 °C, se localizan principalmente hacia Santa Catarina y el sur de San Ciro de Acosta. En conjunto, se observa un incremento de la temperatura hacia los sectores de menor altitud de la región.

La distribución espacial de las temperaturas de la Zona Media se muestra en la (figura 6).

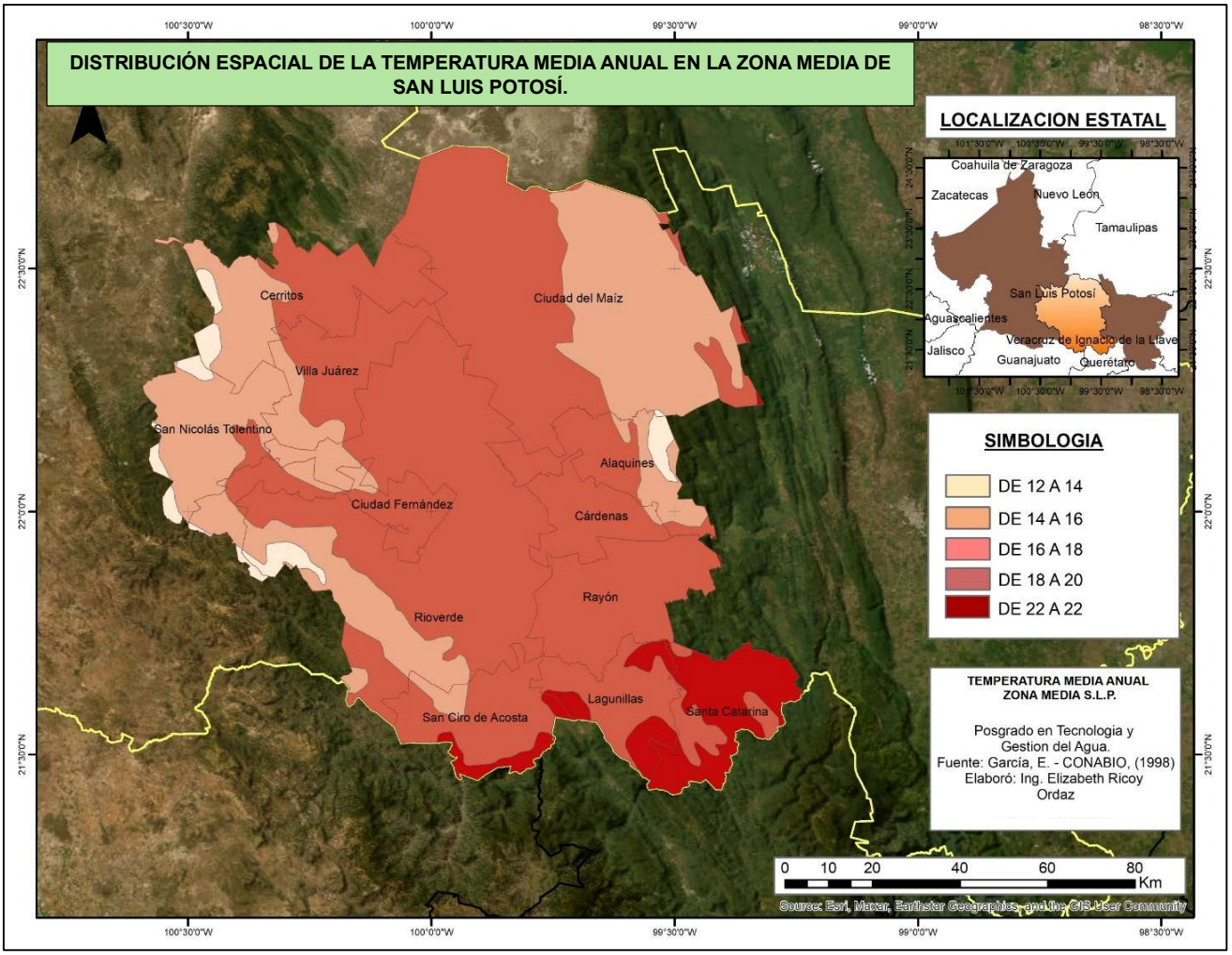


Figura 6 Distribución de temperaturas Zona Media

1.1.4.2. Distribución de precipitaciones Zona Media.

La precipitación media anual en la Zona Media presenta una marcada variación espacial, con valores que oscilan aproximadamente entre 300 y 2,500 mm/año, asociada con las diferencias de relieve y condiciones climáticas de la región (INEGI, 2012; CONABIO, 2019). Los menores acumulados, entre 300 y 500 mm/año, se localizan principalmente en sectores de San Ciro de Acosta, Rayón, Cerritos, Villa Juárez y Ciudad del Maíz. En la porción central de la región predominan valores intermedios, generalmente entre 500 y 800 mm/año, mientras que hacia las zonas serranas y de mayor altitud la precipitación aumenta progresivamente, superando los 1,000 mm/año. Los valores más elevados, que alcanzan hasta 2,500 mm/año, se presentan de manera localizada hacia el sector oriental y suroriental, próximo a la transición con la Huasteca potosina. En conjunto, esta distribución muestra un marcado gradiente de precipitación, con condiciones más secas hacia el interior de la Zona Media y un incremento de la humedad hacia las áreas serranas del oriente.

La distribución espacial de la precipitación total anual en la Zona Media se presenta en la (Figura7)

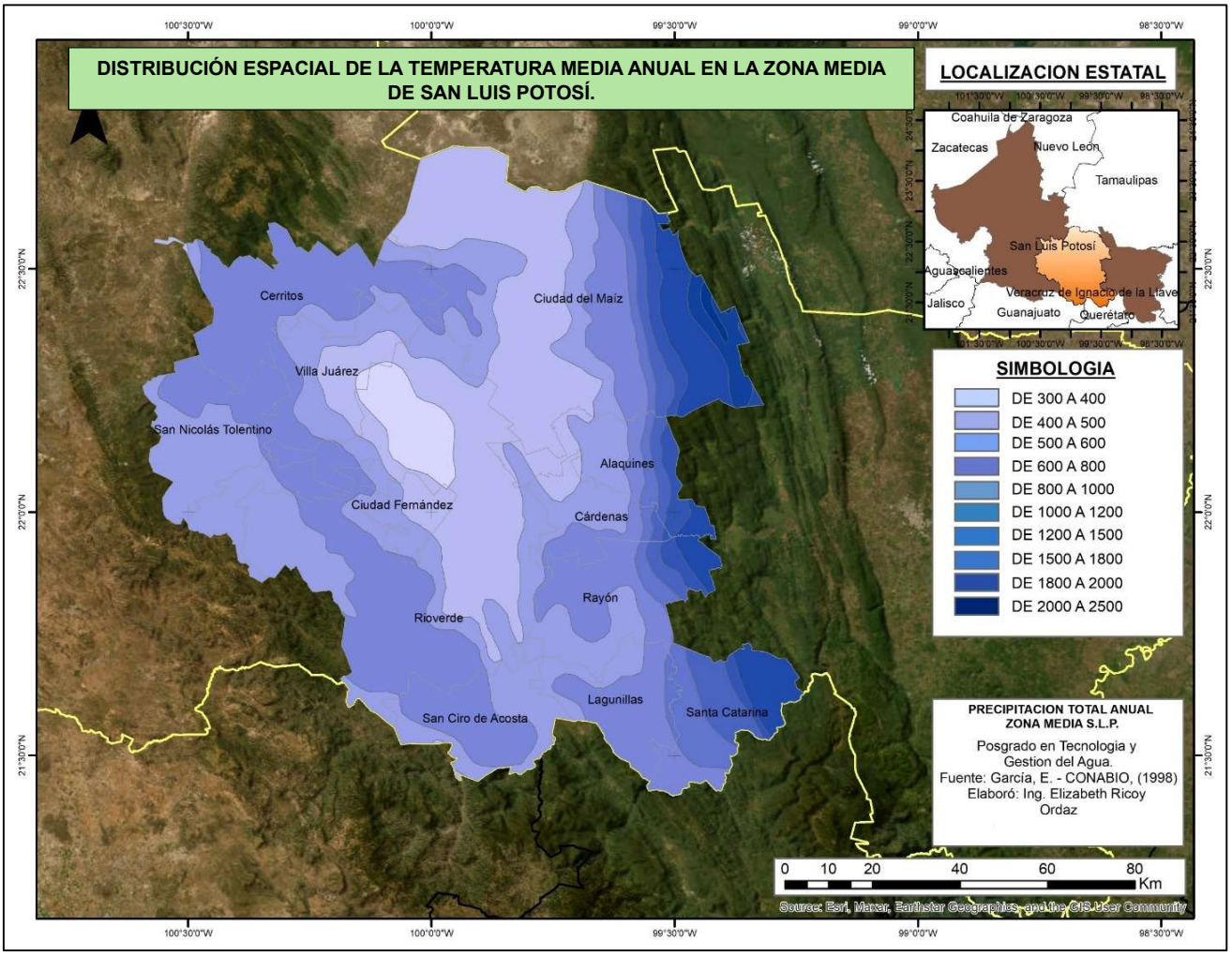


Figura 7 Distribución de precipitaciones Zona Media

1.2. Variabilidad Climática

1.2.1. Datos meteorológicos:

Se obtuvieron los datos históricos mensuales de precipitación total, así como de temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima extremas, correspondientes a las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de las regiones de estudio. Para garantizar la representatividad climática del análisis, se consideró un periodo de 43 años de registros desde 1980 a 2023.

Los datos recopilados fueron sometidos a diversas pruebas estadísticas con el objetivo de evaluar la homogeneidad e independencia de la información registrada en cada una de las estaciones

meteorológicas consideradas en el estudio. Este proceso permitió verificar la consistencia y confiabilidad de las series climatológicas, asegurando que los registros no presentaran cambios artificiales asociados a factores externos, como modificaciones en la ubicación de las estaciones, cambios en los instrumentos de medición o variaciones en los procedimientos de observación.

Asimismo, se realizaron análisis para comprobar la independencia de los datos dentro de las series temporales, con el fin de identificar posibles autocorrelaciones que pudieran afectar la interpretación de los resultados. La aplicación de estas pruebas permitió depurar las bases de datos y garantizar que las series utilizadas en el análisis reflejaran adecuadamente la variabilidad natural de las variables climáticas.

Este procedimiento constituyó una etapa fundamental dentro del procesamiento de la información, ya que permitió contar con datos confiables y consistentes para el análisis posterior.

Para la Zona Centro, como se observa en la (Tabla 3), de las 16 estaciones climatológicas evaluadas, nueve presentaron series homogéneas, mientras que siete mostraron resultados de no homogeneidad. En cuanto a la prueba de independencia, 13 estaciones cumplieron con este criterio, mientras que tres presentaron resultados negativos: San Luis Potosí (SMN), Santa María del Río (DGE) y Colonia Benito Juárez.

Tabla 3 Pruebas de homogeneidad e independencia Zona Centro

ZONA CENTRO SLP					
No	MUNICIPIOS	ESTACIONES	NOMBRE DE LA ESTACION	HOMOGENEIDAD	INDEPENDENCIA
	Ahualulco	-	-		
1	Armadillo de los infante	24004	ARMADILLO DE LOS INFANTE	NO	SI
	Cerro de San Pedro	-	-		
2	Mexquitic de Carmona	24061	RINCON DEL PORVENIR	SI	SI
3		24042	MEXQUITIC	SI	SI
4	San Luis Potosi	24070	SAN LUIS POTOSI (OBS)	SI	SI
5		24024	EL PEAJE	SI	SI
6		24111	SAN LUIS POTOSI (SMN)	NO	NO
7	Santa Maria del Rio	24046	OJO CALIENTE	SI	SI
8		24075	SANTA MARIA DEL RIO (DGE)	NO	NO
9	Soledad de Graciano Sanchez	24081	SOLEDAD DE GRACIANO	NO	SI
10		24153	COLONIA BENITO JUAREZ	NO	NO
11	Tierra Nueva	24093	TIERRA NUEVA	NO	SI
12	Villa de Arriaga	24100	VILLA DE ARRIAGA (DGE)	SI	SI
13		24078	SANTIAGO	NO	SI
	Villa de Pozos	-	-		
14	Villa de Reyes	24101	VILLA DE REYES	SI	SI
15	Zaragoza	24106	ZARAGOZA	SI	SI
16		24034	LA SALITRERA	NO	SI

De manera general, la independencia presentó un mayor cumplimiento que la homogeneidad en las series analizadas. Algunas estaciones, aunque no resultaron homogéneas, sí conservaron la condición de independencia, como Villa de Arriaga–Santiago, Tierra Nueva y La Salitrera, entre otras. Por otro lado, las estaciones San Luis Potosí (SMN), Santa María del Río (DGE) y Colonia Benito Juárez presentaron incumplimiento tanto en homogeneidad como en independencia, por lo que estos resultados deben considerarse al interpretar los análisis posteriores de variabilidad y tendencias climáticas.

Para la Zona Media como se observa en la (Tabla 4), de las 27 estaciones climatológicas evaluadas en la Zona Media, 13 presentaron series homogéneas y 14 mostraron resultados de no homogeneidad, lo que indica una distribución prácticamente equilibrada entre ambas condiciones. La falta de homogeneidad se presentó en estaciones pertenecientes a diferentes municipios,

particularmente en Ciudad del Maíz y Rioverde, donde se concentra un mayor número de estaciones analizadas.

Tabla 4 Pruebas de homogeneidad e independencia Zona Media

ZONA MEDIA SLP					
No	MUNICIPIOS	ESTACIONES	NOMBRE DE LA ESTACION	HOMOGENEIDAD	INDEPENDENCIA
1	Alaquines	24047	OJO DE AGUA	NO	SI
2	Cárdenas	24006	CARDENAS (DGE)	SI	SI
3	Cerritos	24008	CERRITOS	SI	SI
4	Ciudad del Maíz	24013	COLONIA ALVARO OBREGON	NO	SI
5		24195	LAS TABLAS	NO	NO
6		24159	LA MORITA	SI	NO
7		24190	LA LIBERTAD	NO	NO
8		24011	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	SI	SI
9		24174	PUERTO DE LOBOS	NO	SI
10		24049	PAPAGAYOS	NO	SI
11		24187	TEPEYAC	SI	SI
12		24068	SAN JUAN DEL MECO	NO	SI
13	Ciudad Fernández	24045	NOGAL OSCURO	SI	SI
	Lagunillas				
14	Rayón	24060	RAYON	SI	SI
15	Rioverde	24051	PASO DE SAN ANTONIO	SI	SI
16		24110	OJO DE AGUA SECO	NO	SI
17		24172	MANANTIAL DE MEDIA LUNA	NO	SI
18		24062	RIOVERDE (OBS)	SI	SI
19		24114	RIOVERDE (DGE)	SI	SI
20		24193	SAN JOSE DE TAPANCO	NO	SI
21		24097	VIGAS	NO	SI
22		24052	PASTORA	SI	SI
23	San Ciro de Acosta	24054	PEDRO MONTOYA	NO	SI
24	San Nicolás Tolentino	24071	SAN NICOLAS TOLENTINO	NO	NO
25	Santa Catarina	24136	TANLU	NO	SI
26	Villa Juárez	24130	GRANJENAL	SI	SI
27		24103	VILLA JUAREZ	SI	SI

En cuanto a la prueba de independencia, se observó un mayor cumplimiento, ya que 23 de las 27 estaciones presentaron series independientes, mientras que únicamente cuatro obtuvieron un resultado negativo: Las Tablas (24195), La Morita (24159), La Libertad (24190) y San Nicolás Tolentino (24071). De estas, Las Tablas, La Libertad y San Nicolás Tolentino presentaron

simultáneamente condiciones de no homogeneidad y no independencia, mientras que La Morita resultó homogénea, pero no independiente.

En términos generales, los resultados mostraron que la independencia constituye la condición de mayor cumplimiento en las series de la Zona Media, mientras que la homogeneidad presenta una mayor variabilidad entre estaciones.

1.2.2. Estimación y procesamiento de datos:

Los datos faltantes se estimaron usando métodos como el racional deductivo y el promedio aritmético de estaciones aledañas como lo indica la (Figura 8).

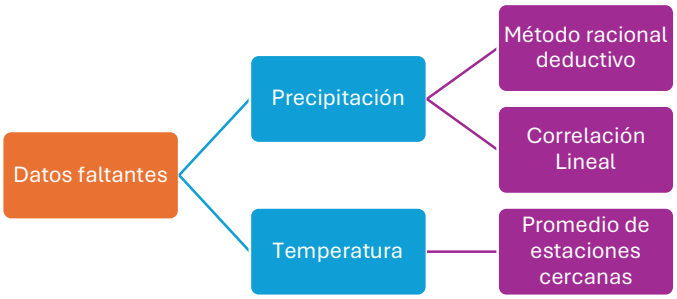


Figura 8 Métodos para estimar datos faltantes (Elaboración propia).

Los valores medios: Se calcularán mediante el método de isoyetas.

1.2.3. Análisis estadístico Mann Kendall:

El análisis de tendencias se aplicó mediante la prueba de Mann-Kendall (MK) para detectar tendencias y el método de Sen's slope para estimar la magnitud del cambio.

La prueba de Mann-Kendall es un método estadístico no paramétrico utilizado para identificar la presencia de tendencias monotónicas en series temporales, sin requerir que los datos sigan una distribución normal (Mann, 1945; Kendall, 1975). La hipótesis nula (H_0) establece que no existe

una tendencia significativa, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) indica la presencia de una tendencia.

Se calculó el estadístico S, basado en la comparación entre pares de datos.

$$s = \sum_{k-1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} sgn(x_j - x_k)$$

Posteriormente se calculó la varianza de S

$$VAR(S) = \frac{1}{18}\left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{q} t_p(t_p-1)(2t_p+5)\right]$$

El estadístico normalizado Z cuyo signo permitió identificar la dirección de la tendencia: Z > 0 indicó una tendencia creciente y Z < 0 una tendencia decreciente. La significancia estadística se evaluó con un nivel de α = 0.05.

$$Z = \frac{(S-1)}{\sqrt{var\,(s)}} \ldots\ldots\ldots\ldots Si\ S < 0$$

$$Z = 0 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots Si\ S = 0$$

$$Z = \frac{(S+1)}{\sqrt{var\,(s)}} \ldots\ldots\ldots\ldots Si\ S > 0$$

La (Figura 9) muestra la interfaz utilizada para el procesamiento de las series climatológicas mensuales y anuales durante el periodo de estudio, a partir de las cuales se calcularon los estadísticos de tendencia empleados en el análisis.

ANNUAL DATA

FI17 Virolahti 1987- 2000

CALCULATE TREND STATISTICS

Number of time series in the calculation:	13												
Number of annual values in the calculation:	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
Select the FIRST YEAR of the calculation:	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980	1980
Select the LAST YEAR of the calculation:	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022	2022

Year	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	13.35	14.7	18.7	20.1	24.3	22.9	22.4	22.3	21.1	18	15	13.4	18.85417
1981	11.1	14.7	17.9	20.2	23.2	22	20.8	20.8	19.9	19.3	16.2	15.8	18.49167
1982	15.9	16.9	20	23	23	23.8	21.4	21.7	20.3	18	15.8	13.2	19.41667
1983	11.9	14.8	17.6	20.4	25.4	23.9	19.9	20.7	20.2	18	17.6	15.6	18.83333
1984	12.5	13.5	19.1	22	21.4	21.7	19	19.5	17.8	19.3	15.4	15.1	18.025
1985	12	16.2	19.2	20.2	22	20.8	19	20.4	20.7	19.4	18.3	14.5	18.55833
1986	11.1	16.3	16.8	21.9	22.5	21.5	20	21.6	20.6	17.7	16.8	13.65	18.37083
1987	13.4	14.1	17.4	18.3	21.4	21.9	20.1	21.1	21.2	16.6	15.9	15.1	18.04167
1988	12.9	14.5	16.8	21.1	21.9	21.6	20.5	20.3	19.2	17.6	17.6	14.2	18.18333
1989	15.9	14.9	17	19.9	22.8	23.4	21.7	20.8	19.3	18	16.9	12.7	18.60833
1990	14.9	15.3	18.2	21.6	23.3	22.5	21.3	20.3	20	17.7	15.8	13.9	18.73333
1991	14.9	14.4	20.2	23.5	24.1	22.6	18.8	20.7	18.9	16.6	14	14.1	18.56667
1992	11.7	14.2	17.8	18.6	19.9	20.8	20.7	20.3	19.3	17.3	15.6	15.3	17.625
1993	14.9	17.5	17.2	20	21.8	20.9	20.5	20.5	19.8	17.8	15	14.9	18.4
1994	13.9	16	18.6	20	21.9	22	16.2	21.1	19.3	19.3	17.6	15.4	18.44167
1995	13.8	16.8	19.5	21.3	25.3	23.2	21.7	21.2	20.9	18.2	17.1	14.5	19.45833
1996	14.3	15.8	18.3	19.5	23	22.2	22.1	20.3	20.3	17.9	15.6	15	18.69167
1997	14.2	16.3	18.7	18.6	20.3	22.5	21.4	21.6	20.4	17.8	17.4	13.4	18.55
1998	14.6	16.8	18.3	21.6	24.3	24.6	22	21.9	21	19	17.4	14.6	19.675
1999	13.4	16.9	19.4	22.2	23.7	23.2	19.6	20.5	19.7	16.9	14.5	13	18.58333
2000	14.1	17	19.9	21	22.5	19.6	21.5	20.5	21	17.9	18.4	13	18.86667
2001	13.2	16.3	18.9	21.9	22.2	22.3	21.3	21.4	19.5	18.2	16.3	15.6	18.925
2002	14.6	13.8	19.2	21.2	23.1	22.8	21.5	21.8	20.1	20.4	15.6	14.1	19.01667
2003	12.7	18.3	20.2	22.5	25	23.5	21	21.5	20.9	19	17.4	13.3	19.60833
2004	13.8	14.6	18.8	20.3	22.1	20.7	21	21.4	20.4	19.6	17	13.1	18.56667
2005	14.5	16.2	18.6	20.7	22.6	24.3	22.3	21.6	20.2	18.9	16	14.4	19.19167

Figura 9 Hoja de cálculo para estimar el estadístico de Mann-Kendall, y el valor de la magnitud de cambio

1.2.4. Evaluación de la variabilidad climática de la Zona Centro

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de Mann-Kendall, así como los valores de magnitud de cambio. Se presenta el análisis a escala mensual y anual de las cuatro variables climáticas consideradas en el estudio: temperatura máxima, temperatura promedio, temperatura mínima y precipitación. En las (Tablas 5,6,7 y 8) correspondientes, los resultados que muestran una tendencia significativa de incremento en la magnitud de cambio se representan en color rojo, mientras que aquellos que presentan una tendencia significativa de decremento se indican en color azul, con el propósito de facilitar la interpretación de los patrones de variabilidad climática observados.

Tabla 5 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura máxima en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	ARMADILLO DE LOS INFANTE	24004	0.000	0.038	0.000	0.000	0.000	-0.040	0.000	0.065	0.000	0.000	-0.014	0.000	0.013
2	ZARAGOZA, VILLA DE ZARAGOZA	24106	0.053	0.107	0.050	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050	0.000	0.042	0.006	0.038	0.035
3	SOLEDAD, SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ	24081	0.000	0.000	-0.042	-0.032	0.000	-0.106	-0.056	0.000	-0.063	0.000	-0.017	0.000	-0.032
4	MEXQUITIC, MEXQUITIC DE CARMONA	24042	0.058	0.143	0.091	0.067	0.088	0.000	0.067	0.071	0.020	0.045	0.013	0.094	0.073
5	LA CONCORDIA, ARMADILLO DE LOS INFANTE	24061	0.039	0.050	0.031	0.000	0.000	-0.053	0.000	0.040	0.000	0.007	0.000	0.000	0.027
6	PRESA GOLONDRINAS, SAN NICOLAS TOLENTINO	24070	0.100	0.146	0.115	0.135	0.143	0.143	0.125	0.167	0.056	0.091	0.000	0.060	0.137
7	EL PEAJE, S.L. P	24024	0.000	0.047	0.049	0.040	0.053	-0.028	0.000	0.000	-0.043	0.000	-0.056	0.000	0.004
8	VILLA DE ARRIAGA, VILLA DE ARRIAGA (DGE)	24100	0.089	0.143	0.067	0.000	-0.056	-0.037	-0.048	-0.037	-0.146	0.000	0.067	0.032	0.032
9	SANTIAGO, VILLA DE ARRIAGA	24078	0.069	0.100	0.056	0.050	0.032	0.043	0.068	0.088	0.051	0.076	0.059	0.043	0.069

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
10	VILLA DE REYES, VILLA DE REYES	24101	-0.067	0.000	-0.043	-0.083	-0.111	-0.125	-0.143	-0.136	-0.150	-0.118	-0.077	-0.057	-0.089
11	TIERRA NUEVA, TIERRA NUEVA	24093	-0.050	-0.023	-0.045	-0.111	-0.069	-0.063	-0.050	-0.015	-0.076	-0.083	-0.056	-0.083	-0.059
12	OJO CALIENTE, VILLA DE REYES	24046	0.000	0.015	0.000	0.000	-0.014	-0.029	0.015	0.000	-0.029	-0.033	-0.019	-0.019	-0.006
13	LA SALITRERA, VILLA DE ZARAGOZA	24034	0.000	0.000	0.000	-0.038	-0.033	-0.063	-0.048	-0.056	-0.091	-0.091	0.000	-0.033	-0.038

Tabla 6 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura promedio en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	ARMADILLO DE LOS INFANTE	24004	-0.009	0.025	-0.006	0.000	-0.019	-0.019	0.011	0.000	-0.007	0.005	-0.022	-0.022	-0.003
2	ZARAGOZA, VILLA DE ZARAGOZA	24106	0.046	0.075	0.070	0.065	0.052	0.031	0.043	0.050	0.039	0.063	0.054	0.044	0.052
3	SOLEDAD , SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ	24081	0.000	0.000	-0.042	-0.032	0.000	-0.106	-0.056	0.000	-0.063	0.000	-0.017	0.000	-0.032

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
4	MEXQUITIC, MEXQUITIC DE CARMONA	24042	0.000	0.044	0.020	0.035	0.003	-0.008	0.026	0.000	0.005	0.000	-0.020	-0.007	0.005
5	LA CONCORDIA, ARMADILLO DE LOS INFANTE	24061	0.032	0.051	0.038	0.033	0.021	-0.006	0.006	0.015	0.017	0.026	0.000	0.019	0.007
6	PRESA GOLONDRINAS, SAN NICOLAS TOLENTINO	24070	0.076	0.113	0.073	0.100	0.091	0.078	0.105	0.087	0.045	0.067	0.038	0.040	0.067
7	EL PEAJE, S.L...P	24024	0.015	0.055	0.037	0.050	0.028	0.006	0.032	0.020	0.000	0.015	-0.017	0.000	0.019
8	VILLA DE ARRIAGA, VILLA DE ARRIAGA (DGE)	24100	0.083	0.117	0.104	0.076	0.019	0.012	0.022	0.024	0.012	0.070	0.095	0.069	0.058
9	SANTIAGO, VILLA DE ARRIAGA	24078	0.029	0.081	0.063	0.054	0.023	0.027	0.068	0.055	0.044	0.057	0.039	0.025	0.052
10	VILLA DE REYES, VILLA DE REYES	24101	0.003	0.030	0.008	-0.008	-0.032	-0.042	-0.057	-0.053	-0.034	-0.035	0.000	0.008	-0.019
11	TIERRA NUEVA, TIERRA NUEVA	24093	-0.067	-0.021	-0.047	-0.060	-0.053	-0.061	-0.065	-0.073	-0.043	-0.033	-0.053	-0.057	-0.049
12	OJO CALIENTE, VILLA DE REYES	24046	-0.010	0.006	-0.023	-0.013	-0.044	-0.033	-0.017	-0.024	-0.023	-0.019	-0.035	-0.008	-0.018
13	LA SALITRERA, VILLA DE ZARAGOZA	24034	-0.048	-0.029	-0.033	-0.037	-0.033	-0.050	-0.048	-0.057	-0.039	-0.056	-0.047	-0.016	-0.042

