



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

**Facultad de Ingeniería**

**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN CENTRO-  
NOROCCIDENTAL DE LA SUBCUENCA HIDROLÓGICA  
DEL RÍO VERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA**

Presenta:

**MARIA GUADALUPE TORRES ALDANA**

Asesor:

**DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE**

Co-Asesor:

**DR. JESÚS LÓPEZ DE LA CRUZ**

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022





**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

**Facultad de Ingeniería**

**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN CENTRO-  
NOROCCIDENTAL DE LA SUBCUENCA HIDROLÓGICA  
DEL RÍO VERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA**

Presenta:

**MARIA GUADALUPE TORRES ALDANA**

Asesor:

**DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE**

Co-Asesor:

**DR. JESÚS LÓPEZ DE LA CRUZ**

Comité Tutorial:

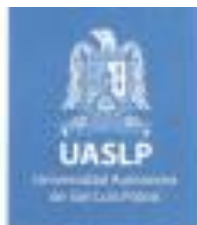
**DR. RODOLFO CISNEROS ALMAZÁN**

**DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES**

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022





19 de mayo de 2022

**LIC. MARIA GUADALUPE TORRES ALDANA  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hermann Rocha Escalante y Jesús López de la Cruz, Asesor y Coasesor de la 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 19 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Evaluación de la variabilidad climática y cambio climático en la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, San Luis Potosí, México"**

- Introducción.
- 1. Región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, San Luis Potosí, México.
- 2. Evaluación de la variabilidad climática e índice de precipitación estandarizada.
- 3. Evaluación del forzamiento del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en variables hidrometeorológicas.
- 4. Evaluación de los índices de cambio climático en la región de estudio.
- 5. Análisis y discusión de los resultados.
- Conclusiones.
- Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**ATENTAMENTE**

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN  
DIRECTOR.**

SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
DIRECCIÓN

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Huelga  
Zona Universitaria s/n CP 24000  
San Luis Potosí, S.L.P.  
Tel: 444 928 2191 a 24  
Fax: 444 928 2196

Copia. Archivo.  
\*etn.

"Rumbo al centenario de la autonomía universitaria"

## *Dedicatoria*

*A Dios*

*A mis padres*

*A mis hermanos*

*A mis sobrinos*

*Al amor de mi vida*

## *Agradecimientos*

Primeramente, agradezco a Dios, por permitirme concluir una meta más en mi vida, a mis padres Chayito y Tomás, por su amor, motivación y apoyo incondicional durante este proyecto. Este logro también es de ustedes.

A mi asesor, el Dr. Hermann Rocha Escalante, por permitirme trabajar con él, transmitirme sus conocimientos, por su paciencia y empatía, por brindarme su apoyo y coadyuvar en mi desarrollo profesional, además de dirigir el trabajo de investigación de forma excelente.

A mi co-asesor el Dr. Jesús López de la Cruz, por su apoyo a pesar de la distancia, por sus grandes enseñanzas y disponibilidad de compartirme sus conocimientos y herramientas para el desarrollo del proyecto, agradezco el apoyo brindado que me permitió ampliar mis conocimientos.

A mi comité tutelar, al Dr. Antonio Cardona, por sus conocimientos y aportes en dicha investigación, asimismo al Dr. Rodolfo Cisneros, por su contribución en la estructuración del proyecto, por enseñarme a desempeñar mi desarrollo profesional de una mejor manera.

Al Dr. Cristóbal Aldama Aguilera, por su apoyo y orientación desde el ingreso y desarrollo de mi experiencia en el posgrado.

A mis hermanos Tom, Chayito y Fátima por siempre, inspirarme con su ejemplo de luchar por los sueños, superar los obstáculos y asimismo por su orientación en todo momento durante este proyecto.

A mis pequeños sobrinos, Fernanda y Amaury por alegrar mis días y brindarme su cariño.

A Sócrates, por su amor y apoyo incondicional en todo momento, por compartirme sus conocimientos, por su paciencia y por ser parte importante de mi vida.

A mis compañeros de posgrado que en algún momento me brindaron sus conocimientos, orientación y apoyo, de manera especial a Patricia Ávalos, Araceli Jaimes y Maritza Durán.

A la Comisión Nacional del Agua, Dirección Local de San Luis Potosí, por facilitar la información correspondiente a las variables de estudio (precipitación total, temperatura media, máxima y mínima extrema).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto y coadyuvar en el desarrollo profesional de la sociedad.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en el logro de este proyecto.