Tabla 7 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura mínima en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	ARMADILLO DE LOS INFANTE	24004	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
2	ZARAGOZA, VILLA DE ZARAGOZA	24106	0.008	0.047	0.086	0.182	0.122	0.143	0.130	0.105	0.148	0.128	0.050	0.038	0.114
3	SOLEDAD, SOLEDAD DE GRACIANO SÁNCHEZ	24081	0.000	0.000	0.037	0.000	-0.013	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.000	0.000	0.006
4	MEXQUITIC, MEXQUITIC DE CARMONA	24042	-0.088	-0.020	0.000	-0.050	-0.067	-0.056	-0.042	-0.026	0.000	-0.031	-0.042	-0.083	-0.050
5	LA CONCORDIA, ARMADILLO DE LOS INFANTE	24061	0.082	0.192	0.222	0.143	0.032	0.100	0.092	0.083	0.144	0.154	0.171	0.136	0.121
6	PRESA GOLONDRINAS, SAN NICOLÁS TOLENTINO	24070	-0.083	0.034	0.100	0.063	0.000	0.056	0.045	0.116	0.137	0.083	0.014	-0.032	0.043
7	EL PEAJE, S.L.P.	24024	-0.018	0.033	0.083	0.083	0.053	0.053	0.063	0.068	0.065	0.071	0.000	0.000	0.045
8	VILLA DE ARRIAGA, VILLA DE ARRIAGA (DGE)	24100	0.000	0.000	0.087	0.093	0.077	0.064	0.078	0.111	0.083	0.052	0.071	0.000	0.066
9	SANTIAGO, VILLA DE ARRIAGA	24078	0.000	0.050	0.018	0.048	0.000	0.012	0.044	0.063	0.056	0.056	0.000	-0.015	0.050

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
10	VILLA DE REYES, VILLA DE REYES	24101	0.016	0.056	0.118	0.058	0.028	0.043	0.043	0.073	0.067	0.000	0.022	0.056	0.055
11	TIERRA NUEVA, TIERRA NUEVA	24093	-0.100	-0.033	0.015	-0.067	-0.042	-0.063	-0.057	-0.063	-0.020	-0.088	-0.076	-0.036	-0.059
12	OJO CALIENTE, VILLA DE REYES	24046	0.025	0.023	0.079	0.020	-0.024	-0.019	-0.012	0.000	0.000	0.000	-0.039	0.000	0.007
13	LA SALITRERA, VILLA DE ZARAGOZA	24034	0.000	0.000	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.000	-0.015	0.005	0.004

Tabla 8 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación en la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia)

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(mm/Año)
1	ARMADILLO DE LOS INFANTE	24004	-0.068	-0.083	0.211	-0.256	-0.468	0.281	-1.474	0.500	0.900	0.125	0.111	-0.094	-0.054
2	ZARAGOZA, VILLA DE ZARAGOZA	24106	0.000	0.000	0.000	-0.174	-0.287	0.591	0.071	0.688	0.939	-0.077	0.000	0.000	0.123
3	SOLEDAD, SOLEDAD DE GRACIANO SANCHEZ	24081	-0.167	0.000	0.000	-0.300	-0.606	-0.043	-0.218	0.164	0.526	-0.335	-0.026	0.000	-0.048

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(mm/Año)
4	MEXQUITIC, MEXQUITIC DE CARMONA	24042	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.503	0.528	-0.614	0.943	1.573	-0.007	0.000	-0.080	0.112
5	LA CONCORDIA, ARMADILLO DE LOS INFANTE	24061	0.000	0.000	0.000	-0.148	-0.665	0.128	0.000	0.347	1.071	-0.077	0.135	0.000	0.084
6	PRESA GOLONDRINAS, SAN NICOLÁS TOLENTINO	24070	0.000	0.000	0.026	-0.489	0.263	0.673	0.677	-0.530	1.146	0.375	0.000	0.000	0.041
7	EL PEAJE, S.L. P	24024	-0.100	0.000	0.000	-0.217	-0.593	0.986	-0.100	1.000	1.030	-0.050	0.000	0.000	0.131
8	VILLA DE ARRIAGA, VILLA DE ARRIAGA (DGE)	24100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.479	0.276	0.285	1.157	-0.159	0.000	0.000	0.047
9	SANTIAGO, VILLA DE ARRIAGA	24078	-0.548	0.000	0.024	-0.089	0.263	0.251	0.525	-0.247	1.050	0.000	0.106	0.000	-0.232
10	VILLA DE REYES, VILLA DE REYES	24101	-0.125	0.000	0.000	-0.159	0.001	0.666	0.374	0.441	0.248	-0.368	0.000	0.000	0.144
11	TIERRA NUEVA, TIERRA NUEVA	24093	0.000	0.000	0.000	-0.046	0.284	1.189	0.200	0.600	1.100	0.526	0.048	0.000	0.396
12	OJO CALIENTE, VILLA DE REYES	24046	-0.071	0.000	0.000	-0.231	-0.310	1.023	0.044	0.305	1.193	-0.227	-0.046	-0.047	0.162
13	LA SALITRERA, VILLA DE ZARAGOZA	24034	-0.073	-0.046	0.000	-0.300	-0.296	0.115	-0.033	-0.032	-0.414	0.102	0.167	-0.053	-0.059

Los resultados de la prueba de Mann-Kendall mostraron un comportamiento espacial variable de las tendencias de temperatura en la Zona Centro. Se identificaron tanto tendencias positivas como negativas entre las estaciones analizadas; sin embargo, en distintas áreas predominaron magnitudes de cambio positivas, lo que indicó un incremento de la temperatura durante el periodo de estudio. La intensidad y dirección de estos cambios no fueron uniformes en toda la región, evidenciando diferencias espaciales entre las estaciones y entre las variables de temperatura máxima, mínima y promedio.

Al comparar las tres variables analizadas, la temperatura máxima presentó las mayores magnitudes de cambio, alcanzando valores positivos más elevados en distintas estaciones de la región. La temperatura promedio mostró magnitudes de cambio intermedias, mientras que la temperatura mínima presentó cambios de menor magnitud y una mayor presencia de valores negativos en algunos sectores.

Por su parte, la precipitación presentó un comportamiento más variable, con tendencias tanto positivas como negativas entre las estaciones y los diferentes meses analizados. A diferencia de la temperatura, no se observó un patrón espacial uniforme de incremento o disminución en toda la Zona Centro, lo que evidenció una mayor variabilidad en el comportamiento de la precipitación durante el periodo de estudio.

A continuación, se representó espacialmente la magnitud de cambio de las temperaturas máxima, promedio y mínima en la Zona Centro en las (Figuras 10,11 y 12). En los mapas, la magnitud de cambio se representó mediante una escala de colores, en la que las tonalidades más claras correspondieron a los valores menores, mientras que las tonalidades naranjas y rojizas indicaron magnitudes de cambio progresivamente mayores. Esta representación permitió identificar la distribución espacial de los cambios registrados y las diferencias entre las estaciones analizadas durante el periodo de estudio

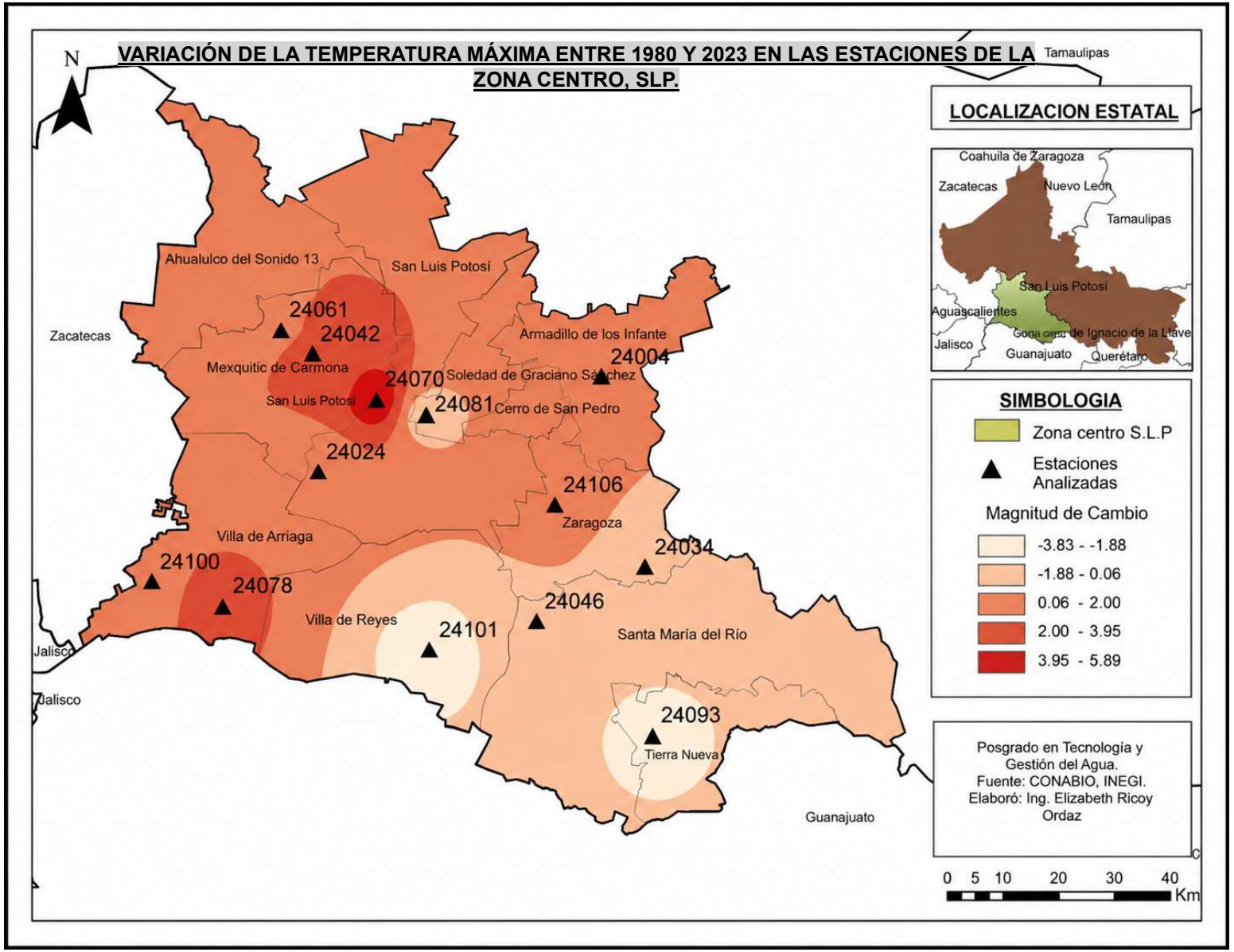


Figura 10 Variación de la temperatura máxima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

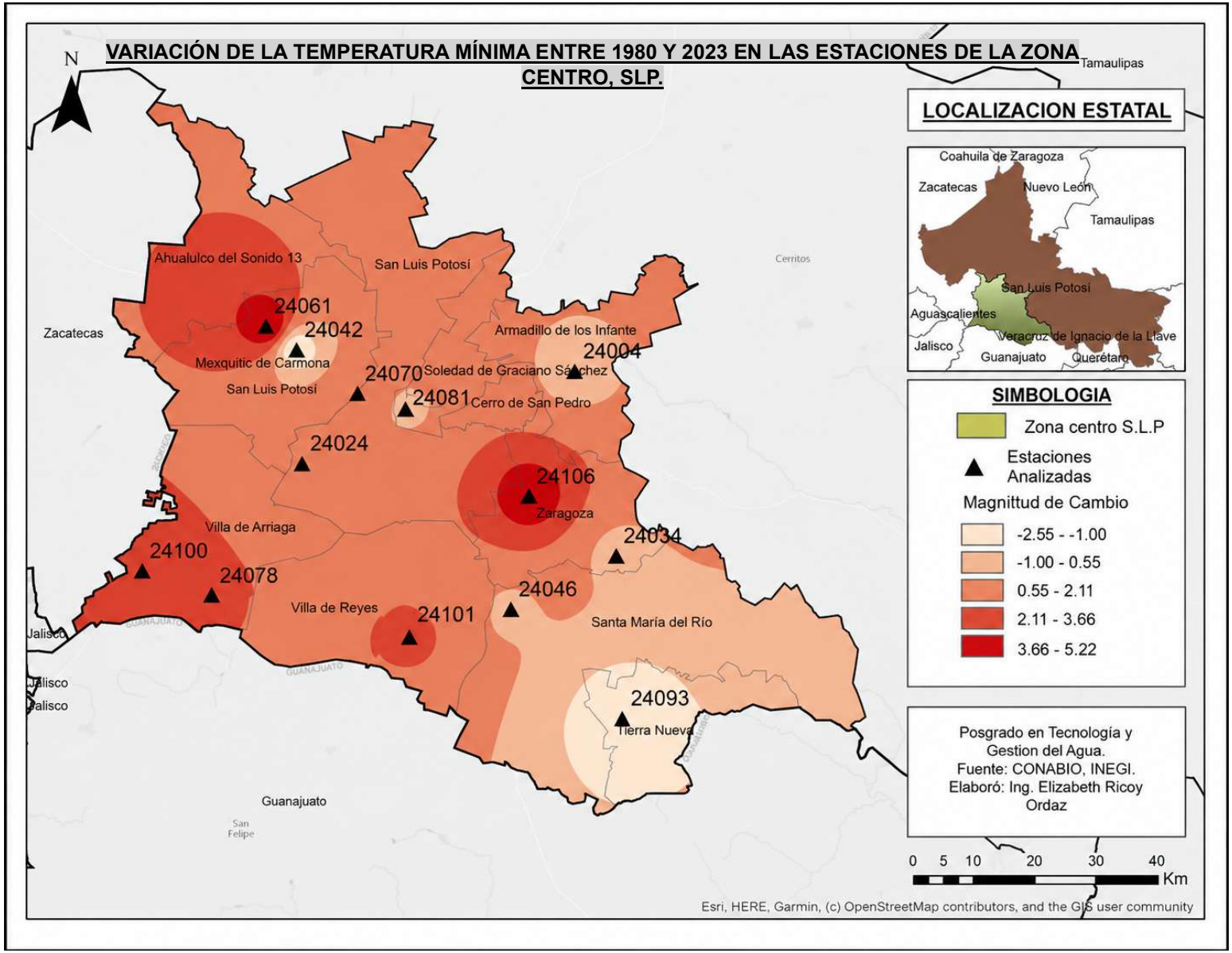


Figura 11 Variación de la temperatura mínima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

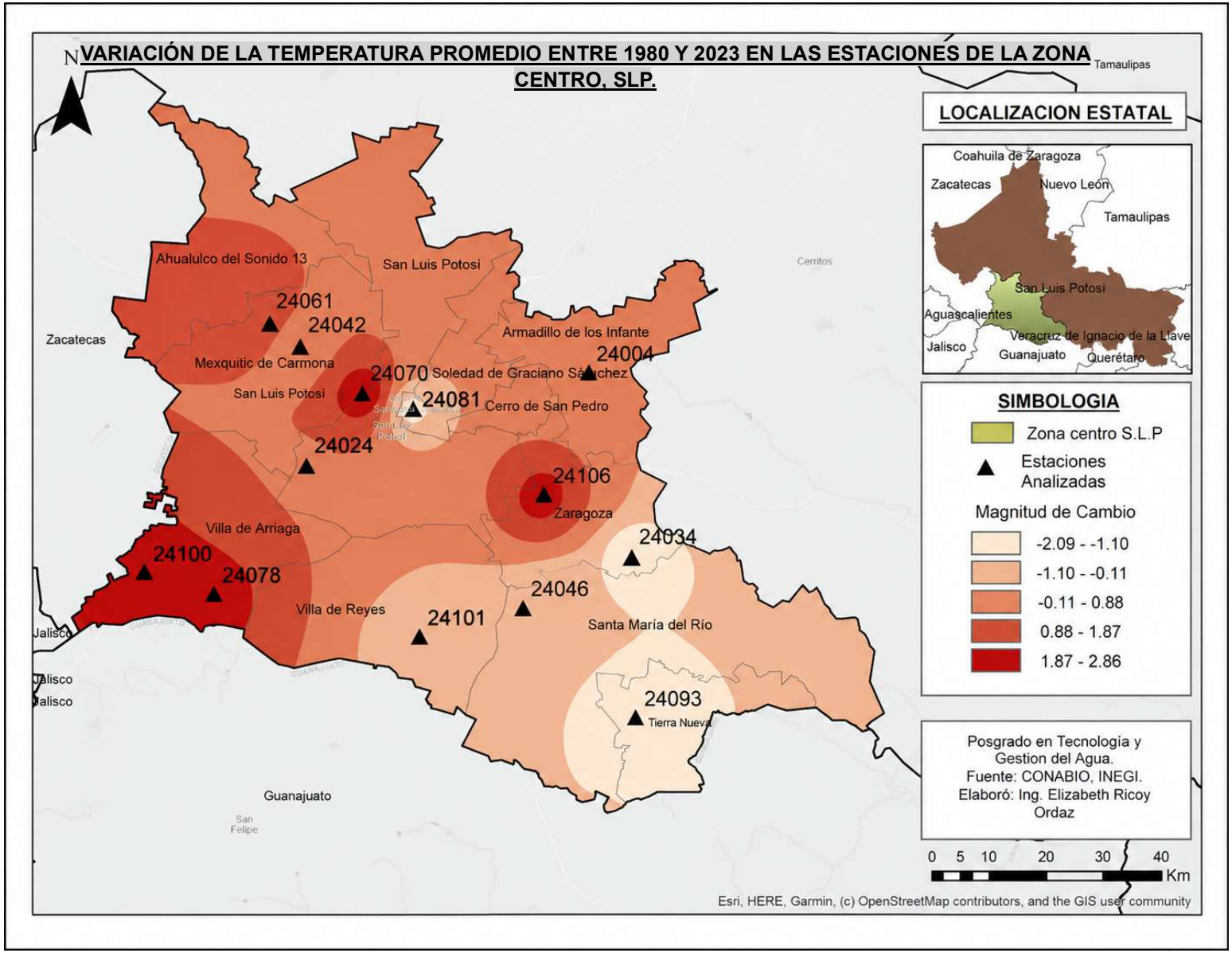


Figura 12 Variación de la temperatura promedio entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia)

1.2.5. Evaluación de la variabilidad climática de la Zona Media

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de Mann-Kendall, así como los valores de magnitud de cambio. Se presenta el análisis a escala mensual y anual de las cuatro variables climáticas consideradas en el estudio: temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. En las (Tablas 9, 10 11 y 12) correspondientes, los resultados que muestran una tendencia significativa de incremento en la magnitud de cambio se representan en color rojo, mientras que aquellos que presentan una tendencia significativa de decremento se indican en color azul, con el propósito de facilitar la interpretación de los patrones de variabilidad climática observados.

Tabla 9 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura máxima en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	OJO DE AGUA	24047	0.000	-0.016	0.000	0.000	-0.077	-0.061	-0.005	0.000	0.000	0.000	-0.029	0.000	-0.057
2	CARDENAS (DGE)	24006	0.107	0.096	0.071	0.043	0.000	0.008	0.079	0.096	0.076	0.132	0.093	0.100	0.070
3	CERRITOS	24008	0.068	0.138	0.200	0.143	0.143	0.103	0.118	0.132	0.075	0.083	0.027	0.046	0.114
4	COLONIA ALVARO OBREGON	24013	0.057	0.091	0.042	0.000	0.000	-0.049	-0.044	0.000	-0.058	-0.034	-0.034	0.000	-0.008
5	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	24011	-0.030	0.053	0.000	0.015	-0.029	-0.067	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032	0.000	0.010
6	PUERTO DE LOBOS	24174	0.100	0.055	0.000	0.000	-0.010	0.000	0.083	0.047	0.071	0.045	0.043	0.067	0.029
7	PAPAGAYOS	24049	0.042	0.036	0.026	0.018	0.000	0.035	0.081	0.077	0.056	0.064	0.000	0.000	0.038
8	TEPEYAC	24187	0.076	0.139	0.109	0.115	0.080	0.129	0.143	0.143	0.188	0.180	0.130	0.112	0.124
9	SAN JUAN DEL MECO	24068	0.081	0.100	0.040	0.056	0.031	0.063	0.125	0.136	0.125	0.147	0.107	0.138	0.108
10	NOGAL OSCURO	24045	0.066	0.100	0.043	0.018	0.036	0.071	0.111	0.103	0.065	0.066	0.058	0.069	0.070

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
11	RAYON	24060	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050	0.069	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.013
12	PASO DE SAN ANTONIO	24051	-0.064	-0.016	0.000	-0.027	0.000	0.000	0.056	0.024	-0.019	-0.001	-0.056	0.000	-0.023
13	OJO DE AGUA SECO	24110	0.020	0.000	0.014	0.000	0.000	0.027	0.071	0.055	0.014	0.000	-0.031	0.000	0.024
14	MANANTIAL DE MEDIALUNA	24172	-0.065	0.000	0.000	0.000	-0.024	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.083	-0.071	-0.017
15	RIOVERDE (DGE)	24114	0.038	0.085	0.070	0.071	0.060	0.011	0.063	0.061	0.013	0.042	0.018	0.049	0.049
16	SAN JOSE DE TAPANCO	24193	-0.040	0.000	-0.018	0.000	0.000	0.000	0.026	0.017	0.031	0.025	-0.016	0.000	-0.004
17	VIGAS	24097	0.000	0.048	0.027	0.000	0.000	0.033	0.050	0.050	0.000	0.013	0.000	-0.024	0.017
18	PASTORA	24052	0.087	0.100	0.030	0.071	0.039	0.016	0.050	0.046	0.000	0.087	0.054	0.091	0.063
19	PEDRO MONTOYA	24054	0.053	0.125	0.083	0.063	0.067	0.057	0.083	0.091	0.067	0.091	0.036	0.030	0.072
20	VILLA JUAREZ	24103	0.012	0.073	0.100	0.100	0.160	0.091	0.125	0.149	0.125	0.072	0.000	0.020	0.091

Tabla 10 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura mínima en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	OJO DE AGUA	24047	0.000	0.000	0.042	0.000	-0.021	0.000	0.000	0.028	0.083	0.021	0.040	0.000	0.017
2	CARDENAS (DGE)	24006	0.000	0.059	0.044	0.023	0.000	0.037	0.053	0.048	0.066	0.071	0.048	0.040	0.042
3	CERRITOS	24008	0.000	0.044	0.054	0.053	0.000	0.000	0.045	0.063	0.019	0.000	0.000	0.000	0.053
4	COLONIA ALVARO OBREGON	24013	0.000	0.000	-0.012	-0.075	-0.071	-0.042	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.024
5	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	24011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.028	0.000	0.041	0.030	0.029	0.045	0.003
6	PUERTO DE LOBOS	24174	0.194	0.167	0.214	0.111	0.000	0.000	0.027	0.000	0.044	0.094	0.083	0.121	0.088
7	PAPAGAYOS	24049	-0.021	-0.013	-0.019	-0.039	-0.125	-0.067	-0.046	-0.037	0.000	-0.061	0.000	-0.038	-0.049
8	TEPEYAC	24187	0.000	0.000	0.045	0.042	0.032	0.106	0.090	0.091	0.083	0.036	0.000	0.000	0.040
9	SAN JUAN DEL MECO	24068	0.071	0.077	0.083	0.000	-0.036	0.000	0.000	-0.044	-0.014	0.000	0.000	0.051	0.015
10	NOGAL OSCURO	24045	-0.012	0.047	0.083	0.013	0.020	0.000	0.019	0.000	0.036	0.070	0.041	0.005	0.041

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
11	RAYON	24060	0.000	0.000	0.129	0.065	0.000	0.000	0.000	0.000	0.065	0.059	0.059	0.045	0.037
12	PASO DE SAN ANTONIO	24051	-0.095	-0.005	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.018	-0.023
13	OJO DE AGUA SECO	24110	0.031	0.052	0.059	0.000	-0.038	0.000	0.000	0.000	0.048	0.023	0.046	0.000	0.021
14	MANANTIAL DE MEDIALUNA	24172	-0.059	-0.059	0.000	-0.040	-0.075	-0.071	-0.071	-0.050	0.000	-0.022	0.000	-0.048	-0.042
15	RIOVERDE (DGE)	24114	0.055	0.029	0.031	0.029	-0.004	0.013	0.026	0.031	0.032	0.035	0.051	0.030	0.036
16	SAN JOSE DE TAPANCO	24193	0.039	0.000	0.111	0.071	0.040	0.052	0.059	0.066	0.093	0.056	0.015	0.071	0.071
17	VIGAS	24097	0.042	0.000	0.096	0.026	0.000	0.012	0.038	0.015	0.054	0.030	0.036	0.083	0.034
18	PASTORA	24052	-0.048	-0.068	0.000	0.000	0.016	0.052	0.050	0.063	0.083	0.038	0.000	-0.020	0.023
19	PEDRO MONTOYA	24054	0.000	0.000	0.091	0.049	0.000	0.000	0.000	0.025	0.060	0.040	0.000	0.053	0.037
20	VILLA JUAREZ	24103	0.069	0.028	0.106	0.060	0.038	0.049	0.000	0.000	0.047	0.077	0.097	0.047	0.056

Tabla 11 Resultados de la prueba de Mann-Kendall y magnitud de cambio de la temperatura promedio en la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia)

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
1	OJO DE AGUA	24047	0.000	0.011	0.012	0.000	-0.031	-0.003	0.017	0.014	0.015	0.024	0.002	0.029	0.016
2	CARDENAS (DGE)	24006	0.054	0.092	0.046	0.058	0.036	0.030	0.055	0.052	0.045	0.050	0.051	0.063	0.048
3	CERRITOS	24008	0.050	0.093	0.118	0.103	0.089	0.058	0.086	0.086	0.050	0.053	0.018	0.060	0.078
4	COLONIA ALVARO OBREGON	24013	-0.018	-0.027	-0.029	-0.050	-0.026	-0.054	-0.045	-0.043	-0.039	-0.037	-0.045	0.000	-0.038
5	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	24011	-0.033	0.023	0.000	0.011	-0.017	-0.037	0.000	-0.018	-0.015	0.012	-0.026	0.026	-0.007
6	PUERTO DE LOBOS	24174	0.072	0.038	0.041	-0.006	-0.064	-0.056	-0.040	-0.050	-0.028	0.000	0.013	0.021	0.005
7	PAPAGAYOS	24049	0.001	0.004	0.013	0.000	-0.022	-0.025	-0.007	-0.007	-0.013	0.000	-0.018	0.005	-0.005
8	TEPEYAC	24187	0.030	0.054	0.085	0.100	0.089	0.092	0.104	0.100	0.100	0.112	0.047	0.050	0.077
9	SAN JUAN DEL MECO	24068	0.050	0.056	0.028	0.010	-0.020	-0.020	0.001	0.003	-0.001	0.028	0.011	0.031	0.019
10	NOGAL OSCURO	24045	0.006	0.079	0.052	0.033	0.028	0.028	0.050	0.034	0.037	0.055	0.037	0.038	0.050

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(°C/Año)
11	RAYON	24060	0.000	0.030	0.019	0.025	0.010	0.009	0.024	0.017	0.000	0.004	0.000	0.021	0.010
12	PASO DE SAN ANTONIO	24051	-0.108	-0.040	-0.045	-0.006	-0.013	-0.013	0.013	-0.009	-0.013	-0.030	-0.060	-0.057	-0.036
13	OJO DE AGUA SECO	24110	0.024	0.026	0.006	0.013	-0.015	0.000	0.022	0.020	0.017	0.015	-0.003	0.000	0.011
14	MANANTIAL DE MEDIALUNA	24172	-0.053	-0.014	-0.046	-0.033	-0.045	-0.050	-0.019	-0.028	-0.038	-0.036	-0.063	-0.060	-0.045
15	RIOVERDE (DGE)	24114	0.027	0.054	0.033	0.052	0.033	0.013	0.038	0.018	0.017	0.020	0.000	0.018	0.029
16	SAN JOSE DE TAPANCO	24193	0.006	0.033	0.040	0.035	0.031	0.026	0.048	0.032	0.031	0.021	-0.010	0.039	0.029
17	VIGAS	24097	0.019	0.032	0.009	0.025	0.016	0.005	0.030	0.025	0.009	0.003	-0.016	0.016	0.015
18	PASTORA	24052	0.025	0.056	0.054	0.072	0.080	0.059	0.070	0.076	0.067	0.078	0.046	0.048	0.062
19	PEDRO MONTOYA	24054	0.027	0.052	0.056	0.058	0.043	0.022	0.041	0.048	0.047	0.040	0.012	0.035	0.041
20	VILLA JUAREZ	24103	0.057	0.077	0.100	0.100	0.100	0.064	0.067	0.074	0.070	0.050	0.052	0.070	0.076

Tabla 12 Variación de la Precipitación entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(mm/Año)
1	OJO DE AGUA	24047	0.064	-0.099	0.344	0.000	-0.711	1.266	-1.268	0.309	0.262	0.849	0.501	-0.066	0.236
2	CARDENAS (DGE)	24006	-0.085	-0.056	0.000	0.000	-0.419	0.194	-0.604	0.458	0.172	-0.097	0.273	-0.056	-0.007
3	CERRITOS	24008	-0.106	-0.013	0.083	-0.840	-0.441	0.500	-0.136	0.265	1.693	0.193	0.094	-0.106	0.071
4	COLONIA ALVARO OBREGON	24013	0.000	0.000	0.000	-0.038	0.017	0.690	0.268	0.551	0.438	0.224	0.071	0.000	0.156
5	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	24011	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.336	0.471	-1.119	0.555	-0.700	0.000	0.000	-0.197	-0.206
6	PUERTO DE LOBOS	24174	0.000	-0.130	-0.109	0.000	-0.437	-0.231	-1.729	-0.455	-2.623	-0.002	0.000	-0.043	-0.827
7	PAPAGAYOS	24049	-0.596	-0.175	-0.064	-0.043	-1.158	1.664	-0.095	0.301	0.682	0.727	0.243	-0.200	-0.286
8	TEPEYAC	24187	-0.101	0.000	0.000	-0.157	-0.691	-0.602	-0.823	-0.400	-0.792	-0.500	-0.060	-0.071	-0.385
9	SAN JUAN DEL MECO	24068	0.000	0.000	0.000	0.000	0.298	0.888	-0.292	0.308	0.364	0.401	0.439	0.000	0.131
10	NOGAL OSCURO	24045	-0.158	-0.100	-0.006	-0.360	-0.331	0.354	-1.048	0.032	-0.155	-0.359	0.070	-0.299	-0.110

No	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(Mes/Año)												(mm/Año)
11	RAYON	24060	-0.089	0.000	0.000	-0.167	-0.611	-0.206	-1.387	-0.500	-1.956	-0.186	0.188	-0.102	-0.588
12	PASO DE SAN ANTONIO	24051	0.000	0.000	0.000	-0.313	-0.400	0.778	-0.078	0.353	0.406	-0.219	0.000	0.000	0.035
13	OJO DE AGUA SECO	24110	0.000	-0.050	0.000	0.000	-0.783	0.758	-0.494	-0.337	0.064	0.399	0.243	-0.222	0.002
14	MANANTIAL DE MEDIALUNA	24172	-0.126	0.000	0.000	-0.080	-0.724	0.487	-0.388	0.713	0.364	0.639	0.158	-0.063	0.044
15	RIOVERDE (DGE)	24114	-0.076	-0.045	0.041	-0.200	-0.348	1.055	-0.417	0.162	0.088	0.196	0.145	-0.015	0.048
16	SAN JOSE DE TAPANCO	24193	0.000	0.000	0.000	-0.214	-0.093	0.760	-0.313	0.602	0.667	0.371	0.146	0.000	0.192
17	VIGAS	24097	-0.045	-0.044	0.011	-0.028	-0.919	0.469	-0.639	-0.145	-0.997	0.339	0.241	0.000	-0.193
18	PASTORA	24052	0.000	-0.085	0.000	-0.258	-0.026	0.335	-0.825	-0.227	0.083	-0.333	-0.065	-0.163	-0.225
19	PEDRO MONTOYA	24054	-0.050	-0.049	0.031	0.142	0.069	0.862	0.176	0.319	0.032	1.057	0.339	0.025	0.080
20	VILLA JUAREZ	24103	-0.079	0.000	0.000	-0.363	-0.542	-0.090	-0.969	0.458	0.310	-0.246	0.309	0.029	-0.096

Los resultados de la prueba de Mann-Kendall mostraron un comportamiento espacial variable de las tendencias de temperatura en la Zona Media. Se identificaron magnitudes de cambio tanto positivas como negativas entre las estaciones analizadas; sin embargo, en una parte importante de la región predominaron los valores positivos, lo que indicó incrementos de temperatura durante el periodo de estudio. La magnitud y dirección de los cambios variaron entre las estaciones, evidenciando diferencias espaciales en el comportamiento de las temperaturas máxima, promedio y mínima.

Al comparar las tres variables de temperatura, la temperatura máxima presentó las mayores magnitudes de cambio, con los valores positivos más elevados en diferentes sectores de la Zona Media. La temperatura promedio presentó magnitudes intermedias, mientras que la temperatura mínima mostró, en términos generales, cambios de menor magnitud y la presencia de valores negativos en algunas estaciones. Asimismo, la distribución espacial mostró que los incrementos de temperatura no se presentaron con la misma intensidad en toda la región, sino que existieron sectores con cambios más pronunciados.

Por su parte, la precipitación presentó un comportamiento más variable, con tendencias positivas y negativas entre estaciones y meses. A diferencia de las variables de temperatura, no se identificó un patrón espacial uniforme de incremento o disminución para toda la Zona Media, lo que reflejó diferencias en el comportamiento de la precipitación entre los distintos sectores de la región durante el periodo analizado.

A continuación, se representó espacialmente la magnitud de cambio de las temperaturas máxima, promedio y mínima en la Zona Media (Figuras 13,14 y 15). En los mapas, las tonalidades más claras correspondieron a las menores magnitudes de cambio, incluyendo los valores negativos, mientras que las tonalidades naranjas y rojizas representaron magnitudes positivas progresivamente mayores. Esta representación permitió identificar las áreas donde los cambios fueron más pronunciados y reconocer las diferencias espaciales entre las estaciones analizadas durante el periodo de estudio.

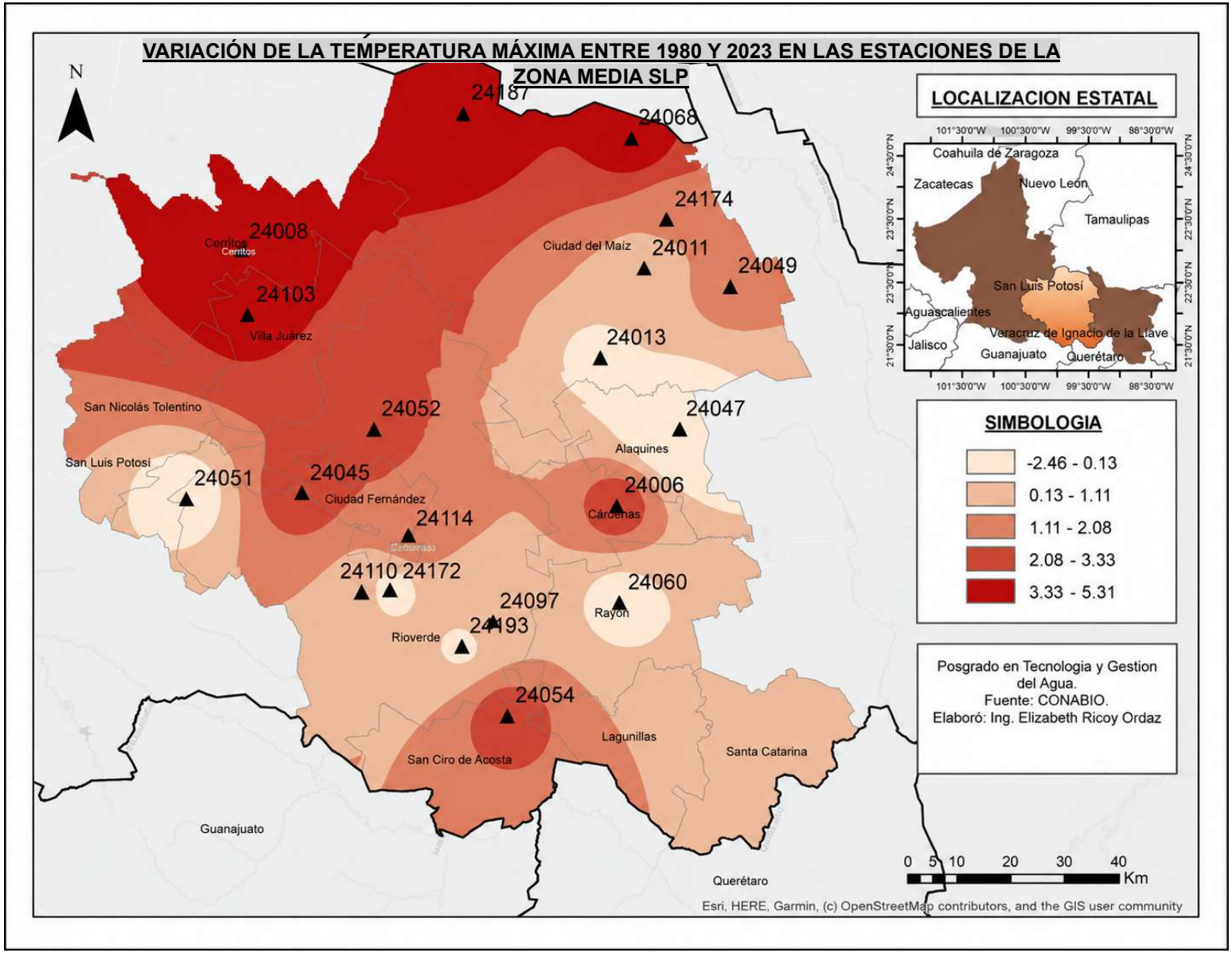


Figura 13 Variación de la temperatura máxima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia)

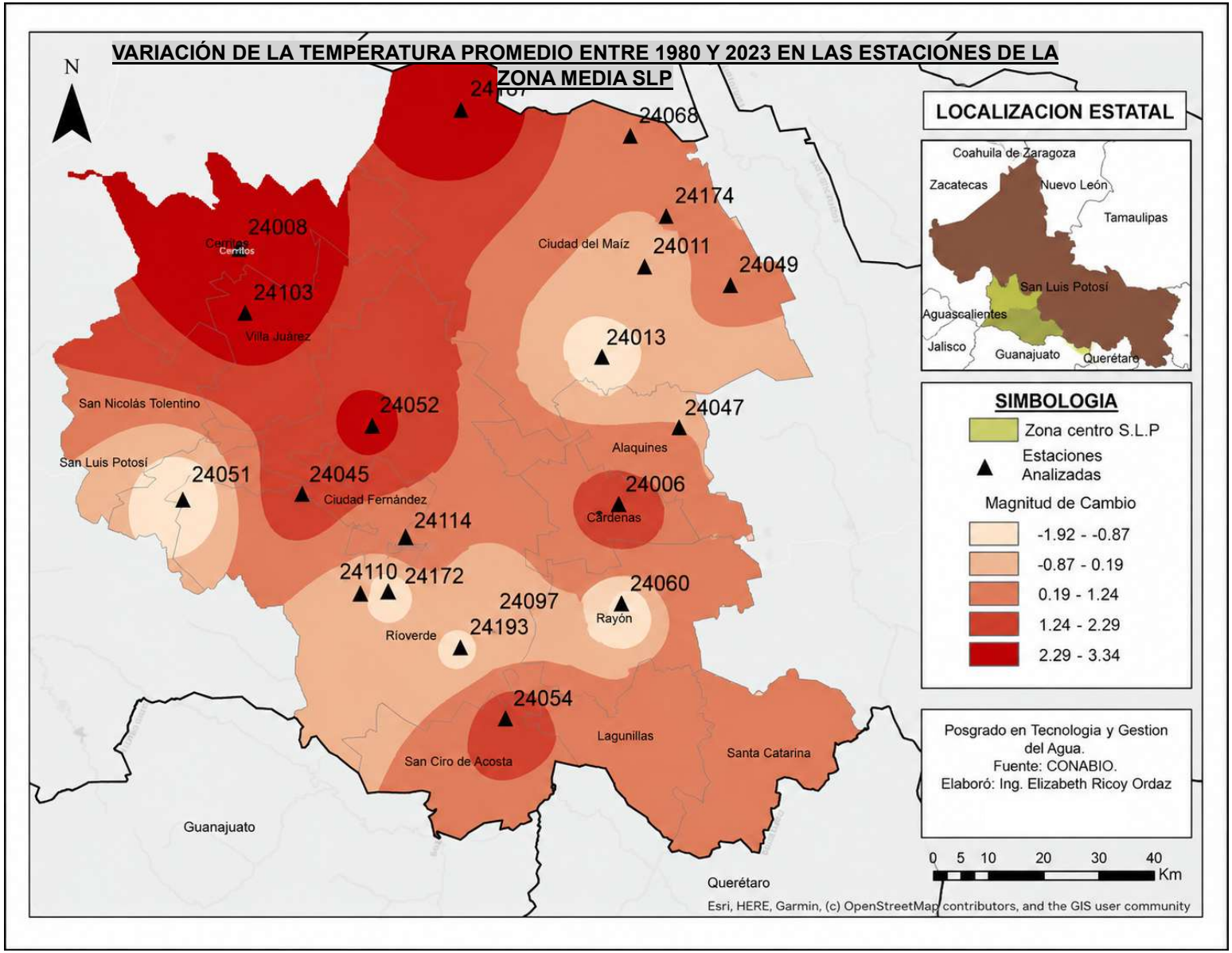


Figura 14 Variación de la temperatura Promedio entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

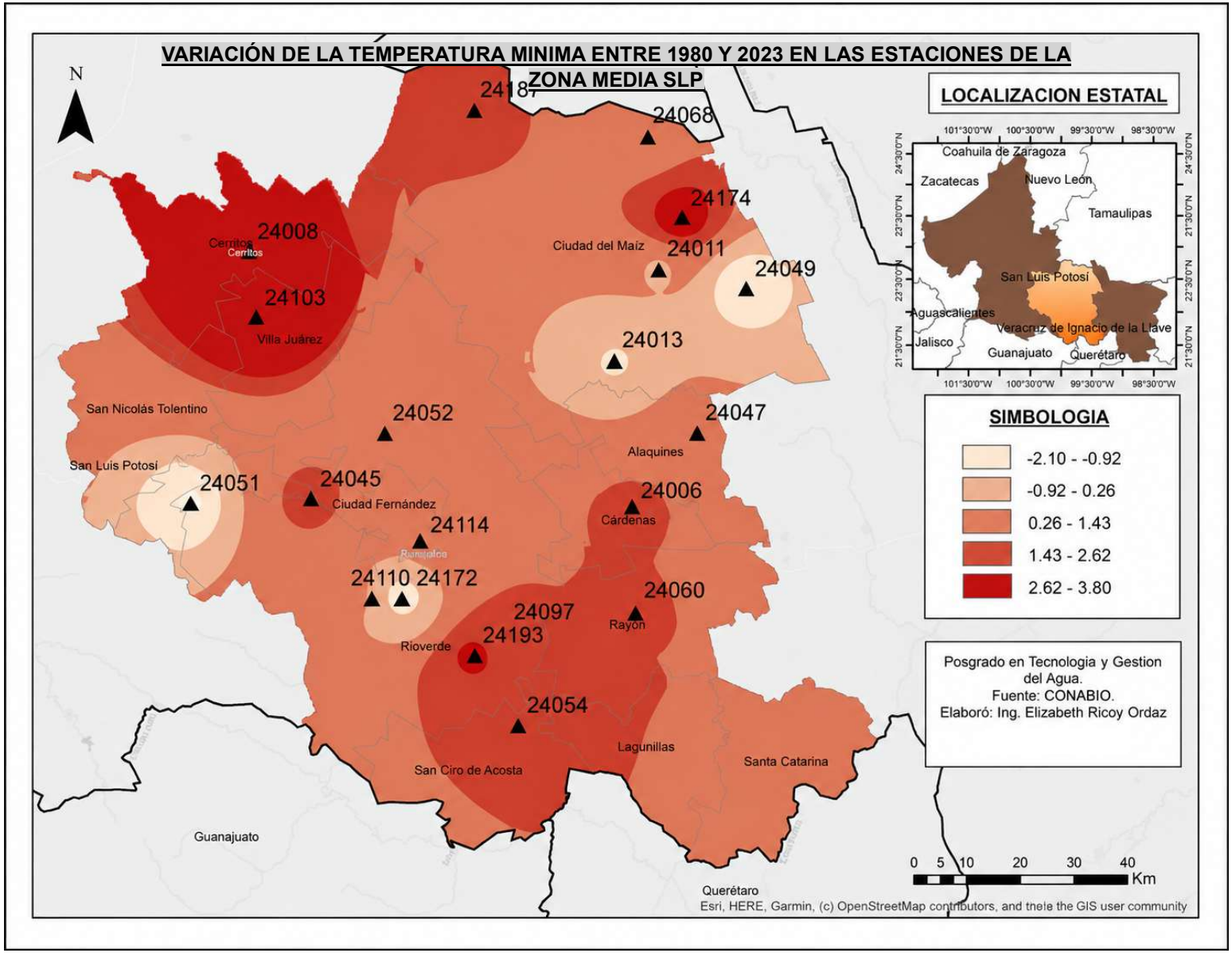


Figura 15 Variación de la temperatura mínima entre 1980 y 2023 en las estaciones de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

2. ANÁLISIS DE SEQUÍA EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ.

La sequía constituye un fenómeno climático caracterizado por condiciones persistentes de déficit hídrico que pueden generar efectos sobre la disponibilidad de agua, la agricultura, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas. Cuando el déficit de precipitación se prolonga, sus efectos pueden reflejarse en la disminución de los niveles de ríos, embalses y aguas subterráneas, por lo que su identificación y monitoreo resultan relevantes para la gestión de los recursos hídricos

2.1. Índice de precipitación estandarizado (SPI):

Para la evaluación de la sequía se empleó el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), desarrollado por McKee *et al.* (1993). Este índice permitió cuantificar las condiciones de déficit o exceso de precipitación y analizar periodos secos y húmedos en diferentes escalas temporales. Una de sus principales características es que utiliza únicamente datos de precipitación para su cálculo, lo que facilita su aplicación y comparación entre diferentes periodos y regiones (McKee *et al.*, 1993; OMM, 2012). El Servicio Meteorológico Nacional también emplea el SPI como uno de los indicadores para el monitoreo de las condiciones de sequía en México.

El cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado se basó en el ajuste de los registros de precipitación a una distribución de probabilidad y su posterior transformación a una distribución normal estandarizada. De acuerdo con McKee *et al.* (1993) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2012), tradicionalmente se emplea la distribución gamma para representar la precipitación acumulada. Su función de densidad de probabilidad se expresa como:

$$g(x) = \frac{1}{\left(\beta\alpha\Gamma(\alpha)\right)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

donde x es la precipitación, α es el parámetro de forma, β es el parámetro de escala y Γ(alpha) es la función gamma.

Los parámetros de la distribución se estiman comúnmente mediante el método de máxima verosimilitud:

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{\left(1 + \left(\frac{4A}{3}\right)\right)}\right)$$

donde:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n}\sum \ln(xi)$$

y $\bar{x}$ es la media de la precipitación y n el número de datos.

Posteriormente, la función de distribución acumulada se obtiene integrando la función gamma:

$$G(x) = \int_0^x g(t)\,dt$$

Dado que la precipitación puede incluir valores cero, se realiza un ajuste:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

donde q es la probabilidad de ocurrencia de valores cero.

Finalmente, el SPI se obtiene transformando la probabilidad acumulada H(x) a una distribución normal estándar con media cero y desviación estándar uno:

$$SPI = \Phi^{-1}(H(x))$$

donde Φ^{-1} es la función inversa de la distribución normal estándar.

Los valores del SPI se interpretaron de acuerdo con la clasificación propuesta por McKee *et al.* (1993), en la cual los valores cercanos a cero representan condiciones próximas a la normalidad, los valores negativos indican condiciones secas y los positivos condiciones húmedas. En particular, los valores entre −1.00 y −1.49 corresponden a sequía moderada, entre −1.50 y −1.99 a sequía severa y los valores iguales o inferiores a −2.00 a sequía extrema (McKee *et al.*, 1993).

Las ecuaciones anteriores describen el fundamento matemático del SPI. Para el presente estudio, el cálculo del índice se realizó mediante el software DRINC, utilizando una escala temporal de 12 meses (SPI-12).

Para el presente estudio, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) se utilizó para evaluar las condiciones de sequía en las zonas Media y Centro del estado de San Luis Potosí. Para ello, se recopilaron los registros históricos de precipitación correspondientes a las estaciones climatológicas seleccionadas dentro de ambas zonas de estudio. Posteriormente, la información se organizó y depuró en hojas de cálculo para facilitar su procesamiento y análisis.

Una vez organizadas las series de precipitación, se procedió al cálculo del SPI en una escala temporal de 12 meses (SPI-12) mediante el programa computacional DRINC, (Figura 16) El uso de esta escala permitió analizar el comportamiento de la precipitación acumulada durante periodos prolongados e identificar la ocurrencia e intensidad de condiciones secas y húmedas a lo largo del periodo de estudio. Los valores obtenidos se interpretaron de acuerdo con la clasificación propuesta por McKee *et al.* (1993), considerando la magnitud y el signo del índice para determinar las diferentes categorías de humedad y sequía.

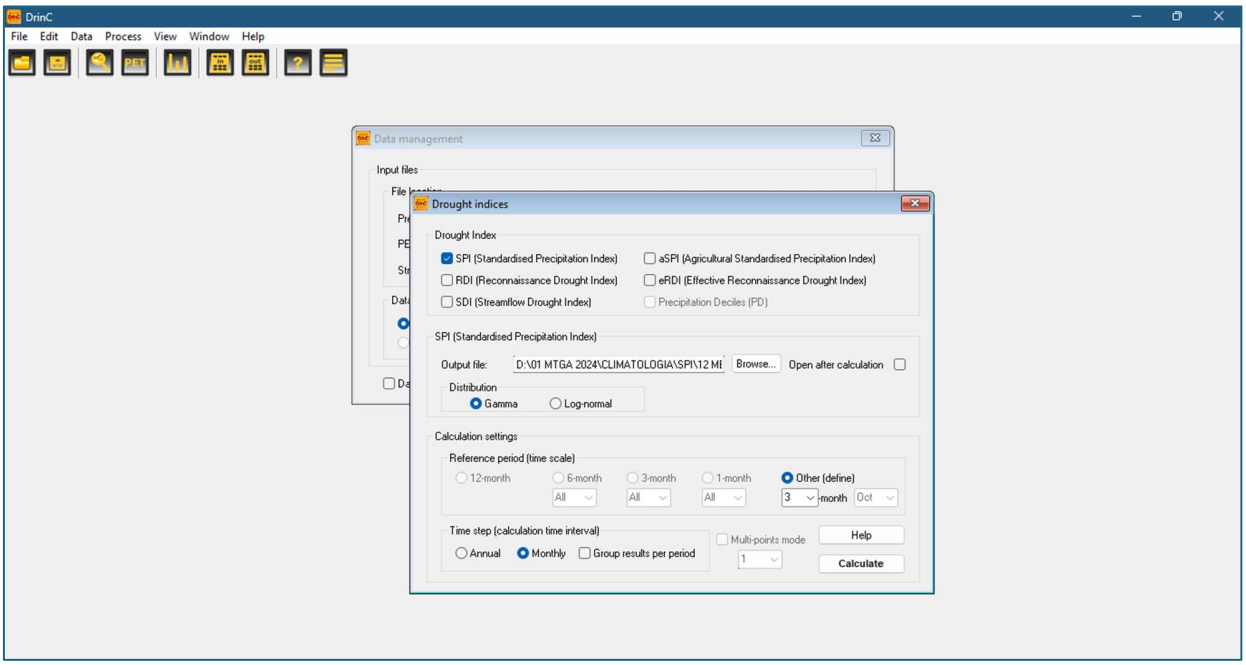
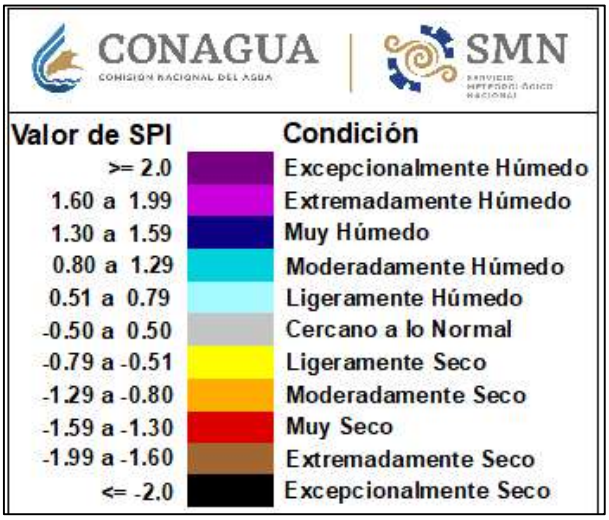


Figura 16 Cálculo de SPI en DrinC

Para la interpretación de los resultados obtenidos mediante el SPI-12, se utilizó la clasificación establecida por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Tabla 13), en la cual los valores positivos del índice representan condiciones de mayor humedad, mientras que los valores negativos indican condiciones de déficit de precipitación. A partir de la magnitud del índice se establecieron diferentes categorías, desde excepcionalmente húmedo hasta excepcionalmente seco (CONAGUA-SMN, s. f.).

Tabla 13 Valores de SPI y su designación conforme a CONAGUA s.f.



2.1.1. SPI-índice de Precipitación Estandarizado -12 Zona Centro

La (Tabla 14) presenta los resultados obtenidos del SPI-12 para las estaciones climatológicas analizadas en la Zona Centro durante el periodo de estudio. Los valores se clasificaron de acuerdo con las categorías establecidas por CONAGUA-SMN (s. f.), lo que permitió identificar visualmente la variación temporal de las condiciones secas, normales y húmedas en la región.