## Resumen

Durante las últimas décadas, diversas regiones han sido afectadas por cambios en los patrones climáticos que han causado impactos en los sistemas humanos y naturales en el planeta; varias regiones presentan cambios en el ciclo hidrológico (IPCC, 2014). Puesto que el clima rige el ciclo hidrológico, los cambios climáticos implican cambios en el tiempo y en el espacio de los recursos hídricos disponibles (Iglesias *et al*, 2005). El objetivo general, consistió en determinar tendencias significativas en la variabilidad climática y cambio climático en la región centro-noroccidental de la subcuenca del Río Verde a partir de datos meteorológicos homogenizados y un análisis estadístico robusto durante el periodo 1980-2018. Por lo cual, se emplearon datos mensuales de cuatro variables: precipitación total, temperatura media, máxima y mínima extrema correspondientes a 23 estaciones, los datos se sometieron a pruebas de homogeneidad e independencia, y un análisis cuantitativo; se estimaron datos faltantes con el método racional deductivo y promedio aritmético de estaciones aledañas, asimismo se estimaron valores medios con el método de isoyetas, se determinaron tendencias significativas a través de la prueba de Mann-Kendall (MK), se estimaron las magnitudes de cambio con el método de Sen's slope y finalmente se detectaron rupturas en dichas tendencias con la prueba de Pettitt. Asimismo, se estimó el índice de precipitación estandarizado (SPI) a 3 y 12 meses; se estimaron tendencias a través del método de (MK) a escala mensual, estacional (estación húmeda y seca) y anual; se realizó un análisis cluster y por componentes principales; posteriormente, se evaluó la influencia del fenómeno macroclimático: El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en variables hidrometeorológicas tales como el SPI, temperaturas y escorrentía superficial, mediante el coeficiente de Pearson empleando cinco índices climáticos. Por otro lado, en lo referente a cambio climático, se descargaron datos diarios de 3 variables: precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima correspondientes al periodo 1980-2016; se estimaron datos faltantes y se realizó la homogeneización de datos a través de Climatol 3.1.1. en R-Studio; posteriormente, se estimaron los 27 índices de cambio climático del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) con Rclimdex 1.1 y finalmente se estimaron tendencias significativas con el método de MK. Los resultados, presentaron cambios en la temporalidad de la precipitación, mientras que las temperaturas media y máxima extrema, están incrementando en las 4 estaciones del año y a nivel anual. Por su parte, la temperatura mínima registró tendencias contrastantes a nivel mensual y anual; las rupturas se registraron principalmente en las décadas de 1990 y 2000. Se determinó una correlación inversamente proporcional del ENOS con respecto al SPI a 12 meses y los volúmenes de escorrentía superficial. Las tendencias de los índices del ETCCDI, denotan indicios de cambio climático en la región de estudio, principalmente en los índices referentes a las temperaturas extremas (máximas y mínimas) y en menor medida en los de precipitación.

# Índice

Introducción .....	12
Aspectos relevantes de la variabilidad climática.....	12
Aspectos generales del cambio climático.....	13
Diferencia entre variabilidad climática y cambio climático.....	16
Cambios en el sistema climático: Contexto global, nacional y local .....	16
Efectos en el ciclo hidrológico por influencia del clima .....	19
Aspectos generales de el niño/oscilación del sur .....	20
Estudios previos de variabilidad climática.....	21
Estudios previos del cambio climático.....	28
Región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde .....	30
Planteamiento del problema y Justificación.....	30
Hipótesis.....	32
Objetivo general .....	32
Objetivos específicos .....	32
1.Región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, San Luis Potosí, México. ....	33
1.1 Localización de la región de estudio .....	33
1.2 Fisiografía .....	33
1.3 Clima.....	37
1.4 Hidrología .....	39
1.5 Topografía.....	42
1.6 Edafología .....	44
1.7 Uso de suelo y vegetación.....	46
1.8 Áreas naturales protegidas .....	49
2. Evaluación de la variabilidad climática e índice de precipitación estandarizada. ....	53
2.1 Introducción .....	53
2.2 Estaciones meteorológicas en la región de estudio .....	53
2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia .....	53
2.4 Análisis de disponibilidad de registros históricos .....	56
2.5 Estimación de datos faltantes .....	58
2.6 Estimación de valores medios .....	61
2.7 Análisis de tendencias .....	62
2.8 Estimación de la magnitud de cambio.....	65
2.9 Detección de rupturas.....	70
2.10 Análisis del índice de precipitación estandarizado (SPI) .....	116