Tabla 14 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Centro

AÑO	24004 Armadillo	24024 El peaje	24034 La Salitrera	24042 Mexquitic	24046 Ojo Caliente	24061 La Concordia	24078 Santiago V.A.	24081 Soledad de GS	24093 Tierra Nueva	24100 Villa de Arriaga	24101 Villa de Reyes	24106 Zaragoza	Promedio
1981	-2.48	-0.94	-0.96	-0.62	-1.07	-0.31	0.63	0.10	-2.48	0.06	-1.25	-0.86	-0.85
1982	0.49	0.78	-0.19	0.54	-0.26	0.75	-0.58	0.62	-0.35	-0.50	0.06	0.32	0.14
1983	-0.78	-1.09	0.44	-0.74	-0.77	-1.31	-0.50	-1.12	-1.93	-0.37	-0.59	-0.16	-0.74
1984	-0.46	-1.45	-1.12	-0.91	-1.03	-0.74	-1.32	-0.75	-1.09	-1.35	-0.06	-0.01	-0.86
1985	0.69	0.80	-0.15	0.94	0.40	0.84	-0.99	1.39	-0.88	-1.41	0.18	0.62	0.20
1986	0.85	0.63	-0.40	0.45	0.58	0.31	-0.55	0.29	0.25	-1.24	1.18	0.41	0.23
1987	0.49	-0.03	3.33	0.21	-0.19	-0.47	0.89	1.03	0.02	0.62	-0.39	-0.56	0.41
1988	-0.61	-0.77	2.44	0.13	-0.22	1.15	2.15	-0.43	-0.61	0.63	-1.22	0.82	0.29
1989	0.40	-0.06	-0.71	1.00	-0.47	0.96	2.00	1.54	-1.67	-0.59	-2.35	-1.56	-0.13
1990	-1.29	-1.18	1.75	-1.03	-1.20	-3.77	2.82	-0.33	-1.89	-0.02	-1.20	-1.01	-0.70
1991	-0.35	-0.29	1.88	0.09	0.17	-2.57	1.77	-1.13	-1.72	1.42	0.95	-0.52	-0.03
1992	1.36	0.65	0.93	1.33	0.91	-1.87	0.16	1.87	1.99	2.26	1.89	-0.98	0.88
1993	1.02	0.57	1.50	0.46	0.07	-1.31	-0.05	1.55	0.70	1.74	0.89	0.03	0.60
1994	1.48	-0.01	0.93	-2.53	-0.83	0.29	1.02	-0.50	-0.48	0.70	0.11	0.21	0.03
1995	-0.29	-0.52	0.89	0.26	-0.21	0.60	-0.42	0.41	-0.81	1.04	-0.61	-0.31	0.00
1996	-0.37	-0.75	-1.87	-0.08	-0.11	0.32	-0.51	-0.36	0.12	0.18	0.58	0.29	-0.21
1997	0.50	-0.68	0.77	-0.70	-0.70	-0.68	-0.53	-0.46	0.89	1.25	0.36	0.81	0.07
1998	0.02	0.27	-0.05	-1.03	2.67	0.82	-0.48	-1.63	1.26	1.26	0.33	-1.84	0.13
1999	-0.13	-0.61	-0.22	-2.11	-0.56	0.43	-0.74	-1.99	0.45	0.26	0.21	-0.94	-0.50
2000	-1.43	-0.65	-0.46	-2.10	-1.29	-0.51	-1.10	-0.66	-0.47	-0.64	-0.04	-1.69	-0.92
2001	-0.09	-1.19	-0.34	-0.72	-1.36	-0.05	-0.83	-0.38	-0.20	-1.67	-0.51	-1.34	-0.72
2002	-0.87	-0.78	-0.36	0.58	-0.66	0.40	-0.40	0.36	0.56	-1.03	-0.09	-0.63	-0.24

AÑO	24004 Armadillo	24024 El peaje	24034 La Salitrera	24042 Mexquitic	24046 Ojo Caliente	24061 La Concordia	24078 Santiago V.A.	24081 Soledad de GS	24093 Tierra Nueva	24100 Villa de Arriaga	24101 Villa de Reyes	24106 Zaragoza	Promedio
2003	1.91	1.15	-0.60	1.34	1.09	0.00	-0.49	1.02	0.61	-0.52	1.43	4.14	0.92
2004	0.92	-0.80	-0.50	-1.46	-0.50	0.37	-0.41	-0.13	-0.13	-0.13	-0.91	0.63	-0.26
2005	1.12	2.09	-0.23	0.43	1.22	0.77	0.14	1.59	0.90	1.29	1.09	0.33	0.89
2006	-0.07	-1.28	-0.62	-0.13	-0.79	0.93	-0.72	-0.50	-1.07	-0.41	-0.31	0.77	-0.35
2007	0.19	1.15	-0.19	-0.16	1.50	1.06	-0.17	0.19	0.95	-0.12	0.66	1.52	0.55
2008	1.12	0.89	-0.35	0.32	2.54	1.31	-0.63	0.64	0.92	-0.51	0.08	0.45	0.57
2009	0.95	1.32	-0.13	1.07	0.57	0.36	-0.21	-0.72	0.17	0.79	0.17	0.47	0.40
2010	0.25	0.99	-0.39	0.27	0.14	0.43	-0.33	-0.27	0.11	-0.97	-0.76	0.74	0.02
2011	0.75	1.20	-0.02	0.63	0.46	1.25	-0.21	0.65	0.91	-0.39	0.04	-0.11	0.43
2012	-0.47	-1.09	-0.38	-0.56	-0.71	-0.16	-0.78	-1.55	0.05	-1.57	-1.12	-0.04	-0.70
2013	-1.59	-1.62	-0.40	-0.90	-0.09	0.50	-0.61	-0.80	-0.16	-1.54	0.00	0.47	-0.56
2014	1.16	1.62	-0.20	2.15	0.99	-0.08	-0.75	0.69	0.17	-1.06	1.12	0.03	0.49
2015	-0.81	-0.07	-0.79	0.32	0.56	0.33	0.42	0.40	0.50	-1.26	0.11	1.02	0.06
2016	0.28	1.95	-0.55	1.75	1.25	0.71	1.59	1.44	0.27	0.86	0.98	0.05	0.88
2017	0.15	-0.54	-0.38	0.47	-0.01	0.44	-1.10	0.46	0.23	0.16	-0.12	-0.43	-0.06
2018	0.00	0.29	-0.62	0.20	-0.75	0.00	-0.94	-0.41	-0.31	0.15	0.11	0.96	-0.11
2019	0.47	1.18	-0.51	1.41	0.81	0.26	0.29	1.24	0.95	1.87	1.21	-0.22	0.75
2020	-1.32	-1.33	-1.69	-0.71	0.08	-0.72	2.26	-0.19	0.12	0.56	0.81	-0.44	-0.21
2021	-2.82	-0.23	-0.05	-0.46	-0.38	-0.37	0.03	-0.60	-0.29	0.11	-0.56	-0.05	-0.47
2022	-0.52	1.21	-0.36	0.44	0.61	0.54	-0.50	-0.07	1.51	-0.58	1.26	-0.70	0.24
2023	0.22	-0.80	-0.02	0.23	-2.54	-0.61	-0.18	-1.92	2.01	0.56	-3.45	-0.99	-0.63

El análisis individual de las estaciones evidenció eventos de sequía de considerable mayor intensidad. Se identificaron valores de SPI inferiores a −2.0 en estaciones como Armadillo, Mexquitic, Ojo Caliente, La Concordia, Tierra Nueva y Villa de Reyes, correspondientes a condiciones excepcionalmente secas. Destacan La Concordia, con un SPI de −3.77, y Villa de Reyes, con −3.45, como algunos de los episodios secos de mayor intensidad registrados durante el periodo de estudio.

Asimismo, se observó que durante un mismo año pueden coexistir condiciones húmedas y secas de distinta intensidad entre estaciones. En algunos casos se registraron simultáneamente valores excepcionalmente húmedos y secos.

El SPI-12 muestra una alta variabilidad espacial En la columna “Promedio” la cual se puede analizar de manera particular en la (Figura 17), que resume las 12 estaciones, predominan los valores entre −0.50 y 0.50, es decir, condiciones cercanas a lo normal. De los 43 registros que aparecen en la tabla, aproximadamente 26 años (60 %) se encuentran dentro de esta categoría.

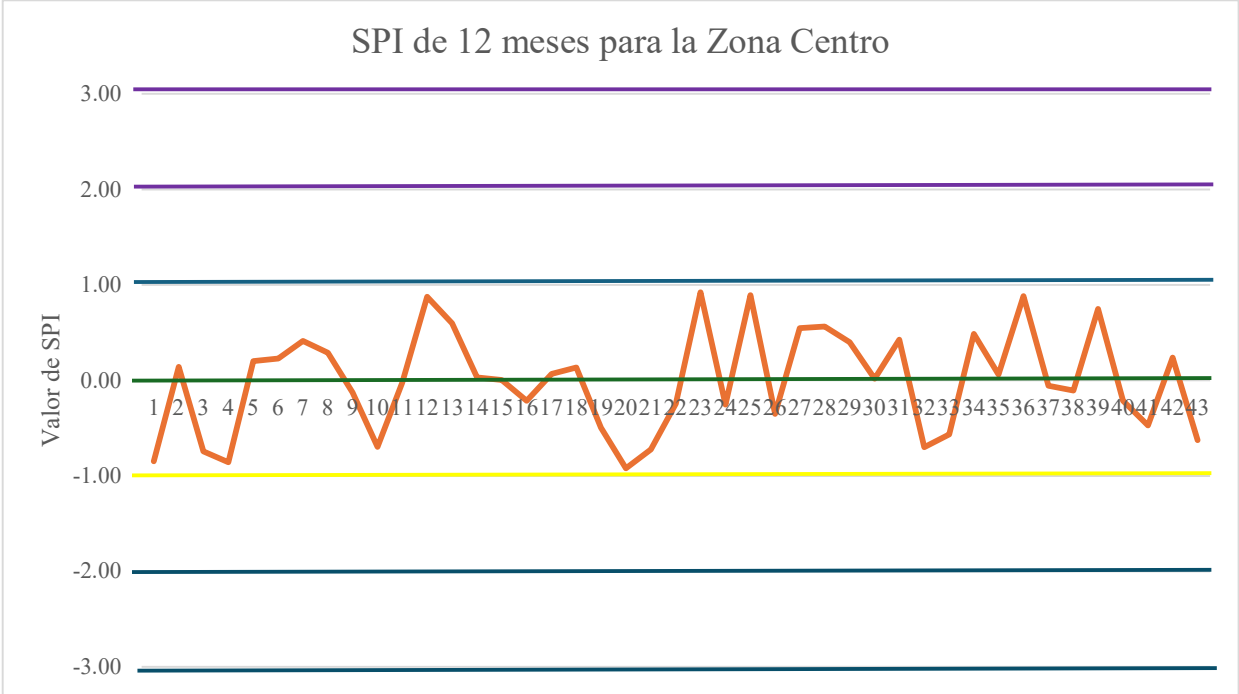


Figura 17 Comportamiento de SPI de 12 meses anual, Zona Centro

Por tanto, ningún promedio anual de toda la Zona Centro alcanza las categorías de muy seco, extremadamente seco o excepcionalmente seco. El valor promedio regional más bajo que observo es aproximadamente −0.92, correspondiente a una condición moderadamente seca, mientras que el más alto es aproximadamente 0.92, correspondiente a una condición moderadamente húmeda.

2.1.2. SPI-índice de Precipitación Estandarizado -12 Zona Media

La (Tabla 15) presenta los resultados obtenidos del SPI-12 para las estaciones climatológicas analizadas en la Zona Media durante el periodo de estudio. Los valores se clasificaron de acuerdo con las categorías establecidas por CONAGUA-SMN (s. f.), lo que permitió identificar visualmente la variación temporal de las condiciones secas, normales y húmedas en la región.

Tabla 15 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Media

AÑO	24006 Cardenas	24008 Cerritos	24011 Cd del Maiz	24013 Alvaro	24045 Nogal	24047 Ojo de	24049 Papagayo	24051 Paso San	24052 Pastora	24054 Pedro	24060 Rayon	24068 San Juan	24097 Vigas	24103 Villa	24110 Ojo de	24114 Rioverde	24136 Tanlu	24172 Media	24174 Puerto de	24187 Cd del Maiz	24193 San José	Promedio
1981	0.32	-1.39	-0.34	-1.27	-0.83	-1.49	-0.84	-1.25	-0.09	-0.51	-0.10	-0.62	-0.84	-0.58	-1.08	-1.32	0.01	-1.40	1.77	0.28	-0.32	-0.57
1982	1.02	0.76	0.92	0.68	0.91	0.66	0.63	-0.03	-0.34	1.50	1.17	0.93	1.02	0.91	1.97	1.45	1.99	1.84	-0.22	3.89	-0.31	1.02
1983	-0.44	0.06	0.14	-0.98	-0.56	-1.45	-0.92	2.14	1.88	-0.31	-0.36	-1.27	-0.41	-0.43	-0.88	-0.27	-1.82	-1.30	0.11	-0.01	1.01	-0.29
1984	0.37	-0.14	0.29	-1.26	0.00	0.21	0.64	-0.27	-0.79	-0.10	0.35	-0.03	-0.18	0.27	-0.02	-0.97	0.32	-0.16	1.37	0.05	-1.01	-0.05
1985	0.88	-0.83	-0.12	-1.11	0.43	-1.48	1.05	-0.30	0.19	0.62	0.45	-0.40	-0.01	-0.57	0.89	0.36	1.44	0.59	1.21	0.36	-0.04	0.17
1986	0.49	0.58	-0.16	-0.74	0.72	1.21	0.39	0.48	0.90	0.59	0.62	-0.30	0.64	-1.38	-0.87	1.13	-0.71	0.69	0.94	0.43	0.47	0.29
1987	-0.47	-0.05	-0.16	-0.82	0.27	1.13	-3.42	-1.07	-0.10	1.30	1.01	-0.39	-0.57	0.27	-0.73	-0.10	-0.80	-0.41	0.77	-0.08	0.74	-0.17
1988	-1.47	0.30	-0.91	-0.74	-0.43	-1.35	-0.05	-1.58	0.66	-3.76	-0.32	-2.53	-0.96	0.06	-0.39	-0.68	-1.16	-0.72	-1.23	-0.86	0.18	-0.85
1989	-0.18	1.58	0.16	0.96	0.02	0.25	0.65	0.36	0.00	-2.35	0.33	0.05	-0.70	0.65	0.85	-0.23	0.53	0.03	-0.31	0.46	-1.10	0.10
1990	-0.57	-0.79	-0.90	-0.01	-0.43	-1.19	-0.53	-0.03	0.62	-1.78	-0.15	-0.97	-0.34	-0.90	-1.20	-0.15	-0.12	-0.68	-0.23	0.42	-2.35	-0.58
1991	1.61	-0.72	1.02	0.36	0.89	-0.31	1.28	-1.19	0.73	-0.89	1.17	1.06	1.34	-0.46	1.08	0.08	-0.80	0.16	-1.01	-0.30	-1.42	0.18
1992	0.66	1.13	0.09	0.17	1.61	1.21	0.48	0.98	0.49	0.97	1.22	0.80	1.47	0.91	0.20	1.14	1.27	-0.22	0.48	0.40	-0.43	0.72
1993	-0.12	0.54	0.38	0.37	0.29	0.30	-0.47	2.87	0.80	0.12	0.67	-0.53	0.35	0.14	-0.40	0.42	0.83	0.86	0.07	0.76	0.76	0.43
1994	1.65	0.80	0.69	0.11	1.41	1.82	1.36	0.60	-0.05	0.95	1.93	1.89	1.78	0.78	1.13	1.57	1.28	2.64	1.29	1.47	0.77	1.23
1995	-1.26	-0.06	-1.24	-0.23	-0.25	-0.75	0.46	-0.72	1.83	-0.41	-0.51	-1.17	-0.45	0.44	0.07	-0.46	-1.07	0.09	0.40	-0.30	0.50	-0.24

AÑO	24006 Cardenas	24008 Cerritos	24011 Cd del Maiz	24013 Alvaro	24045 Nogal	24047 Ojo de	24049 Papagayo	24051 Paso San	24052 Pastora	24054 Pedro	24060 Rayon	24068 San Juan	24097 Vigas	24103 Villa	24110 Ojo de	24114 Rioverde	24136 Tanlu	24172 Media	24174 Puerto de	24187 Cd del Maiz	24193 San José	Promedio
1996	-0.75	-1.70	-0.51	-0.23	-0.39	-0.99	-0.80	-0.66	-1.56	0.40	-0.91	-0.29	-1.40	-1.51	-0.18	-1.19	-0.86	-1.23	-1.51	-0.49	-0.89	-0.84
1997	-0.52	1.22	-0.80	-0.62	0.36	-1.10	0.03	0.81	-3.29	0.34	-0.22	0.13	0.47	0.52	-0.66	-0.84	-0.56	-1.06	-1.87	1.26	-0.58	-0.33
1998	0.98	0.17	1.73	0.34	0.46	-0.91	-0.10	0.69	-0.28	-0.30	-0.15	-0.42	0.09	1.30	-0.75	-0.12	-0.75	-1.25	-1.99	1.05	-0.42	-0.03
1999	-0.27	0.68	0.06	-0.07	1.70	-1.07	0.41	0.97	1.50	-0.88	0.68	-0.87	0.87	0.56	0.12	0.34	1.45	0.45	0.46	-0.67	-0.17	0.30
2000	-0.70	-1.62	-1.52	-0.03	-0.32	-0.48	-1.79	-0.62	-0.54	0.11	0.39	-1.19	0.46	-0.30	-1.47	-0.69	-0.55	0.09	0.31	-0.83	0.49	-0.51
2001	-0.35	-1.11	-0.76	-0.19	-0.29	0.81	1.25	-0.32	-0.82	-0.65	-0.13	1.53	-0.69	-0.17	0.14	-1.09	-0.43	-0.73	0.43	0.45	-0.94	-0.19
2002	-1.45	1.33	-0.26	0.05	-0.41	-0.40	0.11	0.07	-0.45	0.16	0.29	0.10	0.88	0.55	0.10	0.45	-1.53	0.03	1.03	0.23	-0.72	0.01
2003	-1.04	-0.57	-0.56	-0.37	-0.19	0.72	0.23	0.03	-0.31	0.28	-0.52	1.00	-0.61	0.52	-1.10	-0.76	-1.41	-0.29	-1.30	0.11	-0.42	-0.31
2004	-0.15	-0.47	3.41	0.08	-0.39	0.90	1.20	0.12	-0.17	0.07	-0.11	1.36	-0.45	-0.12	-0.94	-1.06	0.80	-0.98	-0.72	0.96	-0.80	0.12
2005	0.12	0.31	3.42	-0.08	0.41	-0.82	-0.65	0.57	0.80	-0.21	-0.18	-0.06	0.01	0.45	0.32	-0.14	-0.25	0.65	0.36	0.30	-0.66	0.22
2006	0.20	-0.91	0.87	-0.65	-0.54	0.60	-1.65	-0.28	1.34	0.33	0.24	0.38	0.17	-0.37	-0.55	-0.59	-0.21	0.10	1.10	0.64	-0.14	0.00
2007	-0.29	-0.03	-0.25	-0.56	0.05	0.00	-0.38	0.09	-0.36	-0.40	-1.00	-0.77	-0.93	0.37	-0.19	-0.37	-0.79	-0.14	0.04	0.50	0.28	-0.24
2008	1.01	1.11	-0.22	0.40	1.11	1.32	1.39	0.49	0.00	1.39	1.01	1.32	1.76	1.58	2.91	1.06	1.53	2.18	0.64	0.44	-0.09	1.07
2009	1.77	1.43	-0.11	0.65	1.61	1.18	1.29	0.83	0.62	1.43	1.27	1.36	1.91	1.94	2.02	1.47	1.45	2.02	0.93	0.14	3.29	1.36
2010	-0.58	-0.27	-0.78	-0.22	-0.54	0.52	-1.85	-0.68	0.62	-0.51	-0.53	-0.80	-1.55	0.49	-0.58	-0.19	-0.54	-0.41	-0.14	-0.12	1.90	-0.32
2011	2.32	0.14	-1.29	1.14	0.36	2.07	0.61	1.05	0.05	1.48	1.62	1.89	1.77	0.72	1.18	2.56	1.25	1.09	0.91	0.72	-1.37	0.97

AÑO	24006 Cardenas	24008 Cerritos	24011 Cd del Maiz	24013 Alvaro	24045 Nogal	24047 Ojo de	24049 Papagayo	24051 Paso San	24052 Pastora	24054 Pedro	24060 Rayon	24068 San Juan	24097 Vigas	24103 Villa	24110 Ojo de	24114 Rioverde	24136 Tanlu	24172 Media	24174 Puerto de	24187 Cd del Maiz	24193 San José	Promedio
2012	1.02	-0.74	-0.34	0.00	-0.97	1.44	0.99	-0.92	1.37	0.31	0.28	0.40	-0.08	0.39	0.08	0.15	-0.21	0.24	1.04	0.05	2.08	0.31
2013	-0.92	-1.37	-0.80	-0.65	-0.82	-0.66	-0.74	0.39	-0.70	-0.42	-1.08	-0.72	-1.25	-0.73	-1.03	-1.03	-0.89	-1.14	-0.09	-1.71	-0.32	-0.79
2014	0.98	0.67	0.04	5.27	0.61	1.29	0.82	1.31	-1.06	0.59	0.69	-0.96	0.71	1.75	0.64	0.99	1.73	0.92	0.97	-1.61	-0.49	0.75
2015	0.03	0.77	-0.02	-0.02	0.54	0.19	0.69	0.28	0.19	0.47	0.18	0.62	0.71	-1.55	0.39	0.76	0.84	0.25	0.60	-1.25	1.29	0.28
2016	-0.06	0.41	0.01	0.67	0.70	-0.36	0.30	0.42	-0.04	-0.02	-0.09	0.00	-0.38	-0.11	1.01	0.58	-0.51	1.12	-0.17	-0.41	-0.10	0.14
2017	1.02	0.10	0.23	0.05	0.22	0.60	0.21	0.25	0.17	0.90	0.81	1.22	0.91	-0.55	1.02	1.46	0.85	0.41	-0.42	-0.64	0.00	0.42
2018	0.45	-0.71	0.20	0.36	0.43	-0.26	0.43	0.33	0.33	0.79	0.02	1.29	0.45	-0.97	0.00	0.10	0.60	-0.29	0.59	-0.63	1.08	0.22
2019	-1.13	0.48	-0.42	-0.13	0.12	-0.14	-0.47	-0.21	-0.74	-0.81	-1.17	-0.68	-0.47	-0.01	-0.75	-0.51	-1.21	-1.13	-0.08	-1.12	0.59	-0.48
2020	-2.90	-2.48	-1.18	-1.02	-2.37	-1.94	-0.86	-1.43	0.60	-0.06	-2.72	-1.46	-0.80	-3.35	-2.04	-0.77	-1.08	-1.30	-1.69	-1.76	-0.51	-1.48
2021	-0.90	-1.42	0.46	-0.44	-3.05	-0.34	-0.99	-1.68	-2.00	-0.03	-2.15	-1.01	-2.31	-2.10	-0.36	-1.08	0.09	-0.52	-1.54	-0.96	-0.38	-1.08
2022	-0.26	0.51	-0.54	-0.16	-2.79	-0.66	0.17	-2.68	-1.87	0.65	-1.31	0.55	-1.54	0.09	0.86	1.23	-0.40	0.39	-1.00	-0.07	-0.32	-0.44
2023	-0.12	2.31	-0.49	-0.37	0.55	-0.28	-0.40	-0.22	-0.03	-0.88	-2.51	-0.42	-0.89	0.63	-0.86	-2.68	0.36	-1.55	-1.26	-1.77	0.76	-0.48

A lo largo de la serie se observa que una parte importante de los registros permanece dentro de condiciones cercanas a lo normal, aunque existen diversos periodos en los que las condiciones secas se presentan simultáneamente en un número considerable de estaciones.

En la columna “promedio” la cual se puede analizar de manera particular en la (Figura 18) permiten identificar con mayor claridad distintos episodios

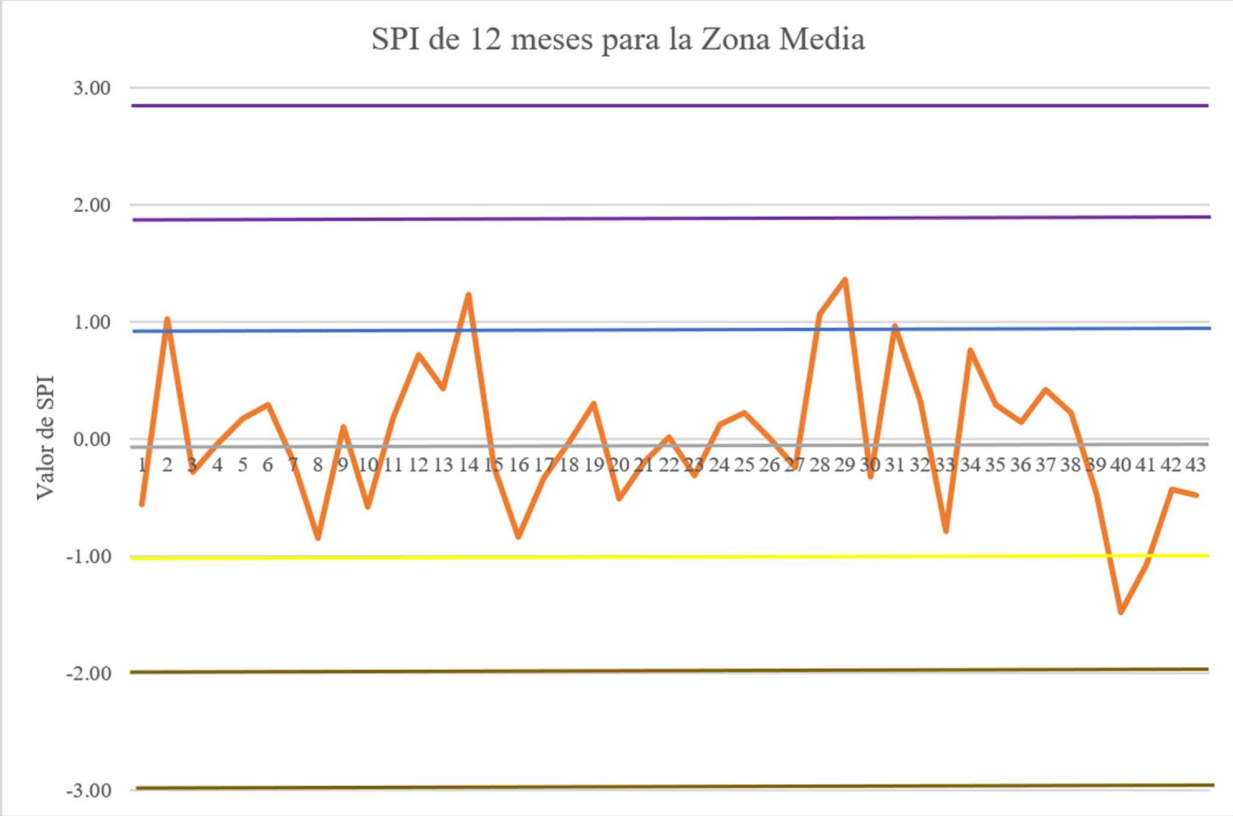


Figura 18 SPI 12 meses, para datos anuales, Zona Media

Episodios negativos entre ellos destacan años con valores promedio de aproximadamente −0.85, −0.84, −0.79, −1.08 y −1.48, lo que evidencia desde condiciones moderadamente secas hasta episodios regionales que alcanzan la categoría de muy secos.

El episodio de mayor intensidad corresponde al año 2020 cuyo promedio regional alcanza aproximadamente −1.48, clasificado como muy seco.

2.2. Prueba de Pettit

La identificación de cambios en las series climatológicas permite determinar si, durante el periodo de estudio, se presentó una modificación significativa en el comportamiento de las variables analizadas. Para este propósito, se empleó la prueba de Pettitt, desarrollada por Pettitt (1979), la cual es un método estadístico no paramétrico utilizado para detectar la presencia y ubicación de un punto de cambio dentro de una serie temporal. Una de sus principales ventajas es que no requiere asumir una distribución específica de los datos, por lo que ha sido ampliamente utilizada en el análisis de series hidrológicas y climatológicas (Pettitt, 1979).

La prueba se fundamenta en una adaptación de la estadística de Mann–Whitney, mediante la comparación de las observaciones anteriores y posteriores a cada posible punto de ruptura de la serie. De esta manera, permite identificar el momento en el que se presenta la mayor diferencia entre ambos grupos de observaciones y determinar si dicho cambio es estadísticamente significativo (Pettitt, 1979).

La hipótesis nula (H_0) establece que la serie es homogénea y que todas las observaciones provienen de una misma distribución, es decir, no existe un punto de cambio significativo. Por el contrario, la hipótesis alternativa (H_1) plantea la existencia de un punto en el tiempo a partir del cual ocurre un cambio significativo en la distribución de los datos (Pettitt, 1979)

Para determinar la significancia estadística del punto de cambio se considera el valor de probabilidad (p-value). En el presente estudio se adoptó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$; por lo tanto, cuando $p < 0.05$ se rechaza la hipótesis nula y se considera que existe un punto de cambio estadísticamente significativo en la serie. Este procedimiento permite establecer el año en que se presenta la ruptura y posteriormente comparar el comportamiento de la variable antes y después de dicho punto. (Pettitt, 1979)

La prueba se basa en la estadística de Mann-Whitney y considera una serie temporal constituida por *n* observaciones:

$X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n$

Para cada posible punto de cambio *t*, se calcula el estadístico:

$U_{t,n} = \Sigma_{i=1}^{t} \Sigma_{j=t+1}^{n} \text{sgn}(X_i - X_j)$

donde:

- $U_{t,n}$ = estadístico de Pettitt para el posible punto de cambio *t*.
- X_i = observaciones correspondientes al periodo anterior al posible punto de cambio.
- X_j = observaciones correspondientes al periodo posterior al posible punto de cambio.
- n = número total de observaciones de la serie.
- t = posible posición del punto de cambio.
- sgn = función signo.

La función signo se define como:

$\text{sgn}(X_i - X_j) = 1$, si $X_i - X_j > 0$

$\text{sgn}(X_i - X_j) = 0$, si $X_i - X_j = 0$

$\text{sgn}(X_i - X_j) = -1$, si $X_i - X_j < 0$

Posteriormente, se determina el estadístico K_n, correspondiente al valor absoluto máximo obtenido de $U_{t,n}$:

$K_n = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}|$

El momento **t** en el que se presenta el valor máximo de $\mathbf{|U_{t,n}|}$ se considera como el punto más probable de ruptura de la serie temporal.

La significancia estadística del punto de cambio puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$p \approx 2 \exp[-6K_n^2 / (n^3 + n^2)]$

donde:

- p = nivel de significancia asociado al punto de cambio.
- K_n = valor máximo absoluto del estadístico de Pettitt.
- n = número total de observaciones de la serie.

Para la interpretación de la prueba se establecen las siguientes hipótesis:

H_0: La serie es homogénea y no presenta un punto de cambio estadísticamente significativo.

H_1: La serie presenta un punto de cambio estadísticamente significativo.

En el presente estudio se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Por lo tanto, cuando $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se considera que existe evidencia estadística de una ruptura en la serie. Por el contrario, cuando $p \geq 0.05$, no se rechaza H_0 y no se considera significativa la presencia de un punto de cambio. (Pettitt, 1979)

La prueba permite, además de determinar la existencia de una ruptura, identificar el año en el que probablemente ocurrió el cambio. Una vez localizado dicho punto, pueden compararse los valores anteriores y posteriores para establecer el sentido del cambio observado en la variable climatológica analizada (Pettitt, 1979).

A continuación, se presenta un resumen de la prueba de Pettit para la precipitación de la Zona Centro (Tabla 16).

Tabla 16 Estadísticos descriptivos de precipitación de la RA (elaboración propia con información de CONAGUA, 2020)

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Armadillo	44	0	44	0.000	175.000	49.237	37.779
La Concordia	44	0	44	0.000	114.000	30.011	27.963
Tierra nueva	44	0	44	0.000	192.738	38.415	39.073
La Salitrera	44	0	44	0.811	115.000	33.804	27.705
Zaragoza	44	0	44	0.000	98.000	31.414	26.314
Stgo el Aguil	44	0	44	0.000	117.200	30.480	29.767
Villa Arriaga	44	0	44	0.000	161.000	38.963	39.550
Ojo Caliente	44	0	44	0.100	131.300	37.866	27.906
Villa de Reye	44	0	44	0.000	144.700	34.825	32.271
El Peaje	44	0	44	1.800	109.200	37.900	28.743
Soledad	44	0	44	0.000	95.000	32.886	24.408
Mexquitic	44	0	44	0.000	164.000	42.913	39.576
ZC	44	0	44	3.492	84.875	36.536	21.556

Además, el programa de cómputo XLSAT, entrega gráficos donde se puede presentar el comportamiento de los registros analizados, cuando existe una ruptura, el gráfico se comporta de una forma donde se puede identificar el valor medio atípico y la fecha donde se registra el cambio como se puede presentar en la (Figura 19).

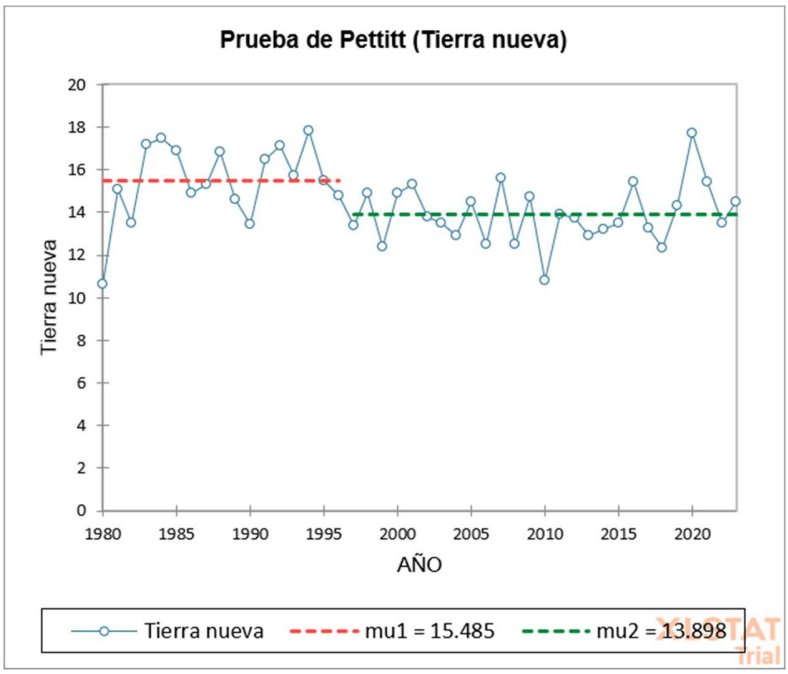


Figura 19 Precipitación en el mes de diciembre, de la estación 24093, Tierra Nueva. (ZC) elaboración propia; con información de CONAGUA 2025

A continuación, en las tablas 27 a la 30 se presentan los resultados de la prueba Pettit en Zona Centro, se ordenó esta información en tablas para cada variable; los años en los que se presentan rupturas de incremento en color rojo y de decremento con color azul.

2.2.1. Prueba de Pettit Zona Centro

A continuación, en las (Tablas 17 a la 20) se presentan los resultados de la prueba Pettit en Zona Centro, se ordenó esta información en tablas para cada variable; los años en los que se presentan rupturas de incremento en color rojo y de decremento con color azul.

Tabla 17 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de precipitación mensual de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de precipitación (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA CENTRO															
1	Armadillo	24004													
2	La Concordia	24061													
3	Tierra nueva	24093						**1996**							
4	La Salitrera	24034	**1997**							**1994**	**1994**	**1998**			
5	Zaragoza	24106													
6	Stgo el Aguila	24078								**1994**					
7	Villa Arriaga	24100			**2003**										
8	Ojo Caliente	24046		**1993**											
9	Villa de Reyes	24101		**1993**											
10	El Peaje	24024		**1993**											
11	Soledad	24081					**1995**				**2001**				
12	Mexquitic	24042									**2000**				
13	ZC		**1996**												

Tabla 18 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Maxima de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia)

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Máxima (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA CENTRO															
1	Armadillo	24004								1993					
2	La Concordia	24061													
3	Tierra nueva	24093	2002		2011	2008	2012					2010	2006	1998	
4	La Salitrera	24034						1999		1999	2000	2001			
5	Zaragoza	24106		2000						2000					
6	Stgo el Aguila	24078	1998	1992	1991	1999			1993	1992		1992		1991	
7	Villa Arriaga	24100	1996	1996	1996	1987	2005		1988		2009	1988	1993	1993	
8	Ojo Caliente	24046											2004		
9	Villa de Reyes	24101				2003	2003	1998	2001	1998	2001	2000	2000		
10	El Peaje	24024		2005									2005		
11	Soledad	24081			1998	2001		1999	1998	1997	1997				
12	Mexquitic	24042	1992	1992	1993	1992	1993		1991	1993				1991	
13	ZC			1992			2013	2012			2001		2006		

Tabla 19 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Mínima de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Mínima (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA CENTRO															
1	Armadillo	24004													
2	La Concordia	24061	1988	1992	1995	1996		1993	1996		2000	1993	1992	1990	
3	Tierra nueva	24093	1998					2005	2006	2004			2003		
4	La Salitrera	24034			1994										
5	Zaragoza	24106	2014	2011	2013	2006	1997	1997	2002	1994	2001	2001	2011	2012	
6	Stgo el Aguila	24078		2013	2013		2014		2005	2009	2012	2011	2012		
7	Villa Arriaga	24100		2002	2002	1998	2001	2007	2006	2002	1999	2001	1999		
8	Ojo Caliente	24046			2003				2013			1994			
9	Villa de Reyes	24101			1996		1998		1993	1990					
10	El Peaje	24024			1996	2000		1996	2004	2002	2002	2001			
11	Soledad	24081													
12	Mexquitic	24042	2003	2007			1997	1996	1993	1995				2002	
13	ZC				1996	2000			2000	2002				1990	

Tabla 20 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura promedio de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Promedio (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA CENTRO															
1	Armadillo	24004													
2	La Concordia	24061	1988	1992		1999					1988	1992		1989	
3	Tierra nueva	24093	2002		2003	2006	2011	2005	2009	2005	2005		1998	1996	
4	La Salitrera	24034						1999	2004	1997		1997	2000		
5	Zaragoza	24106	1998	2000	1997	1997	1997	2000	2000	2000	2000	2001	2010	2010	
6	Stgo el Aguila	24078		2010		1998			2000	2003	2002	2001			
7	Villa Arriaga	24100	1996	1996	1997	1996	1989	1989	1990	1989	1989	1995	1995	1995	
8	Ojo Caliente	24046					2013	2013		2013			1998		
9	Villa de Reyes	24101			1991				2005	2014					
10	El Peaje	24024		1993		1997				1996					
11	Soledad	24081					1996	1999		1988				1995	
12	Mexquitic	24042				2004	2015			2014					
13	ZC			1992											

La prueba de Pettitt aplicada a las series de **precipitación** de la Zona Centro durante 1980–2023 permitió identificar puntos de ruptura estadísticamente significativos, concentrados principalmente entre la década de 1990 y principios de los años 2000. Las rupturas positivas se representaron en color rojo y las negativas en azul.

Los cambios presentaron tanto incrementos como decrementos dependiendo del mes y la estación climatológica, sin identificarse un año de ruptura común para toda la región. Esto mostró un comportamiento variable de la precipitación, con cambios localizados espacial y temporalmente.

Para la **temperatura máxima** se identificaron numerosos puntos de ruptura significativos, distribuidos principalmente entre las décadas de 1990 y 2010, con una mayor concentración durante los años noventa y principios de los 2000. Se presentaron rupturas tanto positivas como negativas, aunque fueron frecuentes los cambios asociados con incrementos de temperatura.

La **temperatura mínima** presentó una cantidad considerable de puntos de ruptura significativos durante 1980–2023. Se observó un predominio de rupturas positivas, distribuidas en diferentes estaciones y meses, principalmente entre la década de 1990 y principios de los años 2000, aunque también se identificaron cambios posteriores.

Las rupturas negativas fueron menos frecuentes y se presentaron de manera más localizada. En conjunto, los resultados mostraron que los cambios abruptos detectados en la temperatura mínima estuvieron asociados principalmente con incrementos.

La **temperatura promedio** presentó numerosos puntos de ruptura significativos, concentrados principalmente entre la década de 1990 y principios de los años 2000, aunque también se registraron algunos cambios posteriores. Se identificaron rupturas positivas y negativas, con una mayor presencia de cambios asociados con incrementos de temperatura.

2.2.2. Prueba de Pettit Zona Media

A continuación, en las (Tablas 21 a la 24) se presentan los resultados de la prueba Pettit en Zona Centro, se ordenó esta información en tablas para cada variable; los años en los que se presentan rupturas de incremento en color rojo y de decremento con color azul

Tabla 21 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de precipitación mensual de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de Precipitación (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA MEDIA															
1	COL. ALVARO ABREGON	24013													
2	OJO DE AGUA	24047											1990		
3	RAYON	24060					1994								
4	CARDENAS	24006					1993								
5	TEPEYAC	24187				1997	1993	2009			2009				
6	SAN JUAN DEL MECO	24068			2003								1997		
7	PUERTO DE LOBOS	24174													
8	CIUDAD DEL MAIZ	24011													
9	PAPAGAYOS	24049	1997	1994			1997								
10	SAN JOSE DEL TAPANCO	24193													
11	VIGAS	24097					1994								
12	PEDRO MONTOYA	24054													
13	OJO DE AGUA SECO	24110													
14	MANANTIAL MEDIA LUNA	24172													
15	RIOVERDE	24114													
16	PASTORA	24052												1995	
17	PASO DE SAN ANTONIO	24051													
18	Nogal Obscuro	24045													
19	CERRITOS	24008													
20	VILLA JUAREZ	24103													
21	ZM														

Tabla 22 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Maxima de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia)

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Máxima (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA MEDIA															
1	COL. ALVARO ABREGON	24013													
2	OJO DE AGUA	24047						1999					1990		
3	RAYON	24060								2001					
4	CARDENAS	24006	2012		2014				2003	2004	1997	1993	2012	2013	
5	TEPEYAC	24187	1990	1992	1990	2005	1992	1991	1991	1990	1991	2003	1990	1990	
6	SAN JUAN DEL MECO	24068	2008	2005	1999				2003	2005	2007	2003	2006	2006	
7	PUERTO DE LOBOS	24174	2015	1995							2009				
8	CIUDAD DEL MAIZ	24011		1992											
9	PAPAGAYOS	24049								2004		2001			
10	SAN JOSE DEL TAPANCO	24193													
11	VIGAS	24097								1996					
12	PEDRO MONTOYA	24054		2000	2000	2000	2000		1991	1992					
13	OJO DE AGUA SECO	24110							1991						
14	MANANTIAL MEDIA LUNA	24172	2001				2012						2004	1999	
15	RIOVERDE	24114		2005	2015	1997	1997		1991	2004				2004	
16	PASTORA	24052	1996	1996		1998				2007		1995		1995	
17	PASO DE SAN ANTONIO	24051	1997			1998						1997	1996		
18	NOGAL OSCURO	24045		2000	1990		1997	2000	1999	1999	1999	1994		2000	
19	CERRITOS	24008	2004	2004	2004	2004	2004	2004	2004	2003	2003	2003	2003	2003	
20	VILLA JUAREZ	24103				1999	1999	2000	1999	1998	1998	2003			
21	ZM			2005					1991	2004		2003			

Tabla 23 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura Mínima de la Zona Media de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Mínima (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA MEDIA															
1	COL. ALVARO ABREGON	24013				1986									
2	OJO DE AGUA	24047					1986		2009		2012				
3	RAYON	24060			2002	2004									
4	CARDENAS	24006						2000	2001	2000	2002	1999			
5	TEPEYAC	24187						2002	2005	2005	2005				
6	SAN JUAN DEL MECO	24068	2003	1999	1995		2003			2006					
7	PUERTO DE LOBOS	24174	2005	2004	2005	2005						2003	2013	2013	
8	CIUDAD DEL MAIZ	24011							1991	1992					
9	PAPAGAYOS	24049					2001	1999		2002					
10	SAN JOSE DEL TAPANCO	24193			1996			1996	2008	2000	2002			2004	
11	VIGAS	24097													
12	PEDRO MONTOYA	24054													
13	OJO DE AGUA SECO	24110					2009								
14	MANANTIAL MEDIA LUNA	24172					2007	2005	2003	1998					
15	RIOVERDE	24114													
16	PASTORA	24052	1998	1996				1995		2003	2002				
17	PASO DE SAN ANTONIO	24051	2010											2005	
18	Nogal Obscuro	24045										1999			
19	CERRITOS	24008			1995		1998		1992	1993	1993				
20	VILLA JUAREZ	24103	2009	2010	2010			2007				2007	2007	2008	
21	ZM								2008						

Tabla 24 Años de ruptura detectados mediante la prueba de Pettitt en las series de Temperatura promedio de la Zona Centro de San Luis Potosí (elaboración propia).

Resultados para la prueba de Pettit de Temperatura Promedio (año de ruptura)															
No	**Nombre**	**CLAVE**	**ENE**	**FEB**	**MAR**	**ABR**	**MAY**	**JUN**	**JUL**	**AGO**	**SEP**	**OCT**	**NOV**	**DIC**	**ANUAL**
ZONA MEDIA															
1	COL. ALVARO ABREGON	24013						1992	1990	1994			1990		
2	OJO DE AGUA	24047					1986		2013	2013		2011		2012	
3	RAYON	24060													
4	CARDENAS	24006		2012	1998	2004	1997	2004	2004	2001	2001	2001		2002	
5	TEPEYAC	24187			2005	2005	1992	1990	2005	2005	2005	2005		2005	
6	SAN JUAN DEL MECO	24068	1997	1992								1993			
7	PUERTO DE LOBOS	24174	2004	2004	2004										
8	CIUDAD DEL MAIZ	24011						1999							
9	PAPAGAYOS	24049						2007							
10	SAN JOSE DEL TAPANCO	24193				1997				2001					
11	VIGAS	24097													
12	PEDRO MONTOYA	24054		1992		1997				1996	1994				
13	OJO DE AGUA SECO	24110								1996					
14	MANANTIAL MEDIA LUNA	24172	2005		2006	2013	2011	2006		2004	2006	2006	2004	2001	
15	RIOVERDE	24114		1992		1997			1992						
16	PASTORA	24052		1995		1998	1997	1994	1992	1992	1992	1994	1991	1990	
17	PASO DE SAN ANTONIO	24051	1998	1996	1995							1995	1995	1996	
18	NOGAL OBSCURO	24045		1992	1998		1999	1994	1999	1999	1999	1999	1993		
19	CERRITOS	24008		1994	1998	1998	2005	2004	1998	1998	1993	1993		1992	
20	VILLA JUAREZ	24103	2008	2007	2007	2007	2007	2007	2008	2007	2007	2008	2007	2011	
21	ZM								1993						

La prueba de Pettitt aplicada a las series de **precipitación** de la Zona Media durante 1980–2023 permitió identificar un número reducido de puntos de ruptura estadísticamente significativos, concentrados principalmente durante la década de 1990.

Tepeyac y Papagayos presentaron el mayor número de rupturas significativas. Además, 12 de las 20 estaciones analizadas no registraron puntos de cambio y tampoco se identificaron rupturas en la serie regional ZM ni en la escala anual. Estos resultados mostraron que los cambios en la precipitación fueron principalmente localizados y variables entre estaciones.

La **temperatura máxima** presentó numerosos puntos de ruptura significativos, distribuidos principalmente entre la década de 1990 y los primeros años de los 2000, con un claro predominio de rupturas positivas. Tepeyac, San Juan del Meco y Cerritos destacaron por presentar cambios asociados con incrementos en numerosos meses, mientras que las rupturas negativas fueron menos frecuentes y más localizadas.

La **temperatura mínima** presentó diversos puntos de ruptura significativos entre mediados de la década de 1980 y la década de 2010, con una concentración importante entre finales de los años noventa y la primera década de los 2000. Predominaron las rupturas positivas, aunque también se identificaron decrementos localizados en algunas estaciones.

Villa Juárez, San José del Tapanco y Puerto de Lobos destacaron por presentar numerosos cambios asociados con incrementos. Asimismo, la serie regional ZM registró una ruptura positiva en julio de 2008, indicando un cambio detectable también a escala regional.

La **temperatura promedio** presentó numerosos puntos de ruptura significativos, concentrados principalmente entre la década de 1990 y la primera década de los 2000, con predominio de cambios positivos. Villa Juárez y Cerritos destacaron por registrar rupturas positivas durante gran parte del año, mientras que otras estaciones presentaron cambios negativos de manera más localizada.

3. EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ZONAS CENTRO Y MEDIA DE SAN LUIS POTOSÍ.

3.1 Aspectos generales del cambio climático:

El cambio climático constituye una de las principales alteraciones ambientales de alcance global. De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se entiende como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural observada durante periodos comparables (Naciones Unidas, 1992). Esta definición permite distinguir entre las fluctuaciones naturales del sistema climático y las modificaciones asociadas con las actividades antropogénicas.

El sistema climático está integrado por diversos componentes que interactúan entre sí, entre ellos la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la geosfera (Naciones Unidas, 1992).. Por esta razón, las modificaciones del clima no se limitan únicamente a cambios en la temperatura del aire, sino que pueden manifestarse mediante alteraciones en distintos componentes y procesos del sistema terrestre.

Aunque el clima de la Tierra presenta variaciones naturales en diferentes escalas temporales, la evidencia científica disponible muestra una influencia humana inequívoca sobre el calentamiento observado. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señala que las actividades humanas, principalmente mediante las emisiones de gases de efecto invernadero, han causado el calentamiento global. Para el periodo 2011–2020, la temperatura media de la superficie global alcanzó aproximadamente 1.1 °C por encima del nivel correspondiente al periodo 1850–1900 (IPCC, 2023).

El incremento en las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero está estrechamente relacionado con las actividades humanas. Entre las principales causas se encuentran el uso de combustibles fósiles y los cambios en el uso del suelo, además de diferentes

patrones de producción y consumo. Las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) han aumentado como consecuencia de las emisiones antropogénicas, intensificando el efecto invernadero y modificando el balance energético del sistema climático (IPCC, 2021, 2023).

Las evidencias del cambio climático no se restringen al incremento de la temperatura media global. Se han registrado cambios generalizados y rápidos en la atmósfera, los océanos, la criosfera y la biosfera. Asimismo, la influencia humana ya está afectando la frecuencia y características de diversos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, entre ellos las olas de calor, las precipitaciones intensas y las sequías en distintas regiones del planeta (IPCC, 2021, 2023).

3.2. Índices de cambio climático (ICC)

El análisis del cambio climático no se limita al estudio de las variaciones en los valores medios de temperatura y precipitación, debido a que las modificaciones del clima también pueden manifestarse mediante cambios en la frecuencia, intensidad y duración de los eventos extremos. En este sentido, los índices climáticos constituyen herramientas que permiten sintetizar la información contenida en las series meteorológicas y evaluar diferentes características de los extremos de temperatura y precipitación (Alexander *et al.*, 2006; IPCC, 2021).

Con la finalidad de contar con procedimientos estandarizados para el análisis de los extremos climáticos, se desarrolló un conjunto de índices calculados principalmente a partir de datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. La estandarización de estos indicadores permite realizar comparaciones entre diferentes regiones, periodos y conjuntos de datos, además de facilitar la identificación de cambios en distintos componentes del clima (Zhang *et al.*, 2011).

Los índices de extremos climáticos pueden representar diferentes características de las variables analizadas. Algunos se basan en umbrales absolutos, mediante el conteo del número de días en que una variable supera o se encuentra por debajo de un valor determinado; otros emplean umbrales relativos definidos mediante percentiles de una distribución de referencia. Asimismo,

existen índices que representan la intensidad o duración de determinados eventos, como la precipitación máxima acumulada en uno o varios días y la duración de periodos consecutivos secos o húmedos (Zhang *et al.*, 2011).

En el caso de la temperatura, los índices permiten analizar modificaciones en la ocurrencia de condiciones cálidas y frías, tanto durante el día como durante la noche. De esta manera, es posible evaluar si las condiciones extremadamente cálidas se presentan con mayor frecuencia o si, por el contrario, disminuye la ocurrencia de condiciones frías (Alexander *et al.*, 2006).

Estos indicadores están definidos en la (Tabla 25)

Tabla 25 Índices de cambio climático de Temperatura

Índices de temperatura			
Índice	**Nombre**	**Definición**	**Unidad**
TX90p	Días cálidos	Porcentaje de días en que la temperatura máxima (TX) supera el percentil 90 del periodo de referencia.	%
TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de días en que la temperatura mínima (TN) supera el percentil 90 del periodo de referencia.	%
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días en que la temperatura máxima (TX) es inferior al percentil 10 del periodo de referencia.	%
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días en que la temperatura mínima (TN) es inferior al percentil 10 del periodo de referencia.	%
SU	Días de verano	Número de días en que la temperatura máxima diaria es mayor a 25 °C.	días
TR	Noches tropicales	Número de días en que la temperatura mínima diaria es mayor a 20 °C.	días
FD	Días de helada	Número de días en que la temperatura mínima diaria es menor a 0 °C.	días
ID	Días de hielo	Número de días en que la temperatura máxima diaria es menor a 0 °C.	días
DTR	Rango diurno de temperatura	Promedio de la diferencia diaria entre la temperatura máxima y la temperatura mínima.	°C
TXn	Mínimo de temperatura máxima	Valor mínimo de la temperatura máxima diaria durante el periodo analizado.	°C
TXx	Máximo de temperatura máxima	Valor máximo de la temperatura máxima diaria durante el periodo analizado.	°C
TNn	Mínimo de temperatura mínima	Valor mínimo de la temperatura mínima diaria durante el periodo analizado.	°C
TNx	Máximo de temperatura mínima	Valor máximo de la temperatura mínima diaria durante el periodo analizado.	°C

Los índices asociados con la precipitación permiten analizar tanto la cantidad acumulada como la intensidad, frecuencia y persistencia de los eventos húmedos y secos, de acuerdo con lo indicado en la (Tabla 26).

Tabla 26 Índices de cambio climático de Precipitación

Índices de precipitación			
Índice	**Nombre**	**Definición**	**Unidad**
CDD	Días secos consecutivos	Máximo número de días consecutivos con precipitación menor a 1 mm.	días
CWD	Días húmedos consecutivos	Máximo número de días consecutivos con precipitación igual o mayor a 1 mm.	días
R95p	Precipitación en días muy húmedos	Precipitación total acumulada en los días cuya precipitación supera el percentil 95 de los días húmedos del periodo de referencia.	mm
R99p	Precipitación en días extremadamente húmedos	Precipitación total acumulada en los días cuya precipitación supera el percentil 99 de los días húmedos del periodo de referencia.	mm
RX1day	Precipitación máxima en 1 día	Máxima precipitación acumulada registrada en un solo día durante el periodo analizado.	mm
RX5day	Precipitación máxima en 5 días	Máxima precipitación acumulada registrada durante cinco días consecutivos.	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación total de los días húmedos dividida entre el número de días húmedos.	mm/día
PRCPTOT	Precipitación total anual en días húmedos	Suma de la precipitación registrada en los días con precipitación igual o mayor a 1 mm.	mm
R10mm	Días con precipitación ≥ 10 mm	Número de días con precipitación diaria igual o mayor a 10 mm.	días
R20mm	Días con precipitación ≥ 20 mm	Número de días con precipitación diaria igual o mayor a 20 mm.	días
R25mm	Días con precipitación ≥ 25 mm	Número de días con precipitación diaria igual o mayor a 25 mm.	días

El empleo conjunto de estos índices permite obtener una visión más amplia de la evolución del clima que la obtenida únicamente mediante el análisis de valores medios. Una región puede no presentar una modificación significativa en la precipitación total y, al mismo tiempo, experimentar cambios en la intensidad de las lluvias o en la duración de los periodos secos. De manera similar, cambios en la temperatura media pueden estar acompañados por modificaciones en la frecuencia e intensidad de los extremos de temperatura (IPCC, 2021).

Por esta razón, el análisis de los índices climáticos resulta particularmente útil para la evaluación de cambios a escala regional. Su aplicación en series climatológicas de largo plazo permite identificar modificaciones en diferentes características de los extremos climáticos (Alexander *et al.*, 2006; IPCC, 2021). En esta investigación, los ICC se emplearon como indicadores para evaluar la evolución temporal de los extremos de temperatura y precipitación en las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí.

3.3. Disponibilidad y preparación de datos diarios

El cálculo de los índices de cambio climático (ICC) requiere series de datos diarios que permitan caracterizar modificaciones en la frecuencia, intensidad y duración de eventos relacionados con la temperatura y la precipitación.

Para esta investigación se utilizaron registros climatológicos diarios correspondientes a las estaciones meteorológicas seleccionadas de las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí. La información fue obtenida de las bases climatológicas oficiales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y se consideró un periodo de 1980 a 2024.

Las variables empleadas para el cálculo de los índices fueron precipitación diaria temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria A partir de estas últimas también se obtuvo la temperatura media diaria cuando fue requerida para la revisión y procesamiento de las series. La información de cada estación se organizó cronológicamente, estableciendo una secuencia continua de fechas para todo el periodo de análisis.

Previo al cálculo de los ICC se realizó una etapa de control y preparación de la información, con el propósito de identificar registros faltantes, valores inconsistentes y posibles errores en las series originales. Los datos ausentes fueron identificados y diferenciados de los valores iguales a cero, particularmente en el caso de la precipitación, debido a que un valor de 0 mm representa un día sin precipitación y no la ausencia de información.

Posteriormente, las series fueron estructuradas en el formato requerido para su procesamiento mediante RClimDex, implementado en el entorno estadístico R. Para cada estación se prepararon archivos con las variables de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a escala diaria, verificando la correspondencia entre fechas y observaciones antes de realizar el cálculo de los índices.

Como parte del control de calidad, se verificó que la temperatura máxima diaria fuera superior a la temperatura mínima y se revisaron posibles valores atípicos o registros fuera de los rangos esperados. Asimismo, se evaluó la disponibilidad temporal de las series, ya que la presencia de una cantidad elevada de datos faltantes puede afectar el cálculo y la interpretación de los índices climáticos.