3. Evaluación del forzamiento del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en variables hidrometeorológicas .....	129
3. 1 Introducción .....	129
3. 2 Análisis multivariado .....	129
3. 3 Influencia del ENOS en: SPI, temperaturas y escorrentía superficial.....	137
4. Evaluación de los índices de cambio climático en la región de estudio. ....	143
4.1 Introducción .....	143
4. 2 Estimación de índices climáticos del ETCCDI .....	143
4. 3.Cálculo de los índices climáticos .....	146
4. 4 Análisis de tendencias en los índices climáticos .....	147
5. Análisis y discusión de los resultados. ....	169
5.1 Análisis y discusión de resultados de la precipitación total .....	169
5.2 Análisis y discusión de resultados de la temperatura media .....	170
5.3 Análisis y discusión de resultados de la temperatura máxima extrema .....	171
5.4 Análisis y discusión de resultados de la temperatura mínima extrema .....	172
5.5 Análisis y discusión de las cuatro variables de estudio.....	173
5.6 Análisis y discusión del SPI.....	175
5.7 Análisis y discusión del fenómeno del ENOS.....	177
5.8 Análisis y discusión de los índices de cambio climático.....	178
5.9 Análisis y discusión de la variabilidad climática vs. cambio climático .....	181
Conclusiones. ....	185
Referencias.....	187



## Lista de Figuras

Figura 1. Cambios observados en el sistema climático global.....	17
Figura 2. Variación de la temperatura global periodo 1880–2017.....	17
Figura 3. Comportamiento de la temperatura media en México .....	18
Figura 4. Anomalía de la precipitación anual en México 1941-2017 .....	18
Figura 5. Localización de la zona de estudio .....	34
Figura 6. Provincias fisiográficas en la región de estudio .....	35
Figura 7. Subprovincias fisiográficas en la región de estudio .....	36
Figura 8. Climas en la región de estudio .....	38
Figura 9. Regiones hidrológicas en la región de estudio .....	40
Figura 10. Subcuencas hidrológicas en la región de estudio .....	41
Figura 11. Gradiente de elevación en la región de estudio .....	43
Figura 12. Edafología en la región de estudio .....	45
Figura 13. Usos de suelo y vegetación en la región de estudio.....	47
Figura 14. Áreas naturales protegidas en la región de estudio.....	50
Figura 15. Isoyetas de la precipitación total anual 1980.....	63
Figura 16. Tendencias y rupturas en la precipitación total anual 1980-2018.....	78
Figura 17. Tendencias y rupturas en la precipitación total marzo 1980-2018 .....	79
Figura 18. Tendencias y rupturas en la precipitación total mayo 1980-2018.....	80
Figura 19. Tendencias y rupturas en la precipitación total septiembre 1980-2018 .....	81
Figura 20. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima anual 1980-2018.....	83
Figura 21. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima enero 1980-2018 .....	84
Figura 22. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima febrero 1980-2018 .....	85
Figura 23. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima marzo 1980-2018 .....	86
Figura 24. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima abril 1980-2018 .....	88
Figura 25. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima julio 1980-2018 .....	89
Figura 26. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima agosto 1980-2018 .....	90
Figura 27. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima septiembre 1980-2018 .....	92
Figura 28. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima octubre 1980-2018 .....	93
Figura 29. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima diciembre 1980-2018.....	96
Figura 30. Tendencias y rupturas en la temperatura media anual 1980-2018 .....	97
Figura 31. Tendencias y rupturas en la temperatura media febrero 1980-2018 .....	98
Figura 32. Tendencias y rupturas en la temperatura media abril 1980-2018 .....	99
Figura 33. Tendencias y rupturas en la temperatura media julio 1980-2018 .....	101
Figura 34. Tendencias y rupturas en la temperatura media agosto 1980-2018 .....	102
Figura 35. Tendencias y rupturas en la temperatura media septiembre 1980-2018 .....	103
Figura 36. Tendencias y rupturas en la temperatura media octubre 1980-2018 .....	104
Figura 37. Tendencias y rupturas en la temperatura media noviembre 1980-2018 .....	106
Figura 38. Tendencias y rupturas en la temperatura media diciembre 1980-2018 .....	107
Figura 39. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima anual 1980-2018 .....	109
Figura 40. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima mayo 1980-2018 .....	110
Figura 41. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima junio 1980-2018 .....	111
Figura 42. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima julio 1980-2018 .....	113
Figura 43. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima agosto 1980-2018 .....	114
Figura 44. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima septiembre 1980-2018 .....	115
Figura 45. Tendencias en el SPI-3 escala anual 1980-2018 .....	121