3.4. Cálculo de índices de cambio climático mediante RClimDex

Para el cálculo de los Índices de Cambio Climático se utilizó el software R, en conjunto con el paquete RClimDex, el cual permite calcular índices climáticos a partir de series diarias de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación.

Debido a que se trabajó con una versión de R 4.3.x, previamente fue necesario instalar Rtools43, herramienta requerida para compilar e instalar algunos paquetes utilizados por RClimDex. Posteriormente, se reinició el programa R y se instaló el paquete remotes, mediante el siguiente comando:

```
install.packages("remotes")
```

Una vez instalado, se procedió a incorporar las dependencias necesarias para el funcionamiento de RClimDex. Primero se instalaron los paquetes PCICt y climdex.pcic directamente desde sus respectivos repositorios de GitHub:

```
remotes::install_github("pacificclimate/PCICt")
```

```
remotes::install_github("pacificclimate/climdex.pcic")
```

Posteriormente, se instaló el paquete RClimDex mediante:

remotes::install_github("ECCC-CDAS/RClimDex")

Después de concluir la instalación de los paquetes y sus dependencias, se cargó RClimDex dentro del entorno de R:

library(RClimDex)

Finalmente, se inició la interfaz del programa utilizando:

rclimdex.start()

A través de esta interfaz (Figura 20) se ingresaron las series climatológicas diarias previamente preparadas y organizadas para cada estación, considerando las variables de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. A partir de estos datos se calcularon los índices climáticos seleccionados para evaluar cambios en la frecuencia, intensidad y duración.

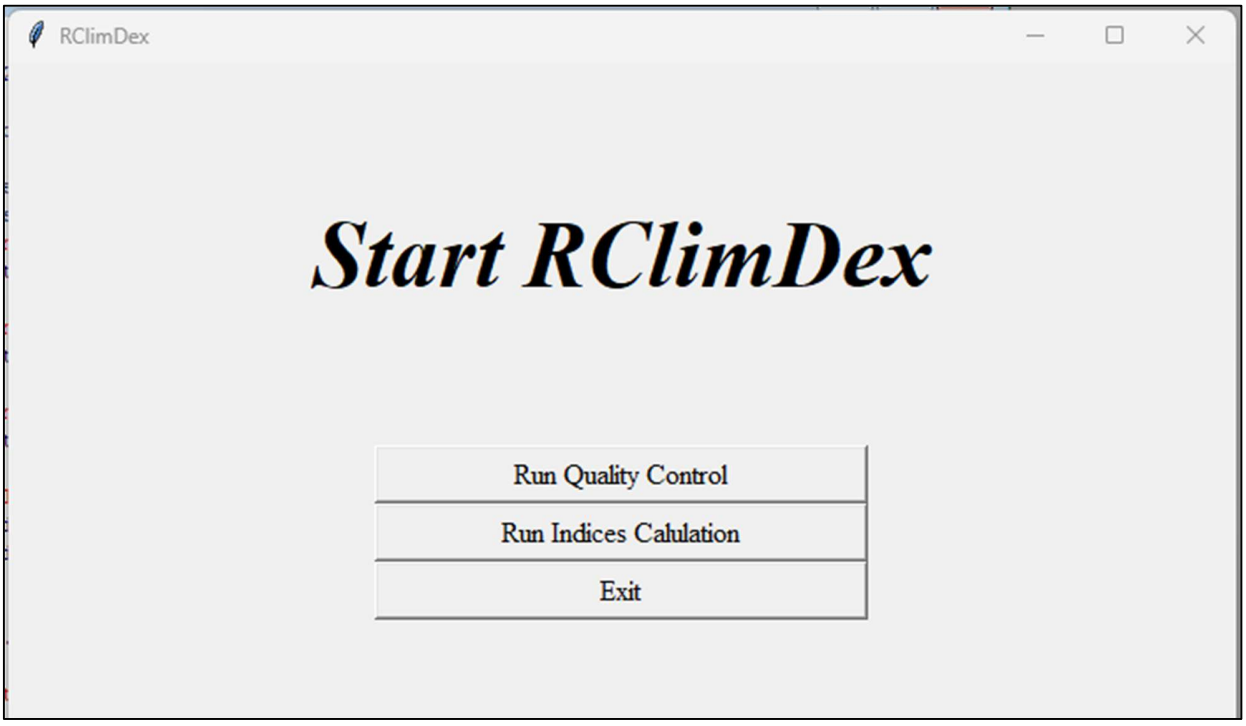


Figura 20 Interfaz de RClimdex para calcular ICC

Una vez obtenidos los índices de cambio climático (ICC) mediante RClimDex, se realizó un análisis de tendencia temporal mediante la prueba no paramétrica de Mann–Kendall (Mann, 1945; Kendall,

1975) para determinar si los cambios observados durante el periodo 1980–2023 presentaban una tendencia creciente o decreciente y si ésta era estadísticamente significativa.

La significancia estadística se evaluó considerando un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Por lo tanto, cuando el valor de p fue menor a 0.05 se rechazó la hipótesis nula y la tendencia se consideró estadísticamente significativa; cuando $p \geq 0.05$, no se contó con evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula.

El análisis de Mann–Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) se automatizó mediante un código desarrollado en Python, debido al número de estaciones e índices climáticos analizados. El procedimiento permitió leer de manera sistemática los resultados anuales generados previamente, aplicar la prueba a cada serie y concentrar los resultados en una base de datos para su posterior análisis espacial.

Para cada combinación de estación–índice, se obtuvo el nivel de significancia correspondiente. Con base en la significancia estadística, los resultados fueron clasificados en cuatro categorías:

PS	Tendencia positiva significativa
PNS	Tendencia positiva no significativa
NS	Tendencia negativa significativa
NNS	Tendencia negativa no significativa

Esta clasificación permitió identificar espacialmente las estaciones que presentaron incrementos o decrementos en los diferentes índices de temperatura y precipitación. Posteriormente, los resultados fueron incorporados a un Sistema de Información Geográfica para representar la distribución espacial de las tendencias en las zonas Centro y Media de San Luis Potosí.

3.5. Análisis de los índices de cambio climático en la Zona Centro

Los índices de cambio climático permiten evaluar modificaciones en la frecuencia, intensidad y duración de eventos extremos de temperatura y precipitación a partir de registros climatológicos diarios. Su utilización facilita la identificación de cambios que no necesariamente son evidentes

mediante el análisis exclusivo de valores medios, permitiendo caracterizar de manera más detallada el comportamiento de los extremos climáticos (Alexander *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2011).

Para la Zona Centro de San Luis Potosí, se analizaron las tendencias de los índices de cambio climático correspondientes al periodo 1980–2024. Una vez calculados los ICC, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann–Kendall a las series anuales de cada estación meteorológica, con el propósito de determinar la dirección y significancia estadística de las tendencias observadas.

En la (Tabla 27) se presentan los resultados correspondientes a los índices asociados con temperaturas extremas, se indica la dirección de la tendencia, de manera que los valores positivos representan tendencias crecientes y los negativos tendencias decrecientes. La significancia estadística fue evaluada considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

El comportamiento de los índices presenta diferencias entre las estaciones meteorológicas que conforman la Zona Centro, tanto en la dirección como en la magnitud de las tendencias. Por ello, el análisis considera la distribución espacial de las tendencias y su significancia estadística, con especial atención a la coincidencia de patrones entre estaciones y a los índices relacionados con condiciones cálidas y frías.

Tabla 27 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (elaboración propia con información de CONAGUA).

Estaciones meteorológicas en la ZCSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas												
	Municipio	TX90p	TN90p	TX10p	TN10p	SU	TR	FD	ID	DTR	TXn	TXx	TNn	TNx
24004	ARMADILLO DE LOS INFANTE	0.0525	-0.3364	-0.2222	-0.1525	0.3121	0.0444	-0.2071	0.0000	0.2404	0.4051	-0.0929	0.3010	-0.3434
24024	SAN LUIS POTOSÍ	0.0949	-0.5253	-0.3141	0.0939	0.3051	-0.0081	0.0596	0.0000	0.4707	0.2404	-0.0101	-0.0121	-0.3798
24034	ZARAGOZA	0.0545	0.1646	0.0131	-0.0747	-0.0071	0.0444	-0.0596	0.0000	-0.0909	-0.1242	0.0778	0.0566	0.1182
24042	MEXQUITIC DE CARMONA	0.1949	-0.0879	-0.0495	0.1313	0.1182	-0.0293	0.1263	0.0000	0.2202	0.0434	0.0768	-0.1313	-0.0778
24046	SANTA MARÍA DEL RÍO	0.2343	0.2152	-0.3010	-0.1040	0.2232	0.2747	-0.0646	0.0000	0.2808	0.1960	0.2657	0.0859	0.1333
24061	MEXQUITIC DE CARMONA	0.1545	0.2495	-0.1616	-0.2455	0.2192	0.0212	-0.0465	0.0000	-0.0768	0.0717	0.1040	0.0606	-0.1323
24070	SAN LUIS POTOSÍ	0.3929	-0.2222	-0.2737	0.3162	0.4626	-0.0687	0.3667	0.0000	0.4222	0.3879	0.2576	-0.3051	-0.1758
24075	SANTA MARÍA DEL RÍO	-0.1313	0.1970	-0.0576	-0.2778	-0.0677	0.0586	-0.1616	0.0000	-0.1212	0.1727	-0.2020	0.3202	0.1040
24078	VILLA DE ARRIAGA	-0.4323	-0.0293	0.0545	-0.1313	-0.2394	-0.0273	0.0232	0.0000	-0.3475	-0.0747	-0.3515	-0.0717	0.0111
24081	SOLEDAD DE GS	0.4263	-0.2121	-0.4828	0.1303	0.6414	0.0000	0.1545	0.0000	0.5485	0.3737	0.1768	0.0980	-0.2030
24093	TIERRA NUEVA	-0.1747	-0.4465	-0.1646	0.3131	0.0303	-0.1939	0.3576	0.0000	0.3778	0.1566	-0.3141	-0.2061	-0.4960
24100	VILLA DE ARRIAGA	0.0495	0.0566	-0.1889	0.0020	0.3273	-0.0182	0.2727	0.0000	0.1071	0.0758	-0.0273	-0.1949	-0.1444
24101	VILLA DE REYES	0.1556	0.5303	0.0253	-0.5727	0.2545	0.0000	-0.4848	0.0000	-0.4727	0.1444	0.2343	0.0667	0.3202
24106	ZARAGOZA	0.3434	0.0394	-0.3374	-0.0202	0.5808	0.0364	0.0414	0.0000	0.3192	0.1384	0.2808	-0.0747	-0.0030
24111	SAN LUIS POTOSÍ	0.0657	0.0636	-0.3141	-0.2465	0.3253	-0.0444	-0.2636	0.0000	0.0384	0.3768	-0.1020	0.2889	-0.1232
24153	SOLEDAD DE GS	-0.1182	-0.2374	-0.0960	0.0455	0.0586	-0.0687	-0.0475	0.0000	0.0364	0.4010	-0.2889	0.1394	-0.4030

Los resultados de la prueba de Mann–Kendall muestran diferencias entre los índices y las estaciones meteorológicas de la Zona Centro durante el periodo 1980–2024. En términos generales, varios índices asociados con condiciones cálidas presentan tendencias positivas, mientras que algunos indicadores relacionados con condiciones frías muestran tendencias negativas. No obstante, este comportamiento no es uniforme en toda la zona, por lo que resulta necesario analizar individualmente cada índice.

TX90p (días cálidos). El índice TX90p presenta predominantemente tendencias positivas. Destacan incrementos estadísticamente significativos en las estaciones 24046 Santa María del Río, 24070 San Luis Potosí, 24081 Soledad de Graciano Sánchez y 24106 Zaragoza. En contraste, algunas estaciones muestran tendencias negativas, principalmente Villa de Arriaga, aunque sin observarse un patrón negativo generalizado. Los resultados sugieren un aumento en la frecuencia de días con temperaturas máximas relativamente altas en diferentes sectores de la Zona Centro.

TN90p (noches cálidas). Este índice presenta un comportamiento más variable espacialmente. Se observan tendencias positivas significativas en 24046 Santa María del Río, 24061 Mexquitic de Carmona y 24101 Villa de Reyes, mientras que existen tendencias negativas importantes en otras estaciones, entre ellas 24004 y 24024. Por lo tanto, el incremento de noches cálidas no constituye un comportamiento homogéneo en toda la Zona Centro.

TX10p (días fríos). En TX10p predominan claramente los valores negativos. Las disminuciones son particularmente evidentes en diversas estaciones, entre ellas 24004, 24024, 24046, 24070, 24081, 24106 y 24111. Debido a que este índice representa la frecuencia de días en los que la temperatura máxima se encuentra por debajo del percentil 10, las tendencias negativas indican una reducción en la ocurrencia de días relativamente fríos.

TN10p (noches frías). El comportamiento de TN10p es espacialmente contrastante. Algunas estaciones presentan tendencias negativas significativas, como 24061 Mexquitic de Carmona, 24075 Santa María del Río, 24101 Villa de Reyes y 24111 San Luis Potosí, mientras que en 24070 San Luis Potosí se observa una tendencia positiva significativa. En consecuencia, la disminución

de noches frías se identifica en varias estaciones, pero no se presenta de manera uniforme en toda la zona.

SU (días de verano). El índice SU muestra uno de los patrones positivos más consistentes de la tabla. Se observan tendencias crecientes en la mayoría de las estaciones, varias de ellas estadísticamente significativas, destacando 24070 San Luis Potosí, 24081 Soledad de Graciano Sánchez y 24106 Zaragoza. Esto indica un incremento en el número de días que superan el umbral de temperatura máxima establecido para este índice y constituye una de las señales más claras de aumento de condiciones cálidas en la Zona Centro.

El índice SU fue seleccionado para su representación espacial debido a que presenta uno de los patrones de tendencia más recurrentes entre las estaciones meteorológicas analizadas de la Zona Centro. Como se observa en la (Figura 21), durante el periodo 1980–2024 predominan las tendencias positivas, varias de ellas estadísticamente significativas, distribuidas en distintos sectores de la zona de estudio. Este comportamiento se observa particularmente en estaciones localizadas en San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez y Zaragoza, entre otros puntos de la región.

La recurrencia de tendencias positivas en diferentes estaciones hace de SU un índice relevante para caracterizar el comportamiento térmico de la Zona Centro, ya que representa el número de días al año en que la temperatura máxima supera los 25 °C. Por lo tanto, el patrón espacial observado indica que el incremento en la frecuencia de días cálidos no corresponde únicamente a una estación aislada, sino que se manifiesta en una parte importante de las estaciones analizada

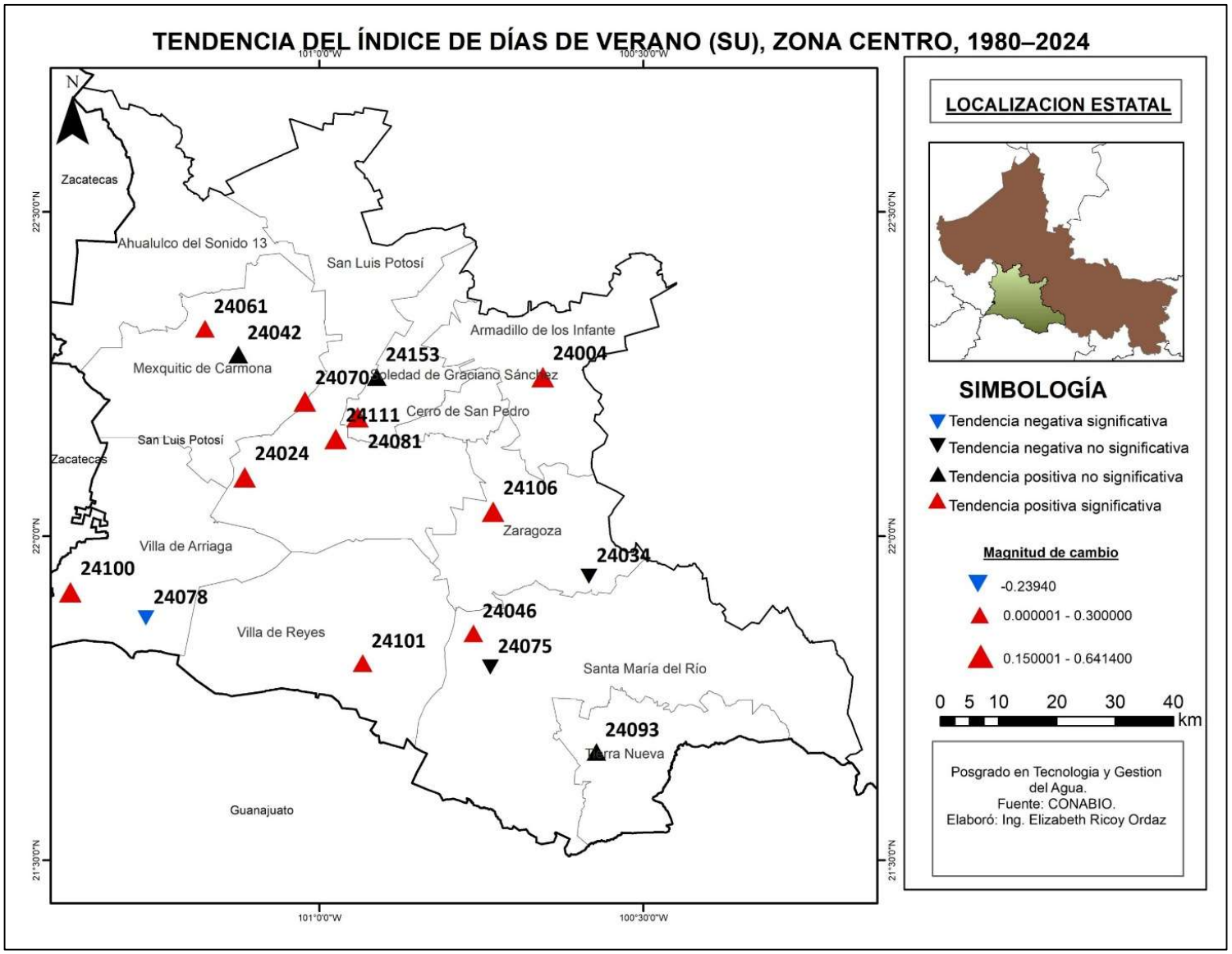


Figura 21 Distribución espacial de las tendencias del índice de días de verano (SU) en la Zona Centro de San Luis Potosí, 1980–2024.

TR (noches tropicales). A diferencia de SU, TR presenta tendencias de menor magnitud y con direcciones variables entre estaciones. Se identifica un incremento significativo en 24046 Santa María del Río, mientras que otras estaciones presentan valores cercanos a cero o tendencias negativas. Por ello, no se observa un patrón regional definido de incremento de noches tropicales.

FD (días de helada). Los resultados de FD presentan tanto tendencias positivas como negativas. Algunas estaciones muestran disminuciones, mientras que en otras se observan incrementos significativos, como 24070 San Luis Potosí, 24093 Tierra Nueva y 24100 Villa de Arriaga. Esta variabilidad indica que los cambios en la frecuencia de días de helada dependen considerablemente de las condiciones locales de cada estación.

ID (días de hielo). El índice ID presenta valores iguales a 0.0000 en todas las estaciones analizadas. Esto indica ausencia de una tendencia detectable durante el periodo estudiado. Este comportamiento puede estar relacionado con la escasa o nula ocurrencia de días en los que la temperatura máxima permanece por debajo de 0 °C en la Zona Centro.

DTR (rango diurno de temperatura). En este índice predominan las tendencias positivas, con incrementos significativos en diversas estaciones, entre ellas 24004, 24024, 24042, 24046, 24070, 24081, 24093 y 24106. Debido a que DTR representa la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria, su incremento indica una ampliación de la oscilación térmica diaria en buena parte de las estaciones estudiadas. No obstante, existen estaciones con tendencias negativas, por lo que tampoco se trata de un comportamiento completamente uniforme.

TXn (mínimo de las temperaturas máximas). Predominan las tendencias positivas y se observan incrementos significativos en estaciones como 24004, 24024, 24070, 24081, 24111 y 24153. Este comportamiento indica que, en varias estaciones, los valores más bajos alcanzados por las temperaturas máximas han tendido a ser mayores con el tiempo.

TXx (máximo de las temperaturas máximas). El comportamiento de TXx es más heterogéneo, aunque se identifican tendencias positivas significativas en 24046 Santa María del Río, 24070 San Luis Potosí, 24101 Villa de Reyes y 24106 Zaragoza. También existen tendencias negativas en

algunas estaciones, por lo que el aumento de las temperaturas máximas extremas no se manifiesta con la misma dirección en toda la Zona Centro.

TNn (mínimo de las temperaturas mínimas). TNn presenta resultados contrastantes. Algunas estaciones muestran tendencias positivas significativas, como 24004, 24075, 24111, mientras que en otras se identifican tendencias negativas, destacando 24070 San Luis Potosí y 24093 Tierra Nueva. Esto evidencia diferencias espaciales importantes en el comportamiento de las temperaturas mínimas extremas.

TNx (máximo de las temperaturas mínimas). Finalmente, TNx presenta un comportamiento predominantemente negativo en varias estaciones, aunque también se observan tendencias positivas, como en 24101 Villa de Reyes. La ausencia de una dirección común entre las estaciones indica que las temperaturas mínimas más altas presentan una respuesta espacialmente variable dentro de la Zona Centro.

En la (Tabla 28) se presentan los resultados correspondientes a los índices asociados con precipitaciones extremas, se indica la dirección de la tendencia, de manera que los valores positivos representan tendencias crecientes y los negativos tendencias decrecientes. La significancia estadística fue evaluada considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Tabla 28 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de Precipitación (elaboración propia con información de CONAGUA).

Estaciones meteorológicas en la ZCSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación										
	Municipio	CDD	CWD	R95p	R99p	RX1day	RX5day	SDII	PRCPTOT	R10mm	R20mm	R25mm
24004	Armadillo De Los Infante	0.1990	0.1101	-0.0495	0.1071	-0.0121	0.0576	-0.1111	0.0020	-0.1354	-0.0263	0.0667
24024	San Luis Potosí	0.0545	0.1263	0.1081	0.1616	0.1444	0.0636	0.0081	0.1131	0.0374	0.0818	0.1131
24034	Zaragoza	0.3000	-0.1505	0.3010	0.3687	0.3899	0.2505	0.4081	0.1535	0.3626	0.3848	0.3364
24042	Mexquitic De Carmona	0.1747	-0.1768	0.0404	0.1879	0.1263	0.0495	0.2505	-0.0586	0.0081	0.0778	0.1444
24046	Santa María Del Río	0.0081	0.0556	0.1970	0.2051	0.2475	0.1828	0.3293	0.1616	0.1677	0.2273	0.2556
24061	Mexquitic De Carmona	0.0778	0.0394	0.1273	0.1657	0.1071	0.1152	0.0707	0.0929	0.0929	0.1384	0.1657
24070	San Luis Potosí	0.2495	-0.1051	0.0061	0.0556	0.0525	0.1515	0.2162	-0.0444	0.0162	0.0556	0.0111
24075	Santa María Del Río	0.1293	-0.0030	0.2465	0.3061	0.0121	0.2000	0.2141	0.1737	0.2667	0.3303	0.3495
24078	Villa De Arriaga	0.0556	0.0949	0.0879	0.1576	0.0596	0.1253	-0.0707	0.1192	0.0394	0.0343	0.1717
24081	Soledad De Graciano Sánchez	-0.0172	0.0697	0.0333	0.0111	-0.0162	0.0687	-0.1192	0.1030	-0.0040	0.0323	-0.0101
24093	Tierra Nueva	0.0848	0.0596	0.0586	0.0242	0.0455	0.2051	-0.0061	0.1212	0.0808	0.0717	0.0535
24100	Villa De Arriaga	-0.1848	0.1111	-0.0636	-0.0707	-0.0010	-0.1313	-0.2626	0.0172	-0.1061	-0.1263	-0.0495
24101	Villa De Reyes	0.1111	0.0313	0.1202	0.1051	0.1212	0.1768	0.1939	0.1091	0.1242	0.0404	0.1081
24106	Zaragoza	0.1596	0.0273	0.1576	0.1566	0.0808	0.1182	0.1980	0.1071	0.1687	0.1616	0.1616
24111	San Luis Potosí	-0.0061	0.0818	-0.1131	-0.1354	-0.2192	-0.1081	-0.1354	-0.0586	-0.0949	-0.0747	-0.0758
24153	Soledad De Graciano Sánchez	0.1879	0.1212	-0.0586	-0.0879	-0.2162	0.0010	-0.1313	-0.0626	-0.0838	-0.0919	-0.0768

Los índices asociados con la precipitación presentan un comportamiento más variable entre las estaciones de la Zona Centro durante el periodo 1980–2024. A diferencia de algunos índices de temperatura, no se observa una dirección dominante para todos los indicadores de precipitación.

CDD (días secos consecutivos). El índice presenta principalmente tendencias positivas, aunque en varias estaciones no son estadísticamente significativas. Destacan tendencias positivas significativas en 24034 Zaragoza y 24070 San Luis Potosí. Este comportamiento indica que en estas estaciones existe una tendencia hacia una mayor duración de los periodos consecutivos sin precipitación, lo cual resulta relevante para el análisis de condiciones de sequedad.

CWD (días húmedos consecutivos). Las tendencias de CWD son en general débiles y variables entre estaciones, sin observarse un patrón espacial claramente dominante. Esto indica que, para el periodo estudiado, no existe evidencia generalizada de un cambio significativo en la duración de los periodos consecutivos húmedos en la Zona Centro.

R95p (precipitación en días muy húmedos). Se observan tendencias positivas significativas en 24034 Zaragoza y 24075 Santa María del Río. En el resto de las estaciones predominan tendencias de menor consistencia estadística. Estos resultados indican que el comportamiento de la precipitación asociada con días muy húmedos presenta cambios localizados y no generalizados en toda la región.

R99p (precipitación en días extremadamente húmedos). Este índice muestra tendencias positivas significativas principalmente en 24034 Zaragoza, 24046 Santa María del Río y 24075 Santa María del Río. El resultado sugiere un incremento en la ocurrencia o contribución de precipitaciones asociadas con eventos extremadamente húmedos en algunas estaciones, aunque el patrón no se reproduce de manera uniforme en toda la Zona Centro.

RX1day (precipitación máxima en un día). Las tendencias son predominantemente positivas, destacando incrementos significativos en 24034 Zaragoza y 24046 Santa María del Río. En contraste, las estaciones 24111 San Luis Potosí y 24153 Soledad de Graciano Sánchez presentan

tendencias negativas significativas. Este comportamiento contrastante evidencia diferencias espaciales en la evolución de los eventos de precipitación máxima diaria.

RX5day (precipitación máxima acumulada en cinco días). La mayoría de las estaciones presenta tendencias positivas, aunque solo algunas alcanzan significancia estadística. Destaca 24093 Tierra Nueva, con una tendencia positiva significativa. En términos generales, el índice muestra una tendencia hacia mayores acumulados de precipitación en periodos consecutivos de cinco días en varias estaciones, aunque sin constituir un patrón estadísticamente significativo para toda la zona.

SDII (índice simple de intensidad diaria). Este es uno de los índices que presenta un patrón positivo más recurrente. Se identifican tendencias positivas significativas en 24034 Zaragoza, 24042 Mexquitic de Carmona, 24046 Santa María del Río, 24070 San Luis Potosí y 24075 Santa María del Río. Por ello, SDII constituye un indicador particularmente relevante para la Zona Centro, ya que muestra que en diversas estaciones los días con precipitación tienden a presentar una mayor intensidad, aun cuando este comportamiento no se manifiesta en todas las estaciones.

El SDII constituye uno de los índices más relevantes dentro del análisis de precipitación de la Zona Centro, debido a la recurrencia de tendencias positivas estadísticamente significativas en distintas estaciones meteorológicas. Este índice representa la intensidad promedio de la precipitación durante los días húmedos, por lo que permite identificar modificaciones en la forma en que se presentan los eventos de lluvia, independientemente del comportamiento de la precipitación total anual.

Como se observa en la (Figura 22) las tendencias positivas significativas se presentan en diferentes sectores de la Zona Centro, particularmente en estaciones ubicadas en Zaragoza, Mexquitic de Carmona, Santa María del Río y San Luis Potosí. Su distribución espacial muestra que este comportamiento no se limita a una sola localidad, sino que se repite en distintos puntos de la región. Aunque también se identifican estaciones con tendencias negativas o positivas no significativas, existe una presencia importante de incrementos significativos en este índice.

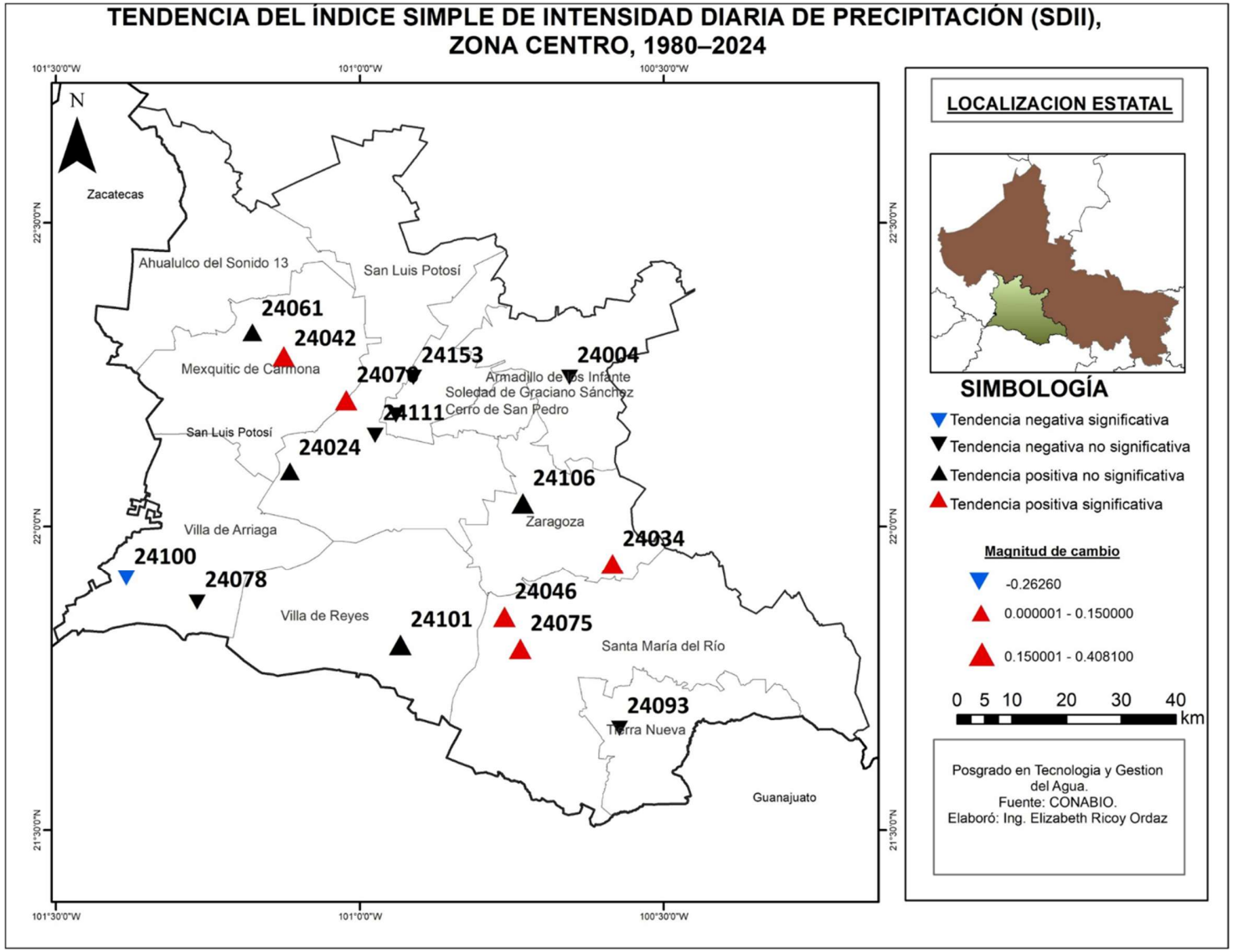


Figura 22 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice Simple de Intensidad Diaria de Precipitación (SDII) en la Zona Centro de San Luis Potosí, 1980–2024.

PRCPTOT (precipitación total anual en días húmedos). Este índice presenta tanto tendencias positivas como negativas y, de acuerdo con la tabla, no se observan tendencias estadísticamente significativas. Esto indica que la cantidad total anual de precipitación no muestra una dirección de cambio suficientemente consistente durante el periodo analizado. Este resultado es especialmente interesante al compararlo con SDII: la ausencia de una tendencia significativa en la precipitación total no impide que existan cambios en la intensidad de los eventos de precipitación.

R10mm (días con precipitación ≥10 mm). El comportamiento es predominantemente positivo, aunque la mayoría de las tendencias no son significativas. Destaca 24075 Santa María del Río, donde se presenta una tendencia positiva significativa. Por lo tanto, no se identifica un incremento generalizado de los días con precipitaciones iguales o superiores a 10 mm en toda la Zona Centro.

R20mm (días con precipitación ≥20 mm). Se observan tendencias positivas en varias estaciones, con incrementos significativos en 24034 Zaragoza, 24046 Santa María del Río y 24075 Santa María del Río. Esto evidencia cambios localizados en la frecuencia de eventos de precipitación de mayor intensidad.

R25mm (días con precipitación ≥25 mm). El comportamiento es similar al observado en R20mm. Destacan tendencias positivas significativas en 24034 Zaragoza, 24046 Santa María del Río y 24075 Santa María del Río, mientras que el resto de las estaciones presenta principalmente tendencias no significativas. Esto refuerza la existencia de cambios en los eventos de precipitación intensa en determinados sectores de la Zona Centro.

3.6. Análisis de los índices de cambio climático en la Zona Media

Los resultados correspondientes a la Zona Media durante el periodo 1980–2024 muestran una presencia importante de tendencias asociadas con el incremento de condiciones cálidas. Aunque existen diferencias entre estaciones e índices, algunos indicadores presentan patrones recurrentes, particularmente TX90p, SU, DTR, TXn y TXx, mientras que los índices asociados con temperaturas relativamente frías muestran con frecuencia tendencias negativas como se muestra en la (Tabla 29)

Tabla 29 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (elaboración propia con información de CONAGUA).

Estaciones meteorológicas ZMSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas											
	Municipio	TX90P	TN90P	TX10P	TN10P	SU	TR	FD	ID	DTR	TXN	TXX	TNN
SL24006	CARDENAS (DGE)	0.5253	0.2323	-0.2131	-0.1949	0.2747	0.2020	-0.0616	0.0000	0.1980	0.0717	0.2434	0.0788
SL24008	CERRITOS	0.4354	0.1949	-0.3394	-0.3182	0.3899	0.0303	-0.1131	0.0000	0.3091	0.0939	0.3515	0.0869
SL24011	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	0.0394	0.0061	0.0323	-0.0606	-0.0727	0.1061	-0.1455	0.0000	-0.0111	-0.0273	0.0667	0.1263
SL24013	COLONIA ALVARO OBREGON	0.0354	-0.5091	-0.0576	0.1596	0.1222	-0.4343	-0.1606	0.0000	0.4364	-0.0172	0.0657	0.1000
SL24045	NOGAL OSCURO	0.4051	0.1465	-0.5051	-0.4263	0.4414	0.1202	-0.1606	0.0000	0.3667	0.4111	0.0616	0.4081
SL24047	OJO DE AGUA	0.0596	-0.0010	-0.1444	-0.0364	0.0778	-0.1192	-0.0253	0.0000	0.1545	0.2515	-0.0343	-0.0172
SL24049	PAPAGAYOS	0.0626	-0.3040	-0.5364	-0.3545	0.5525	-0.1818	-0.1293	0.0000	0.3808	0.5263	-0.3071	0.5848
SL24051	PASO DE SAN ANTONIO	-0.0556	-0.3263	-0.0101	0.3576	-0.0859	-0.1707	0.3141	0.0000	0.1333	0.0616	-0.0616	-0.2444
SL24052	PASTORA	0.5030	0.0444	-0.5636	-0.1010	0.6040	-0.0667	0.0737	0.0000	0.5808	0.2323	0.1333	-0.0030
SL24054	PEDRO MONTOYA	0.4303	0.1020	-0.2828	-0.1293	0.3424	0.1020	-0.0545	0.0000	0.4253	-0.0040	0.2667	0.2404
SL24060	RAYON	0.1636	-0.0566	-0.3091	-0.0909	0.1475	-0.0869	-0.0980	0.0000	0.1798	0.1172	-0.0515	0.2010
SL24062	RIOVERDE (OBS)	0.0081	-0.1040	-0.1657	0.0283	-0.0384	-0.0848	-0.0515	0.0000	0.2434	0.2687	0.0465	0.0010
SL24068	SAN JUAN DEL MECO	0.0404	-0.3081	-0.4556	-0.5960	0.5394	-0.1859	-0.0717	0.0000	0.3323	0.4212	-0.2414	0.4657

Estaciones meteorológicas ZMSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas											
	Municipio	TX90P	TN90P	TX10P	TN10P	SU	TR	FD	ID	DTR	TXN	TXX	TNN
SL24071	SAN NICOLAS TOLENTINO	0.0051	0.1253	-0.3596	-0.3576	0.2899	0.0030	-0.0141	0.0000	0.0818	0.2859	-0.1040	0.1131
SL24097	VIGAS	0.3020	-0.3091	-0.4162	0.0737	0.3141	-0.3848	-0.1192	0.0000	0.5323	0.2051	0.1313	0.1000
SL24103	VILLA JUAREZ	0.2798	-0.1081	-0.3525	-0.1000	0.3556	-0.0818	-0.1596	0.0000	0.2616	0.2707	0.2545	0.1889
SL24110	OJO DE AGUA SECO	0.3818	-0.1212	-0.4333	-0.0434	0.2939	-0.1323	0.0000	0.0000	0.4525	0.1030	0.0980	0.1081
SL24114	RIOVERDE (DGE)	0.4980	0.2121	-0.3939	-0.3990	0.3657	0.1970	-0.2677	0.0000	0.4404	0.0515	0.3505	0.3384
SL24130	GRANJENAL	0.4152	0.3717	-0.2081	-0.1111	0.2131	0.3404	-0.0182	0.0000	0.2121	-0.1111	0.2687	0.0111
SL24136	TANLU	-0.1192	0.1990	-0.2263	-0.3475	-0.0051	0.2091	-0.0384	0.0000	-0.2434	0.1475	-0.1848	0.2172
SL24159	LA MORITA	0.1253	-0.0909	-0.0626	-0.0848	0.0677	-0.1535	-0.1364	0.0000	0.1202	0.0192	0.1091	0.3232
SL24172	MANANTIAL DE MEDIALUNA	-0.0343	-0.5354	-0.0949	0.4020	-0.1283	-0.4636	0.0081	0.0000	0.4677	0.0788	-0.0192	-0.0606
SL24174	PUERTO DE LOBOS	0.2172	-0.1293	-0.4899	-0.3030	0.4828	-0.1414	-0.0111	0.0000	0.4242	0.4343	0.0434	0.3162
SL24187	TEPEYAC	0.4475	0.2444	-0.2707	0.0444	0.3020	0.1263	0.0051	0.0000	0.5121	-0.2061	0.2616	0.0980
SL24190	LA LIBERTAD	0.2030	-0.0859	-0.0949	-0.0101	0.0566	-0.0364	-0.0202	0.0000	0.1626	-0.0798	0.2212	-0.0495
SL24193	SAN JOSE DE TAPANCO	0.0545	0.2717	-0.2828	-0.3455	0.0889	0.2636	-0.0667	0.0000	-0.0313	0.2131	-0.0798	0.1303
SL24195	LAS TABLAS	0.3394	-0.1202	-0.4010	0.0081	0.3889	-0.2343	0.1616	0.0000	0.3869	0.1838	0.0242	-0.1687

TX90p (días cálidos). Se observa un claro predominio de tendencias positivas entre las estaciones analizadas, varias de ellas estadísticamente significativas. Este comportamiento es visible en estaciones de Cárdenas, Cerritos, Pastora, Pedro Montoya, San Nicolás Tolentino, Villa Juárez, Rioverde, Puerto de Lobos, Tepeyac y Las Tablas, entre otras. La recurrencia espacial de estas tendencias indica un aumento en la frecuencia de días con temperaturas máximas relativamente altas en una parte importante de la Zona Media.

TN90p (noches cálidas). Este índice presenta un comportamiento más contrastante. Se observan tanto tendencias positivas como negativas significativas dependiendo de la estación. Destacan tendencias positivas en estaciones como Nogal Oscuro y Rioverde, mientras que varias estaciones presentan valores negativos. En consecuencia, el incremento de noches cálidas no muestra la misma consistencia espacial que los días cálidos.

TX10p (días fríos). En este índice existe un marcado predominio de tendencias negativas, varias de ellas estadísticamente significativas. Debido a que TX10p representa la frecuencia de días en los que la temperatura máxima se encuentra por debajo del percentil 10, este patrón indica una disminución de los días relativamente fríos en numerosas estaciones de la Zona Media.

TN10p (noches frías). También predominan las tendencias negativas en una cantidad importante de estaciones, aunque existen algunos comportamientos positivos. Las disminuciones significativas observadas en diferentes puntos indican una reducción de la frecuencia de noches relativamente frías en parte de la Zona Media, aunque con mayor variabilidad espacial que TX10p.

SU (días de verano). Este índice presenta uno de los patrones más claros de toda la tabla. Predominan ampliamente las tendencias positivas, muchas de ellas estadísticamente significativas y distribuidas entre diferentes municipios. Destacan estaciones de Cárdenas, Cerritos, Nogal Oscuro, Pastora, Pedro Montoya, San Nicolás Tolentino, Villa Juárez, Ojo de Agua Seco, Rioverde, Puerto de Lobos, Tepeyac y Las Tablas, entre otras. La recurrencia de este comportamiento indica un incremento generalizado en la frecuencia de días con temperatura máxima superior a 25 °C,

convirtiendo a SU en uno de los índices más representativos del comportamiento térmico de la Zona Media.

El índice SU fue seleccionado para su representación espacial debido a que constituye uno de los indicadores con mayor recurrencia de tendencias positivas estadísticamente significativas entre las estaciones meteorológicas de la Zona Media. Este índice contabiliza el número anual de días en los que la temperatura máxima supera los 25 °C, por lo que permite identificar cambios en la frecuencia de condiciones térmicas cálidas.

Como se observa en la (Figura 23) las tendencias positivas significativas presentan una amplia distribución espacial, identificándose tanto en el norte como en las porciones centro, este y sur de la Zona Media. La presencia de este comportamiento en estaciones pertenecientes a diferentes municipios indica que el incremento en la frecuencia de días cálidos no corresponde a un fenómeno localizado en una sola estación o sector, sino que se manifiesta de manera recurrente en una parte importante del territorio analizado. Aunque existen algunas estaciones con tendencias negativas o positivas no significativas, estas son menos frecuentes respecto al predominio de tendencias positivas significativas.

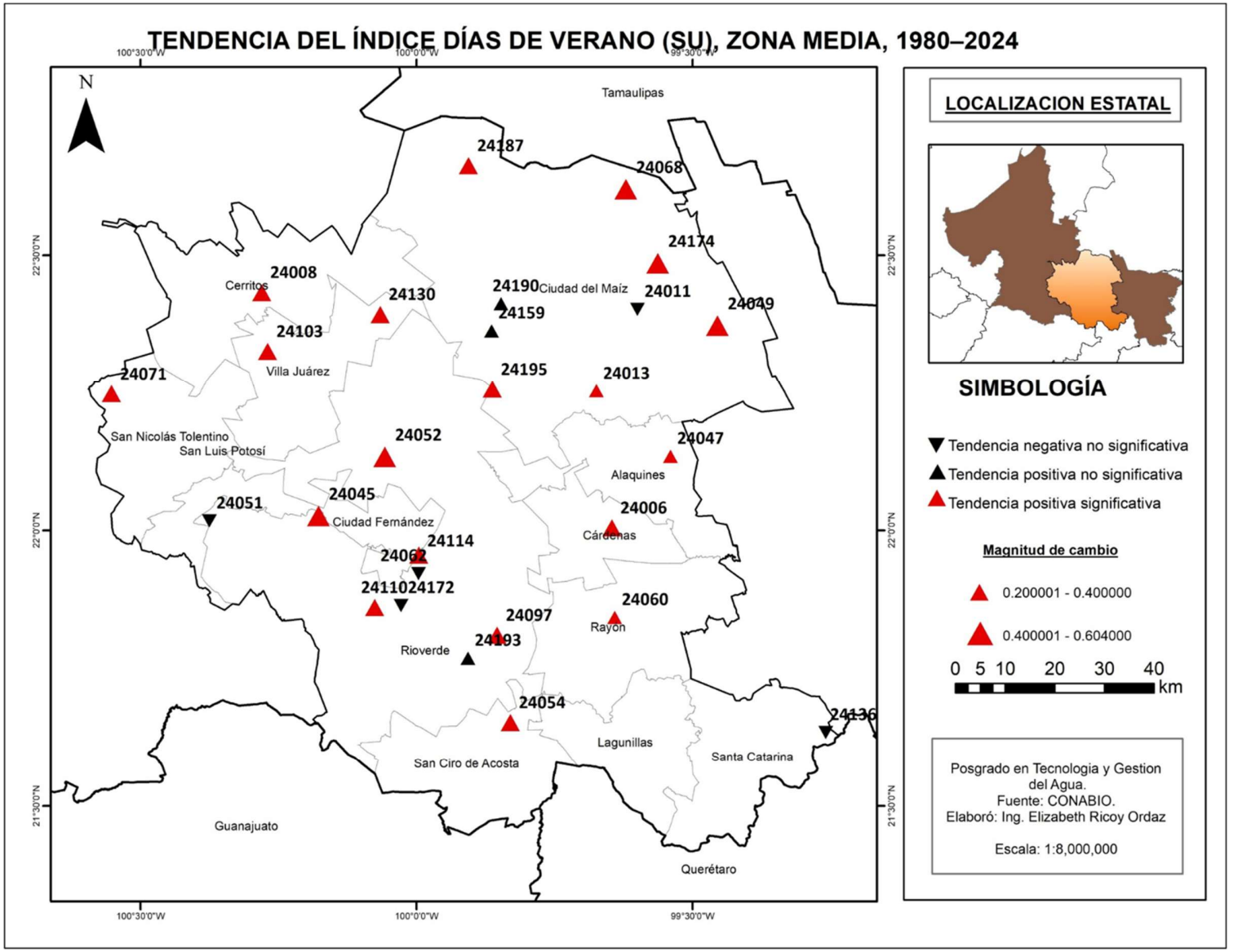


Figura 23 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice de Días de Verano (SU) en la Zona Media de San Luis Potosí, 1980–2024.

TR (noches tropicales). El índice TR presenta predominantemente valores negativos o cercanos a cero, aunque existen algunas tendencias positivas. En comparación con SU, su comportamiento es mucho menos uniforme, por lo que no se identifica un incremento generalizado de noches tropicales en toda la región.

FD (días de helada). Predominan las tendencias negativas, con algunas estaciones que presentan disminuciones estadísticamente significativas. Esto indica una reducción en la ocurrencia de días de helada en determinados sectores de la Zona Media. Sin embargo, también aparecen algunas tendencias positivas, por lo que el comportamiento no es completamente uniforme.

ID (días de hielo). Al igual que observamos en la Zona Centro, el índice ID presenta valores de 0.00 prácticamente en todas las estaciones, sin identificarse un patrón de tendencia. Esto es congruente con la baja ocurrencia de condiciones en las que la temperatura máxima diaria permanece por debajo de 0 °C en esta región.

DTR (rango diurno de temperatura). Es otro de los índices con un patrón particularmente claro. Predominan las tendencias positivas, varias estadísticamente significativas, en estaciones distribuidas ampliamente por la Zona Media. Esto indica cambios en la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas diarias, aunque existen algunas estaciones con comportamiento negativo.

TXn (mínimo de las temperaturas máximas). Predominan las tendencias positivas y se observan incrementos significativos en numerosas estaciones. Esto indica que, en distintos sectores de la Zona Media, las temperaturas máximas más bajas registradas anualmente tienden a presentar un comportamiento creciente.

TXx (máximo de las temperaturas máximas). También existe un predominio importante de tendencias positivas, con resultados significativos en distintas estaciones. Este comportamiento indica una mayor recurrencia espacial de tendencias crecientes en los valores extremos de temperatura máxima y complementa los resultados observados en TX90p y SU.

TNn (mínimo de las temperaturas mínimas). Presenta un comportamiento espacial más variable, con tendencias positivas y negativas. Se identifican incrementos significativos en diversas estaciones, pero no existe una dirección completamente uniforme para toda la Zona Media.

TNx (máximo de las temperaturas mínimas). Finalmente, TNx presenta una combinación de tendencias positivas y negativas, incluyendo disminuciones significativas en varias estaciones. Por ello, el comportamiento de los extremos superiores de temperatura mínima resulta menos consistente espacialmente que el observado para los índices relacionados con temperatura máxima.

Los resultados de los índices de precipitación para la Zona Media durante el periodo **1980–2024** se muestran en la (Tabla 30) con una importante variabilidad entre estaciones. En general, las tendencias significativas se concentran en determinados índices y localidades, por lo que no se identifica una respuesta uniforme del régimen de precipitación en toda la región.

Tabla 30 Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de Precipitación (elaboración propia con información de CONAGUA).

Estaciones meteorológicas ZMSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación										
	Municipio	CDD	CWD	R95P	R99P	RX1DAY	RX5DAY	SDII	PRCPTOT	R10MM	R20MM	R25MM
SL24006	CARDENAS (DGE)	0.1768	-0.1263	0.1212	0.0737	0.1495	0.0758	0.2333	0.0626	0.1192	0.1293	0.0788
SL24008	CERRITOS	0.3323	-0.1333	-0.1404	-0.0131	-0.0899	-0.1960	0.0404	-0.1859	-0.1283	-0.1889	
SL24011	CIUDAD DEL MAIZ (DGE)	0.1253	-0.0808	-0.0778	-0.0444	-0.1040	-0.0838	-0.0051	-0.0949	0.0232	-0.1293	
SL24013	COLONIA ALVARO OBREGON	0.1010	0.0273	0.0273	0.0495	0.1444	0.0879	0.0778	0.0949	-0.0131	0.0848	
SL24045	NOGAL OSCURO	0.0747	-0.0485	-0.1192	-0.1596	-0.1808	-0.1131	-0.1192	-0.1101	-0.0970	-0.0879	
SL24047	OJO DE AGUA	-0.0394	0.0192	0.1525	0.1242	0.1646	0.1394	-0.0444	0.0727	-0.0899	-0.0263	
SL24049	PAPAGAYOS	0.0949	-0.0303	0.0172	0.0778	0.0889	-0.0172	-0.0798	-0.0970	-0.2828	-0.2222	
SL24051	PASO DE SAN ANTONIO	-0.0485	0.1020	-0.2919	-0.1828	-0.3465	-0.2566	-0.2505	-0.2343	-0.2040	-0.1909	
SL24052	PASTORA	0.1253	-0.2303	-0.0758	-0.1232	-0.1667	-0.1121	-0.0172	-0.1616	-0.1394	-0.0364	
SL24054	PEDRO MONTOYA	-0.0747	0.1091	0.0879	0.0677	0.1424	0.0747	-0.0313	0.1152	0.0798	0.0566	
SL24060	RAYON	0.2879	-0.1040	-0.0848	-0.0818	-0.0869	-0.0505	-0.0859	-0.1232	-0.1040	-0.1061	
SL24062	RIOVERDE (OBS)	-0.1535	0.2081	0.3939	0.1505	0.3586	0.4707	0.3808	0.4303	0.4152	0.3980	
SL24068	SAN JUAN DEL MECO	-0.4333	0.0152	0.0293	0.0384	0.0263	0.0525	-0.3495	0.1091	-0.0667	-0.0747	

Estaciones meteorológicas ZMSLP	1980-2024	Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación										
	Municipio	CDD	CWD	R95P	R99P	RX1DAY	RX5DAY	SDII	PRCPTOT	R10MM	R20MM	R25MM
SL24071	SAN NICOLAS TOLENTINO	0.0343	0.0040	-0.1040	-0.0747	-0.0535	-0.1758	-0.3394	-0.1616	-0.2293	-0.2626	
SL24097	VIGAS	0.1525	-0.1485	-0.0182	0.0384	0.0444	-0.0677	-0.0101	0.0000	-0.0242	0.0727	
SL24103	VILLA JUAREZ	0.2222	-0.087879	-0.158586	-0.090909	-0.2525	-0.211111	0.0040404	-0.105051	-0.023232	-0.162626	
SL24110	OJO DE AGUA SECO	0.2657	-0.2192	0.1293	0.0758	0.1354	0.0778	0.2687	-0.0626	-0.1263	0.0404	
SL24114	RIOVERDE (DGE)	0.0616	-0.1192	0.0455	0.0172	0.0101	0.0101	0.0424	0.0081	0.0242	0.0364	
SL24130	GRANJENAL	0.2121	-0.1646	0.3182	0.1828	0.2869	0.1859	0.2929	0.1525	0.2404	0.2919	
SL24136	TANLU	-0.0364	-0.0051	0.0616	0.0263	0.0162	-0.0172	0.0606	0.0040	0.0091	-0.0758	
SL24159	LA MORITA	0.2121	-0.1646	0.2586	0.0525	0.1646	0.1869	0.2071	0.2707	0.2323	0.2020	
SL24172	MANANTIAL DE MEDIALUNA	0.1424	-0.1101	0.0222	-0.0798	-0.1131	-0.0475	0.0576	-0.0040	-0.0131	0.0040	
SL24174	PUERTO DE LOBOS	0.2949	-0.2061	0.0404	0.0152	-0.0253	-0.0202	0.0424	-0.1556	-0.1434	-0.0323	
SL24187	TEPEYAC	0.4848	-0.3101	0.0273	0.0556	0.0515	-0.0384	0.2071	-0.1747	0.0222	-0.0121	
SL24190	LA LIBERTAD	0.1163	-0.0788	0.0566	0.0172	0.1000	0.0384	0.1232	0.0293	0.0677	0.1182	
SL24193	SAN JOSE DE TAPANCO	0.2455	-0.1545	0.0990	0.1081	0.1182	0.0576	0.2010	0.0525	0.0010	-0.0333	
SL24195	LAS TABLAS	0.2474	-0.1687	0.0586	-0.0535	-0.0525	-0.1636	0.1152	-0.1152	-0.0424	-0.0202	

CDD (días secos consecutivos). Se observa un predominio de tendencias positivas y varias de ellas son estadísticamente significativas. Este comportamiento se presenta en estaciones distribuidas en distintos municipios, como Cerritos, Rayón, Villa Juárez, Ojo de Agua Seco, Granjeneal, La Morita, Puerto de Lobos, Tepeyac, San José de Tapanco y Las Tablas, entre otras. La recurrencia de tendencias positivas indica que CDD constituye uno de los índices más relevantes de la Zona Media, al evidenciar en distintas localidades una tendencia hacia periodos secos consecutivos más prolongados.

El índice CDD fue seleccionado para su representación espacial debido a la recurrencia de tendencias positivas estadísticamente significativas en diferentes estaciones meteorológicas de la Zona Media. Este índice representa la duración máxima anual de periodos consecutivos con precipitación menor a 1 mm, por lo que constituye un indicador relevante para evaluar cambios en la persistencia de condiciones secas.

Como se observa en la (Figura 24), las tendencias positivas significativas se distribuyen en distintos sectores de la Zona Media, identificándose en estaciones localizadas tanto al norte como en las porciones centro, este y oeste de la región. Aunque también se presentan tendencias positivas no significativas y algunas tendencias negativas, el patrón de incrementos significativos aparece de manera recurrente en estaciones espacialmente separadas, lo que indica que el comportamiento no se encuentra restringido a una sola localidad.