Figura 46. Tendencias en el SPI-3 escala seca 1980-2018.....	122
Figura 47. Tendencias en el SPI-3 escala húmeda 1980-2018.....	123
Figura 48. Tendencias en el SPI-12 escala anual 1980-2018 .....	125
Figura 49. Tendencias en el SPI-12 estación seca 1980-2018 .....	126
Figura 50. Tendencias en el SPI-12 estación seca 1980-2018 .....	127
Figura 51. Análisis cluster en el régimen de precipitación .....	131
Figura 52. Régimen de precipitación grupo homogéneo I 1980-2018 .....	132
Figura 53. Régimen de precipitación grupo homogéneo II 1980-2018.....	132
Figura 54. Componentes principales del SPI-3 en la región de estudio .....	134
Figura 55. Componentes principales del SPI-12 en la región de estudio.....	136
Figura 56. Componente Principal I SPI-12 vs. ENOS .....	140
Figura 57. Volumen mensual de escorrentía vs. MEI V2 .....	142
Figura 58. Código de Climatol 3. 1. 1 para la precipitación total .....	146
Figura 59. Tendencias en la precipitación máxima en un día .....	151
Figura 60. Tendencias en índice simple de intensidad diaria .....	152
Figura 61. Tendencias en los días húmedos consecutivos .....	154
Figura 62. Tendencias en los días de verano .....	157
Figura 63. Tendencias en la temperatura máxima extrema .....	158
Figura 64. Tendencias en la temperatura máxima más baja .....	159
Figura 65. Tendencias en la temperatura mínima más alta .....	161
Figura 66. Tendencias en la frecuencia de días frescos .....	162
Figura 67. Tendencias en la frecuencia de días calurosos .....	163
Figura 68. Tendencias en la frecuencia de noches frías .....	165
Figura 69. Tendencias en la frecuencia de noches cálidas .....	166
Figura 70. Tendencias en el rango diurno de temperatura. ....	167
Figura 71. Tendencias en la precipitación total anual e índices de cambio climático .....	183
Figura 72. Tendencias en la temperatura máxima anual e índices de cambio climático .....	184

## Lista de Tablas

Tabla 1. Índices climáticos definidos por el ETCCDI. ....	15
Tabla 2. Porcentaje de los tipos de suelos en la región de estudio .....	44
Tabla 3. Porcentaje de los usos de suelo y vegetación en la región de estudio .....	48
Tabla 4. Habitantes por municipio durante el 2020 .....	51
Tabla 5. PEA por sector económico en la Zona Conurbada Rioverde-Cd. Fernández, 2020 .....	52
Tabla 6. Pruebas de calidad en registros históricos de precipitación total anual .....	55
Tabla 7. Pruebas de calidad en registros de precipitación total anual a partir de 1980 .....	56
Tabla 8. Disponibilidad de registros en estaciones meteorológicas de calidad.....	57
Tabla 9. Registros completos de precipitación total en la estación meteorológica “24114” .....	59
Tabla 10. Ejemplo de registros completos de temperatura máxima en el mes de abril 1980-2018. .	60
Tabla 11. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total 1980-2018 .....	66
Tabla 12. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media 1980-2018 .....	67
Tabla 13. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura máxima extrema 1980-2018 .....	68
Tabla 14. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura mínima extrema 1980-2018 ..	69
Tabla 15. Rupturas en tendencias significativas de la precipitación total 1980-2018 .....	72
Tabla 16. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura media 1980-2018 .....	73
Tabla 17. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura máxima extrema 1980-2018 ....	74
Tabla 18. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura mínima extrema 1980-2018 ....	75
Tabla 19. Valores del Índice de Precipitación Estandarizado y su clasificación de rangos .....	116
Tabla 20. Tendencias a nivel mensual en el SPI-3 1980-2018 .....	118
Tabla 21. Tendencias a nivel mensual en el SPI-12 1980-2018 .....	119
Tabla 22. Tendencias a escala anual, estación seca y húmeda en el SPI-3 1980-2018.....	120
Tabla 23. Tendencias a escala anual, estación seca y húmeda en el SPI-12 1980-2018.....	124
Tabla 24. Componentes principales del SPI-3 .....	133
Tabla 25. Componentes principales del SPI-12 .....	135
Tabla 26. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. SPI-3 .....	139
Tabla 27. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. SPI-12.....	139
Tabla 28. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. regímenes de temperatura .....	141
Tabla 29. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. volúmenes de escorrentía .....	141
Tabla 30. Archivo de entrada de Climatol precipitación total diaria .....	144
Tabla 31. Estaciones meteorológicas utilizadas en Climatol .....	145
Tabla 32. Tendencias de los índices climáticos de la precipitación 1980-2016 .....	149
Tabla 33. Tendencias de los índices climáticos de la temperatura 1980-2016 . .....	155

## **Introducción.**

### **Aspectos relevantes de la variabilidad climática**

La variabilidad climática (VC) se define como las variaciones del rango medio de las condiciones climáticas y otras estadísticas del clima tales como: desviaciones típicas, fenómenos extremos, etc., en un espacio geográfico a lo largo del tiempo, que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La VC se atribuye a procesos naturales internos que suceden en el sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa), de acuerdo con el IPCC (2007).

La VC interna hace referencia a la fluctuación natural intrínseca a un estado climático debido a las interacciones internas dentro del complejo sistema climático no lineal; mientras que el forzamiento externo incluye el forzamiento antropogénico, como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la carga de aerosoles troposféricos que actúan sobre la composición de la atmósfera y forzamientos externos naturales que van desde variaciones de radiación debidas a eventos como erupciones volcánicas explosivas y ciclos solares (IPCC, 2013).

Ahora bien, las principales escalas temporales de VC son: 1) estacional: correspondiente a fluctuaciones climáticas mensuales; 2) interanual: cuando se hace referencia a cambios de año con año tal como la sucesión de periodos secos, seguidos de una temporada de precipitaciones muy intensa, fría y prolongada como, el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y 3) interdecenal que describe modificaciones a nivel decenal y a pesar de que las oscilaciones son menos evidentes, poseen un impacto significativo en las tendencias climáticas, por mencionar, la Oscilación Decadal del Pacífico (Montealegre & Pabon, 2000).

Por otra parte, cuando se considera el efecto espacial, las escalas de la VC son: 1) microescala o de tormenta: abarcando precipitaciones convectivas intensas que afectan áreas inferiores a 50 km<sup>2</sup>; 2) fenómenos de meso escala: hacen referencia a procesos convectivos de hasta 2000 km; y 3): fenómenos sinópticos que pueden afectar miles de kilómetros como, los ciclones, anticiclones, huracanes y frentes. Los de mayor escala o macroescala son fenómenos meteorológicos de gran tamaño (>10,000 km de longitud) con duración superior a un mes. Dentro de esta categoría se encuentran los eventos de baja frecuencia (interanuales/interdecenales) tales como, la zona de convergencia intertropical (López de la Cruz, 2013).

En la actualidad, son reconocidas cinco diversas teorías de la VC natural, en donde se pretende explicar la causa de dicho fenómeno. 1) La teoría de Milankovitch, la cual propone que el movimiento de la Tierra influye directamente en el clima, considerando los efectos del movimiento orbital, oblicuidad y precisión, seguido de los fenómenos que tienen como base el espacio; 2) los rayos cósmicos, en donde se supone afecta el clima en La Tierra, por lo que la teoría sugiere que los rayos ionizan la atmósfera incrementando nubosidad y al mismo tiempo reduciendo la temperatura; 3) Los GEI y el ciclo del carbono, esta teoría se relaciona con la propuesta por Milankovitch, y relaciona el factor climático y el cambio en el ciclo del carbono, al ser el carbono un gas de efecto invernadero, el incremento del gas es directamente proporcional al aumento de temperatura, por lo tanto, causa alteraciones climatológicas; 4) El efecto invernadero y el congelamiento de la Tierra, por lo que la teoría expone la relevancia que posee la temperatura en cada una de las etapas de la Tierra, la cual a lo largo de su evolución ha tenido periodos de glaciaciones y calentamientos globales y finalmente, 5) La deriva continental, la teoría sugiere que un factor importante es la ubicación continental, debido a que modifica la función de varios ciclos (Uscinski *et al.*, 2017; Castro-Lazcarro, 2019).

Sin embargo, la variabilidad climática de origen antropogénico, considerada de origen artificial, se ha definido a partir de la revolución industrial con el uso de combustibles fósiles, en la actualidad, se estima que las concentraciones de los GEI han aumentado, alrededor de 70% durante el periodo 1970-2004, por lo que se ha modificado la composición atmosférica, originando fenómenos climáticos globales (IPCC, 2007).