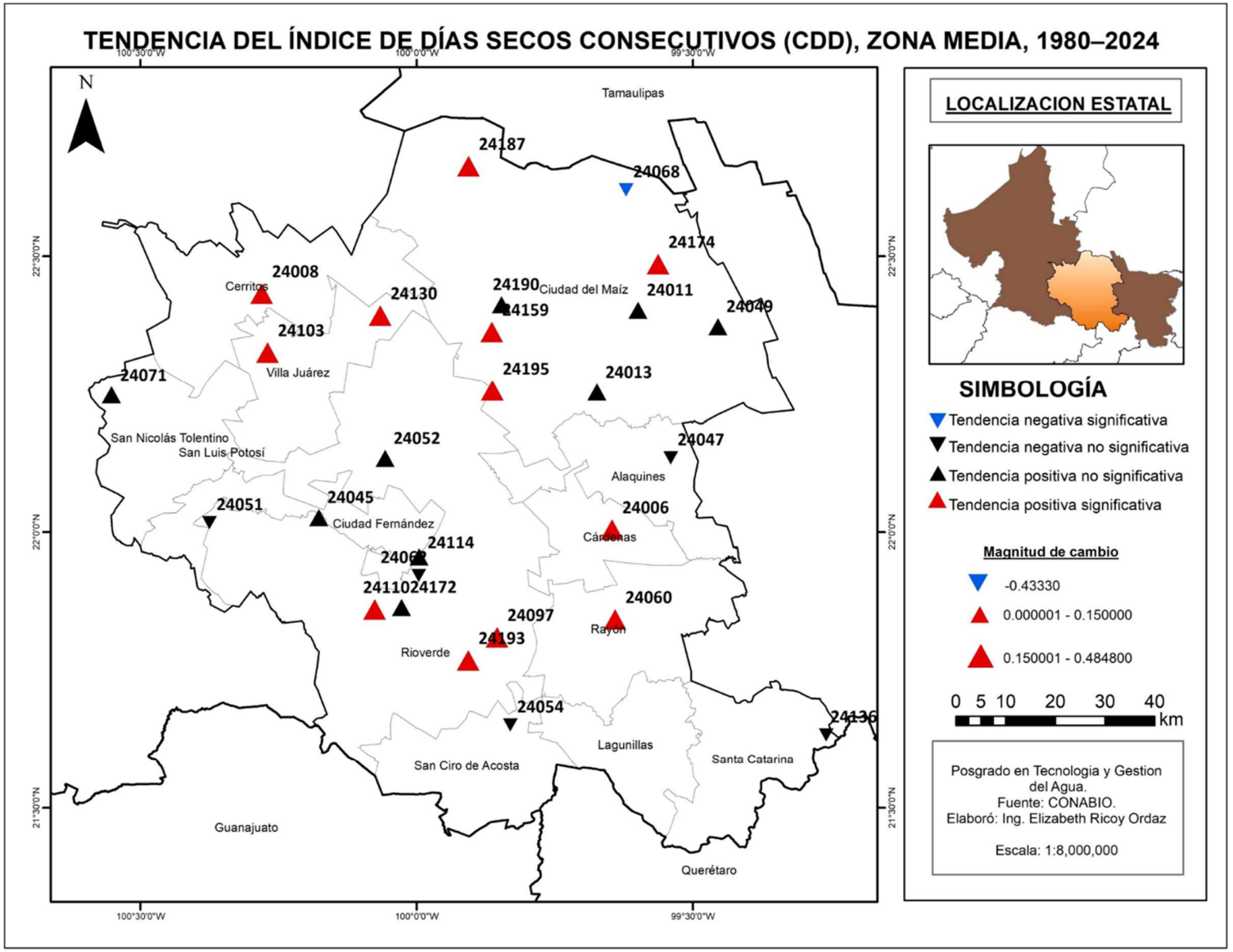


Figura 24 Distribución espacial, significancia y magnitud de las tendencias del Índice de Días Secos Consecutivos (CDD) en la Zona Media de San Luis Potosí, 1980–2024.

CWD (días húmedos consecutivos). A diferencia de CDD, predominan las tendencias negativas, observándose algunas disminuciones significativas. Esto sugiere una reducción de la persistencia de periodos consecutivos con precipitación en determinados sectores de la región. Sin embargo, existen también tendencias positivas, por lo que el comportamiento no es completamente uniforme.

R95p (días muy húmedos). El comportamiento de R95p es variable entre estaciones, con tendencias tanto positivas como negativas. Se identifican algunos incrementos significativos, pero estos se encuentran localizados y no constituyen un patrón generalizado para toda la Zona Media.

R99p (días extremadamente húmedos). Al igual que R95p, este índice presenta diferencias importantes entre estaciones. Se observan tendencias positivas significativas en algunas localidades, pero también valores negativos. Por lo tanto, los eventos de precipitación extremadamente intensa muestran un comportamiento espacialmente diferenciado.

RX1day (precipitación máxima en un día). Las tendencias de RX1day presentan ambas direcciones y la mayoría no alcanza significancia estadística. Esto indica que los máximos de precipitación acumulada en un solo día no muestran una dirección de cambio común para toda la Zona Media durante el periodo estudiado.

RX5day (precipitación máxima acumulada en cinco días). El índice también presenta tendencias positivas y negativas dependiendo de la estación, sin observarse un patrón regional claramente dominante. Los cambios en los máximos acumulados durante cinco días consecutivos parecen, por tanto, responder principalmente a condiciones locales.

SDII (índice simple de intensidad diaria). Se identifican tendencias positivas significativas en algunas estaciones, pero también tendencias negativas significativas en otras. A diferencia de lo observado en la Zona Centro, donde los incrementos de SDII fueron más recurrentes, en la Zona Media la intensidad de la precipitación presenta un comportamiento espacial más variable.

PRCPTOT (precipitación total anual en días húmedos). El índice presenta tanto tendencias positivas como negativas entre estaciones. En consecuencia, no se observa una dirección uniforme de cambio en la precipitación total anual para toda la Zona Media. Este resultado

evidencia que las modificaciones del régimen de precipitación no necesariamente ocurren de la misma manera en todas las localidades.

R10mm (días con precipitación ≥ 10 mm). El comportamiento es variable, con tendencias positivas y negativas distribuidas entre las estaciones. Algunas presentan cambios estadísticamente significativos, pero su distribución no permite identificar un incremento o disminución generalizada de los días con precipitación igual o superior a 10 mm.

R20mm (días con precipitación ≥ 20 mm). Se observa nuevamente una combinación de tendencias positivas y negativas. Los incrementos significativos se concentran en determinadas estaciones, mientras que otras presentan disminuciones, mostrando que la frecuencia de eventos de precipitación más intensa tiene una marcada variabilidad espacial.

R25mm (días con precipitación ≥ 25 mm). Este índice presenta un comportamiento semejante a R20mm, con tendencias en ambas direcciones. Se identifican tanto incrementos como disminuciones significativas en estaciones específicas, sin establecerse una dirección dominante para toda la Zona Media.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis conjunto de las variables climáticas, las pruebas estadísticas, los índices de sequía y los índices de cambio climático permitió identificar diferencias espaciales y temporales en el comportamiento climático de las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí durante el periodo de estudio. Los resultados muestran que las modificaciones observadas no ocurren de manera uniforme entre estaciones, variables ni regiones, lo cual resalta la importancia de realizar el análisis a escala local y evitar que la agregación regional o el promedio de las estaciones oculte comportamientos particulares.

Esta característica espacialmente diferenciada es consistente con estudios previos realizados en San Luis Potosí. Jaimes Arredondo (2022), al analizar las regiones Altiplano y Huasteca mediante Mann–Kendall, Pettitt, SPI e índices ETCCDI, también encontró que las tendencias climáticas presentan diferencias locales y regionales, aun cuando existen señales comunes relacionadas principalmente con la temperatura.

4.1. Variabilidad temporal de la temperatura

Los análisis realizados sobre las series de temperatura evidenciaron tendencias tanto positivas como negativas entre las estaciones meteorológicas; sin embargo, los incrementos adquirieron particular importancia en las temperaturas máximas y en diferentes indicadores asociados con condiciones cálidas. La existencia simultánea de tendencias de diferente signo no representa necesariamente una contradicción, sino que refleja la variabilidad espacial del clima y la respuesta particular de cada estación ante factores regionales y locales.

En este sentido, el análisis individual por estación resultó fundamental. La obtención de un promedio regional podría reducir o incluso compensar tendencias de signo contrario, generando valores cercanos a cero que no representarían adecuadamente los cambios ocurridos en localidades específicas. Por ello, la distribución espacial de las tendencias proporciona información complementaria al comportamiento promedio de cada zona.

Las rupturas detectadas mediante la prueba de Pettitt complementan esta interpretación, al mostrar que algunas series experimentaron modificaciones en su comportamiento durante el periodo analizado. La concentración de diversos puntos de cambio alrededor de las últimas décadas del siglo XX y los primeros años del XXI indica que las series no necesariamente conservaron un comportamiento constante durante todo el periodo. Un estudio previo desarrollado para las regiones Altiplano y Huasteca de San Luis Potosí también reportó rupturas importantes durante la década de 1990, además de tendencias crecientes en temperaturas promedio y máximas.

No obstante, una ruptura estadística no debe interpretarse automáticamente como evidencia de cambio climático, debido a que un punto de cambio puede estar relacionado con variabilidad climática, modificaciones locales o características de la propia serie. Su relevancia en este trabajo radica en que aporta evidencia adicional sobre modificaciones temporales que posteriormente pueden contrastarse con las tendencias de largo plazo y los índices de extremos climáticos.

4.2. Comportamiento de la precipitación

La precipitación presentó un comportamiento más variable espacial y temporalmente que la temperatura. Se identificaron tendencias positivas y negativas dependiendo de la estación y del periodo analizado, sin establecerse una dirección uniforme para toda el área de estudio. Este resultado es importante debido a que demuestra que las modificaciones del régimen pluviométrico no necesariamente se manifiestan como un incremento o disminución generalizada de la precipitación total.

La mayor heterogeneidad espacial de la precipitación respecto de la temperatura ha sido identificada también a escalas mayores. Alexander *et al.* (2006), al analizar índices climáticos a escala global, encontraron que los cambios en los extremos de precipitación presentan una coherencia espacial menor que los cambios en los extremos de temperatura. Esto permite

contextualizar la coexistencia de tendencias positivas y negativas encontrada entre las estaciones de las zonas Centro y Media.

Particularmente, los resultados muestran la importancia de distinguir entre la cantidad total de precipitación y las características de los eventos de lluvia. Una serie puede no presentar una tendencia significativa en su precipitación acumulada y, al mismo tiempo, experimentar modificaciones en la intensidad, frecuencia o duración de los eventos. Esta distinción se vuelve especialmente relevante al contrastar los resultados de precipitación total con los índices SDII, CDD, R95p, R99p, RX1day y RX5day.

4.3. Comportamiento de la sequía

El análisis de sequía permitió complementar los resultados obtenidos mediante las tendencias de precipitación. La ocurrencia de episodios secos en ambas zonas muestra que la sequía constituye un fenómeno recurrente dentro del periodo analizado, aunque su intensidad, duración y distribución temporal presentan diferencias entre estaciones y regiones.

Esta relación debe analizarse con precaución, ya que la ausencia de una tendencia decreciente significativa en la precipitación anual no implica necesariamente una reducción del riesgo de sequía. La sequía depende también de la distribución temporal de las lluvias y de la persistencia de periodos sin precipitación. En consecuencia, dos años con cantidades anuales similares pueden presentar condiciones hídricas diferentes si en uno de ellos la precipitación se distribuye regularmente y en otro se concentra en pocos eventos.

Esta interpretación adquiere mayor relevancia al considerar los resultados obtenidos posteriormente para CDD. En México se han documentado comportamientos similares. Un estudio realizado en la Selva Lacandona para 1980–2016 encontró un incremento de los días secos junto con modificaciones en la precipitación y temperatura, mientras que investigaciones con índices RClimDex en otras regiones mexicanas han mostrado que los cambios en los periodos secos y húmedos pueden coexistir con modificaciones en otros extremos climáticos.

Por lo tanto, los resultados de sequía y de precipitación no deben considerarse de manera aislada, sino como componentes complementarios del comportamiento hidroclimático de las regiones estudiadas.

4.4. Índices de cambio climático asociados con temperatura

El análisis de los índices de temperaturas extremas permitió identificar patrones que no son completamente evidentes al estudiar únicamente las temperaturas medias. En ambas zonas destaca la recurrencia de tendencias asociadas con condiciones cálidas, aunque su distribución y significancia varían entre estaciones.

En la Zona Centro, índices como SU, TX90p, DTR y TXn presentan tendencias positivas en diferentes estaciones, mientras que TX10p muestra frecuentemente tendencias negativas. Esta combinación resulta particularmente relevante, debido a que el incremento de indicadores asociados con días cálidos acompañado de una disminución de días relativamente fríos representa un desplazamiento del comportamiento térmico hacia condiciones más cálidas.

El índice SU constituye uno de los ejemplos más claros. Su representación espacial muestra tendencias positivas significativas distribuidas en diferentes sectores de la Zona Centro. Debido a que SU representa el número de días con temperatura máxima superior a 25 °C, la repetición de este patrón entre estaciones indica un incremento en la frecuencia de condiciones térmicas cálidas y no solamente cambios en valores promedio.

En la Zona Media, este comportamiento resulta aún más evidente. Los índices TX90p, SU, TXn y TXx muestran una recurrencia importante de tendencias positivas, mientras que TX10p presenta predominantemente tendencias negativas. Particularmente, el mapa de SU evidencia que las tendencias positivas significativas se encuentran distribuidas en diferentes sectores de la región, lo que muestra que este comportamiento no corresponde únicamente a una estación aislada.

La coincidencia de SU entre las zonas Centro y Media constituye un resultado relevante debido a que ambas regiones presentan características climáticas distintas y, aun así, muestran una

recurrencia de tendencias positivas en este indicador. Un antecedente particularmente pertinente para San Luis Potosí es el trabajo de Jaimes Arredondo (2022), quien encontró que SU25 se encontraba entre los índices con mayor tendencia al cambio en la Región Huasteca del estado, junto con TXn y TNn.

Los patrones identificados también pueden compararse con evidencia internacional. Alexander *et al.* (2006) encontraron cambios generalizados en los extremos de temperatura a escala global, caracterizados por una reducción de extremos fríos y un incremento de extremos cálidos. En más del 70 % del área terrestre analizada en ese estudio se observó una disminución significativa de noches frías y un incremento de noches cálidas.

Sin embargo, los resultados obtenidos en San Luis Potosí no reproducen de manera idéntica todos los patrones globales. En esta investigación algunos índices asociados con temperaturas mínimas, como TN90p, TN10p, TNn y TNx, presentan respuestas contrastantes entre estaciones. Esto pone de manifiesto que las señales regionales pueden diferir de los patrones observados a escalas continentales o globales y refuerza la necesidad de analizar individualmente las estaciones meteorológicas.

4.5. Índices de cambio climático asociados con precipitación

Los índices de precipitación presentan diferencias más marcadas entre las dos regiones. En la Zona Centro, uno de los resultados más relevantes corresponde a SDII, para el cual se identificaron tendencias positivas significativas en diversas estaciones. En contraste, PRCPTOT no presentó un patrón significativo generalizado.

La comparación entre ambos indicadores resulta especialmente importante: la ausencia de cambios significativos en la precipitación total anual no excluye modificaciones en la intensidad de los eventos de lluvia. La recurrencia de tendencias positivas de SDII indica que en algunas estaciones la precipitación registrada durante los días húmedos tiende a presentar una mayor intensidad, aun cuando el acumulado anual no exhiba una modificación equivalente.

Este comportamiento coincide con la idea señalada por Alexander *et al.* (2006) de que los índices de precipitación presentan una mayor variabilidad espacial y que los cambios en los extremos no necesariamente siguen el mismo patrón que los cambios en los acumulados. Estudios desarrollados en México también han identificado cambios en índices de precipitación extrema; por ejemplo, un análisis para Aguascalientes empleó RClimDex para estudiar tendencias en los índices diarios de precipitación extrema, mostrando la utilidad de analizar estas variables más allá de los acumulados convencionales.

En contraste, en la Zona Media destaca principalmente CDD, cuyo patrón espacial muestra tendencias positivas significativas en numerosas estaciones. El incremento de este índice representa una mayor persistencia de periodos consecutivos con precipitación inferior a 1 mm. La distribución de estas tendencias en diferentes sectores de la región indica que el comportamiento no se restringe a una sola localidad.

Resultados comparables han sido reportados en otras regiones de México. En la Selva Lacandona se documentó un aumento de días secos durante 1980–2016, acompañado por cambios en temperatura y precipitación. Asimismo, un estudio reciente en la cuenca del río Atoyac, Oaxaca, identificó incrementos en días secos consecutivos junto con aumentos en SDII, días de verano y otros índices asociados con extremos térmicos.

La comparación entre las zonas Centro y Media muestra, por tanto, formas diferentes de modificación de los extremos de precipitación. Mientras que en la Zona Centro destaca la recurrencia de cambios en la intensidad diaria de la precipitación mediante SDII, en la Zona Media sobresale la persistencia de condiciones secas representada por CDD. Esta diferencia es congruente con la menor coherencia espacial que generalmente presentan las tendencias de precipitación respecto de las tendencias de temperatura.

4.6. Integración de la variabilidad climática, sequía e índices de extremos

Al integrar los diferentes componentes analizados se observa que los resultados obtenidos mediante las series mensuales y anuales, las rupturas temporales, la sequía y los índices climáticos proporcionan información complementaria. Las tendencias de las variables convencionales permiten caracterizar la evolución general de temperatura y precipitación; Pettitt permite identificar modificaciones en la estructura temporal de las series; los índices de sequía describen periodos de déficit de precipitación; y los ICC permiten reconocer modificaciones específicas en frecuencia, duración e intensidad de los extremos.

Esta integración resulta particularmente importante porque el cambio en el comportamiento climático no necesariamente se manifiesta de la misma manera en todas las variables. Por ejemplo, una estación puede no presentar una modificación significativa de la precipitación total y, simultáneamente, mostrar cambios en SDII o CDD. De manera semejante, el análisis de una temperatura promedio puede ocultar cambios en la frecuencia de días cálidos o fríos que sí son detectados mediante SU, TX90p o TX10p.

Los resultados de temperatura presentan una mayor coherencia entre las zonas Centro y Media, especialmente por la recurrencia del incremento de días de verano y otros indicadores relacionados con temperaturas máximas. En precipitación, por el contrario, predominan respuestas espacialmente más variables. Esta diferencia entre temperatura y precipitación es consistente con estudios internacionales de extremos climáticos, en los que las señales de temperatura suelen presentar una mayor coherencia espacial que las relacionadas con precipitación.

Asimismo, los resultados guardan relación con antecedentes desarrollados dentro del propio estado de San Luis Potosí. El estudio de las regiones Altiplano y Huasteca para 1975–2018 encontró tendencias crecientes de temperatura y respuestas regionalmente diferenciadas en los ICC, destacando TXx, TX90p y TNn en el Altiplano y SU25, TXn y TNn en la Huasteca. La coincidencia parcial entre dichos resultados y los obtenidos en las zonas Centro y Media muestra

que algunos indicadores relacionados con condiciones cálidas aparecen de manera recurrente en distintas regiones del estado, aunque la respuesta específica depende de la estación y de las características climáticas regionales.

Por esta razón, los resultados de la presente investigación deben entenderse como evidencia de cambios estadísticamente detectables en distintos componentes del régimen climático durante 1980–2024, cuya expresión espacial no es uniforme. La coexistencia de tendencias significativas y no significativas, incrementos y decrementos, así como diferencias entre temperatura y precipitación, forma parte de la complejidad espacial y temporal del sistema climático regional y permite contextualizar las señales identificadas mediante los diferentes métodos empleados.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

En relación con la hipótesis planteada, los resultados obtenidos permiten respaldarla debido a que se identificaron tendencias estadísticamente significativas, puntos de ruptura y modificaciones en distintos índices de extremos climáticos durante el periodo 1980–2024. Las señales fueron más consistentes en las variables e índices asociados con la temperatura, particularmente aquellos relacionados con condiciones cálidas, mientras que la precipitación presentó una mayor variabilidad espacial entre estaciones y entre las zonas Centro y Media. Por lo tanto, los resultados aportan evidencia estadística de modificaciones en el comportamiento climático de ambas regiones; sin embargo, dichas modificaciones no se presentan de manera uniforme en todas las variables, índices y estaciones analizadas.

El análisis de las series climatológicas de las zonas Centro y Media del estado de San Luis Potosí durante el periodo 1980–2024 permitió caracterizar el comportamiento temporal y espacial de la temperatura, la precipitación, la sequía y los extremos climáticos. La aplicación conjunta de pruebas estadísticas e índices climáticos permitió identificar que los cambios observados no se presentan de manera uniforme entre estaciones ni entre las dos regiones estudiadas.

Los resultados de variabilidad climática mostraron tendencias positivas y negativas en las variables de temperatura y precipitación, con diferencias entre estaciones y meses. Esta variabilidad espacial evidencia la importancia de conservar el análisis a escala de estación, debido a que la agregación de series con tendencias de signo contrario puede reducir o enmascarar comportamientos locales relevantes.

La prueba de Pettitt permitió identificar puntos de ruptura en diferentes series climatológicas, evidenciando modificaciones en su comportamiento durante el periodo de estudio. La distribución temporal de estas rupturas fue diferente entre estaciones y variables, por lo que no se identificó un único momento de cambio aplicable a toda el área de estudio. Estos resultados complementaron el análisis de tendencias al permitir reconocer modificaciones estructurales dentro de las series.

Respecto a la sequía, los resultados mostraron la ocurrencia recurrente de periodos secos de distinta intensidad y duración en ambas zonas. Su comportamiento presentó diferencias temporales y espaciales, confirmando que el análisis de la precipitación acumulada por sí solo no permite caracterizar completamente las condiciones de déficit hídrico. Los resultados obtenidos mediante los índices de sequía permitieron reconocer periodos críticos y complementar la interpretación del comportamiento de la precipitación.

Los índices de cambio climático asociados con temperatura mostraron las señales más consistentes del estudio. En ambas zonas se identificaron tendencias recurrentes relacionadas con condiciones térmicas cálidas. Particularmente, el índice SU (días de verano) presentó tendencias positivas estadísticamente significativas en numerosas estaciones de las zonas Centro y Media. Asimismo, la presencia de tendencias positivas en índices relacionados con temperaturas máximas y la disminución observada en diferentes estaciones para TX10p (días fríos) muestran modificaciones en la frecuencia de los extremos térmicos.

La distribución espacial de SU permitió observar que este comportamiento no se restringe a una estación o municipio específico, sino que se presenta en diferentes sectores de ambas zonas. La

coincidencia del patrón entre las zonas Centro y Media constituye uno de los principales resultados del análisis de los extremos de temperatura y aporta indicios de un desplazamiento hacia condiciones térmicas más cálidas durante el periodo estudiado.

Los índices relacionados con precipitación mostraron un comportamiento espacialmente más variable. En la Zona Centro destacó el SDII (índice simple de intensidad diaria), con tendencias positivas significativas en diferentes estaciones, mientras que la precipitación total anual no presentó un patrón significativo generalizado. Esto evidencia que pueden existir modificaciones en la intensidad de los eventos de lluvia sin que necesariamente ocurra un incremento significativo del acumulado anual.

En la Zona Media, el comportamiento más recurrente se identificó en CDD (días secos consecutivos), con tendencias positivas significativas distribuidas en distintas estaciones. Este resultado indica modificaciones en la persistencia de los periodos secos y contrasta con el comportamiento identificado en la Zona Centro, donde destacó principalmente la intensidad de la precipitación. De esta manera, los extremos de precipitación presentan respuestas diferenciadas entre ambas regiones.

La integración de los análisis de variabilidad climática, puntos de ruptura, sequía e índices de extremos permitió observar que temperatura y precipitación no presentan la misma respuesta espacial ni temporal. Las tendencias relacionadas con temperatura muestran mayor recurrencia entre estaciones y entre ambas regiones, mientras que la precipitación presenta un comportamiento más localizado y variable.

En conjunto, los resultados obtenidos para 1980–2024 proporcionan indicios de cambios en el comportamiento climático de las zonas Centro y Media de San Luis Potosí, particularmente por la recurrencia espacial de tendencias asociadas con el incremento de condiciones cálidas y por las modificaciones detectadas en determinados extremos de precipitación. Sin embargo, la respuesta diferenciada entre estaciones demuestra la importancia de considerar la variabilidad espacial y las características climáticas particulares de cada región al interpretar estas señales.

Finalmente, la utilización conjunta de Mann–Kendall, Pettitt, índices de sequía e índices de cambio climático permitió abordar el comportamiento climático desde diferentes escalas y características de las series. Mientras las pruebas estadísticas permitieron identificar tendencias y rupturas, los índices climáticos hicieron posible reconocer modificaciones específicas en la frecuencia, duración e intensidad de eventos extremos, proporcionando una caracterización más integral del comportamiento climático regional.

Se recomienda mantener y fortalecer el monitoreo de las estaciones climatológicas de las zonas Centro y Media, procurando conservar series continuas y con controles adecuados de calidad, con el propósito de actualizar periódicamente las tendencias identificadas.

En investigaciones posteriores sería conveniente ampliar la cobertura espacial mediante nuevas estaciones y fuentes complementarias de información, así como continuar el seguimiento de los índices que presentaron patrones relevantes, particularmente SU, SDII y CDD.

Asimismo, se recomienda complementar el análisis de tendencias con métodos que permitan cuantificar su tasa de cambio, así como incorporar variables como evapotranspiración, altitud, relieve, cobertura del suelo y urbanización, con la finalidad de profundizar en los factores relacionados con las diferencias observadas entre estaciones.

Finalmente, se recomienda utilizar la información obtenida como antecedente para estudios relacionados con recursos hídricos, sequía, agricultura, infraestructura y gestión del riesgo climático, particularmente en aquellas localidades donde se identificaron cambios significativos en los extremos de temperatura y precipitación.

REFERENCIAS

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., … Vázquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111(D5), D05109. https://doi.org/10.1029/2005JD006290

Álvarez-Vázquez, J. L., Aguilar-Sánchez, G., Granados-Ramírez, R., Duch-Gary, J., Juárez-Méndez, J., & Tamara-Pedron, I. (2023). Análisis de indicadores extremos climáticos y la percepción local en dos comunidades de la Selva Lacandona. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14(7), e2996. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i7.2996

Comisión Nacional del Agua & Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). Índice Estandarizado de Precipitación (SPI). Gobierno de México. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad & Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2019). La biodiversidad en San Luis Potosí: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5.ª ed.). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Hernández Constantino, N. A. (2020). Evaluación de la disponibilidad y demanda de agua, en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.]. Repositorio Institucional del IPICYT.

Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., & Moneo, M. (2007). Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. Water Resources Management, 21, 775–788. https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí. INEGI.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte *et al.*, Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jaimes Arredondo, A. (2022). Evaluación de la vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático en la Región Altiplano y la Región Huasteca del estado

de San Luis Potosí, México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). Charles Griffin.

Magaña, V., Conde, C., Sánchez, O., & Gay, C. (2000). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. En C. Gay (Comp.), México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, U.S. Country Studies Program.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

Marcos Valiente, Ó. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. Investigaciones Geográficas, (26), 59–80. https://doi.org/10.14198/INGEO2001.26.06

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. En Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology (pp. 179–184). American Meteorological Society.

Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf

National Aeronautics and Space Administration. (2021). Global climate change: Vital signs of the planet. https://climate.nasa.gov/

National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Climate monitoring. https://www.ncei.noaa.gov/

Organización Meteorológica Mundial. (2012). Guía del usuario sobre el Índice Normalizado de Precipitación (OMM-N.º 1090). OMM.

Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 28(2), 126–135. https://doi.org/10.2307/2346729

Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental. (2018). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de San Luis Potosí. Gobierno del Estado de San Luis Potosí.

Torres Aldana, M. G. (2022). Evaluación de la variabilidad climática y cambio climático en la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del río Verde, San Luis Potosí, México [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

World Meteorological Organization. (2011). Guide to climatological practices (WMO-No. 100). World Meteorological Organization.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P. D., Klein Tank, A. M. G., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147