### **Aspectos generales del cambio climático**

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define al cambio climático (CC) como la variación del estado del clima, identificable mediante pruebas estadísticas en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, persistente durante extensos periodos de tiempo (IPCC, 2014). El CC significa todo cambio del clima a través del tiempo, tanto si se debe a la variabilidad natural cuanto si es consecuencia de la actividad antropogénica (IPCC, 2007). Según Vázquez-Aguirre (2010), los cambios en el sistema climático a lo largo del tiempo pueden corresponder a variaciones en la dinámica interna del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, etc.) o, a la presencia de forzamientos externos naturales (variaciones en la actividad solar o volcánica) o, antropogénicos (incremento de emisiones de GEI, cambios de uso de suelo, etc.). Cuando no existen forzamientos externos, los cambios en el clima son influenciados por procesos en la dinámica interna del sistema asociados a interacciones océano-

atmosfera como los fenómenos: El Niño Oscilación del Sur (ENOS, por sus siglas en inglés), la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés).

El CC representa el mayor reto global para la humanidad en el siglo XXI, este fenómeno tendrá significativos efectos ambientales, económicos y sociales (Martínez-Austria *et al.*, 2014). En términos de recursos hídricos, a nivel global se prevé que los efectos del cambio climático serán extensos y de diferente signo de una región a otra, conforme a la latitud, altitud y condiciones orográficas. En varias regiones del planeta ya se registran los primeros síntomas de afectación en los recursos hídricos. En términos generales, en las latitudes altas se espera un aumento de la precipitación y la escorrentía, lo que podría acrecentar la oferta de agua en esas regiones. En latitudes medias y zonas subtropicales (en las que se localiza México), en contraste, se prevén relevantes reducciones en la precipitación y la escorrentía, lo que ocasionará un aumento en las condiciones de escasez y mayor presión sobre los recursos hídricos en esas regiones (Martínez-Austria, 2012). No obstante, un modo de medir fenómenos climáticos es a través de indicadores, los cuales ilustran y comunican de manera simple un proceso complejo, que incluye tendencias y progresión a lo largo del tiempo; estas mediciones, por lo general, son cuantitativas. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés), han generado y determinado un conjunto de veintisiete índices (Tabla 1) para analizar situaciones climáticas, aplicando una metodología que garantiza que los resultados puedan analizarse globalmente (Figuroa-Gallegos, 2017).

Las definiciones, el significado, los acrónimos usados y las unidades en las que se expresan los 27 índices han sido documentadas por Zhang & Yang (2004); no obstante, Vázquez-Aguirre (2010), establece que el cálculo de índices climáticos del ETCCDI es una herramienta útil para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios (Figuroa-Gallegos, 2017). Con base en lo anterior, la detección implica demostrar en términos estadísticos que el clima ha cambiado con algún nivel significativo en un tiempo definido, sin dar explicación sobre el origen de dicho cambio (IPCC, 2007; Vázquez-Aguirre, 2010).

Tabla 1. Índices climáticos definidos por el ETCCDI (Vázquez,2010; Figueroa-Gallegos, 2017).

Nombre	Definición	Código
Días de verano	Número de días en un año en que $TX > 25\text{ °C}$	SU25
Días con hielo	Número de días en un año en que $TX < 0\text{ °C}$	ID0
Noches tropicales	Número de días en un año en que $TN > 20\text{ °C}$	TR20
Días con helada	Número de días en un año en que $TN < 0\text{ °C}$	FD0
Duración de la estación de crecimiento	Número de días en un año entre la primera racha de, como mínimo, seis días con $TG > 5\text{ °C}$ y la primera racha después del 1° de julio con, como mínimo, seis días con $TG < 5\text{ °C}$	GSL
Temperatura máxima extrema	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria	TXx
Temperatura máxima más baja	Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria	TXn
Temperatura mínima más alta	Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria	TNx
Temperatura mínima extrema	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria	TNn
Frecuencia de días frescos	Porcentaje de días en que $TX <$ percentil 10	Tx10p
Frecuencia de días calurosos	Porcentaje de días en que $TX >$ percentil 90	Tx90p
Frecuencia de noches frías	Porcentaje de días en que $TN <$ percentil 10	Tn10p
Frecuencia de noches cálidas	Porcentaje de días en que $TN >$ percentil 90	Tn90p
Duración de los periodos cálidos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TX >$ percentil 90	WSDI
Duración de los periodos fríos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TN <$ percentil 90	CSDI
Rango diurno de temperatura	Media anual de la diferencia entre TX y TN	DTR
Precipitación máxima en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria	Rx1day
Precipitación máxima en cinco días	Máxima anual de la PPT registrada en cinco días consecutivos	Rx5day
Índice simple de intensidad diaria	PPT total anual dividida entre el número de días con $PPT \geq 1\text{ mm}$	SDII
Días con lluvia mayor a 10 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 10\text{ mm}$	R10
Días con lluvia mayor a 20 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 20\text{ mm}$	R20
Días con lluvia mayor a 25 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 25\text{ mm}$	R25
Días secos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT < 1\text{ mm}$	CDD
Días húmedos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT \geq 1\text{ mm}$	CWD
Días muy húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$ ) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95	R95p
Días extremadamente húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$ ) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99	R99p
Precipitación total	PPT total anual en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$	PRCPTOT

Donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PPT la precipitación.

### **Diferencia entre variabilidad climática y cambio climático**

Es imprescindible recalcar la diferencia entre la variabilidad climática y el cambio climático, ya que una de las principales características del cambio climático es la identificación de las modificaciones en el estado del clima por los cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades que persiste durante un periodo extenso de tiempo (Caballero *et al.*, 2007; Herran, 2012).

Por otro lado, la variabilidad climática se evidencia en períodos de tiempo relativamente cortos, lo cual la diferencia del cambio climático, y se manifiesta en valores de variables climatológicas como la temperatura y la precipitación, las cuales son comparadas con un valor normal. Se considera que la variabilidad y el cambio climático tienen una relación directa y que interactúan constantemente asociados a los cambios en el forzamiento radiativo no natural, que tiene su origen en el efecto invernadero antropogénico. En general, se puede decir que el cambio climático vuelve más extremos e intensos los fenómenos de variabilidad climática, siendo posible en los próximos años un aumento de eventos extremos climáticos (que desencadenan inundaciones, deslizamientos e incendios forestales) asociados a los fenómenos ENOS (Alzate *et al.*, 2015).

### **Cambios en el sistema climático: Contexto global, nacional y local**

Durante los últimos decenios, se han observado distintos cambios en el clima a nivel global, específicamente desde la década de 1950. Muchos de los cambios en el sistema climático no tienen precedentes en décadas o milenios, la temperatura media de la atmósfera y el océano han aumentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, y el nivel del mar se ha elevado (IPCC, 2014), como se logra apreciar dichos cambios son de distinto signo y magnitud alrededor del territorio global, lo que representa heterogeneidad en las modificaciones del clima (Figura 1).



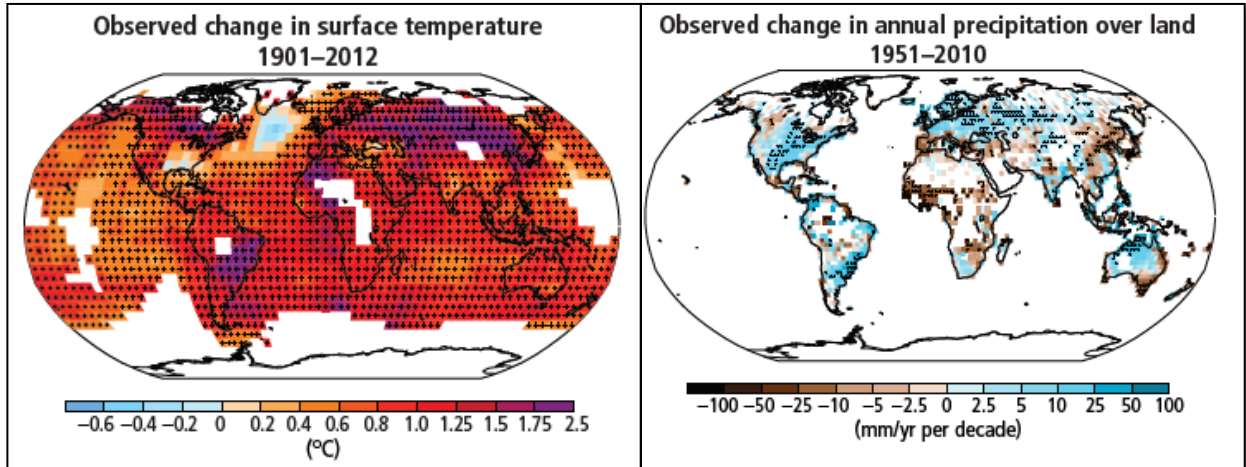


Figura 1. Cambios observados en el sistema climático global (IPCC, 2014b).

De acuerdo con la NASA (2018), los registros de temperatura global registraron una tendencia al incremento, en el año 2016 se registró la mayor desviación de temperatura (0.99 °C) respecto a la media registrada durante el periodo 1951-1980, superando los registros de 2017 (0.89 °C) y 2015 (0.87 °C), que en sus respectivos años habían registrado las anomalías más elevadas con respecto al periodo de referencia (Figura 2).

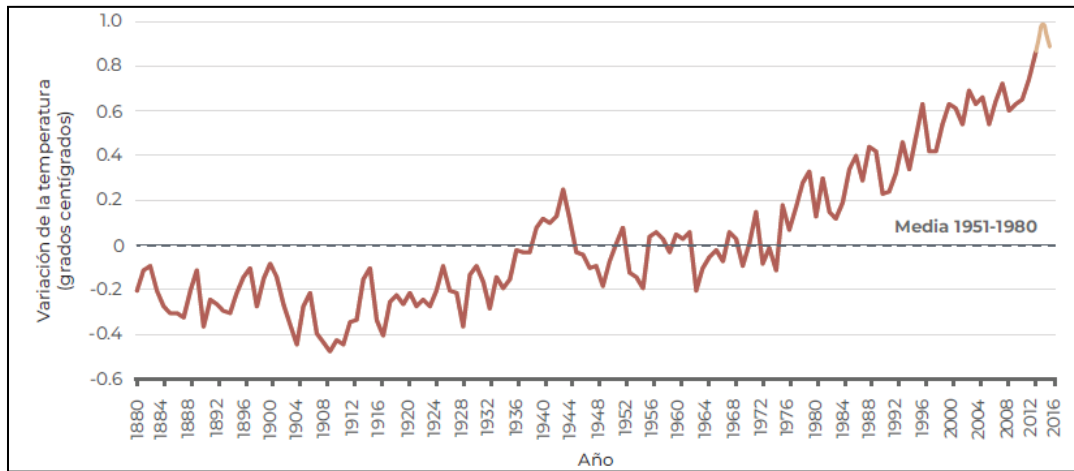


Figura 2. Variación de la temperatura global periodo 1880-2017 (NASA, 2018).

A nivel nacional, desde el año 1900 se ha documentado, que, en la mayor superficie del territorio, las tendencias climáticas han mostrado un incremento en la temperatura superficial y cambios no significativos en la precipitación; durante el periodo 1901-2009, la temperatura superficial media en México presentó un incremento promedio menor de 2°C (CICC, 2012).

Asimismo, el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2009), registró un incremento en la tasa de crecimiento de la temperatura promedio del país durante las últimas décadas, en el periodo 1989-2008 la tendencia correspondía a  $0.30^{\circ}\text{C}$  por década, incrementando a  $0.72^{\circ}\text{C}$  en el periodo 1999-2008 (Figura 3).

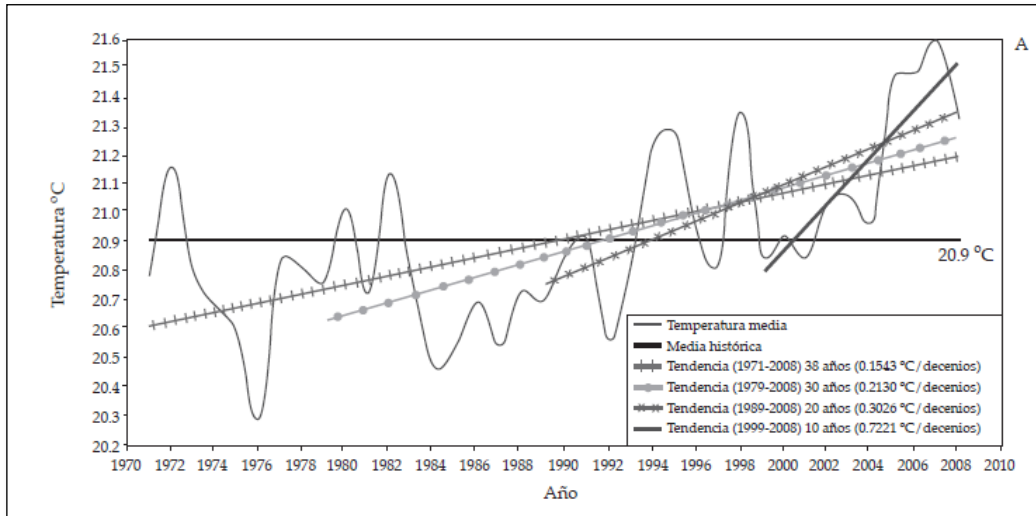


Figura 3. Comportamiento de la temperatura media en México (INE, 2009).

En términos de precipitación, el territorio mexicano muestra una tendencia promedio de incremento a pesar de que la señal es poco significativa. Algunas regiones han experimentado incrementos superiores a la media nacional tales como la región centro-sur, mientras que otras presentan ligeras disminuciones tales como los estados de Hidalgo y Veracruz (CICC, 2012). De acuerdo con la SEMARNAT (2019), las variaciones en la precipitación del país muestran variaciones regionales y temporales, durante el periodo 1941-2015 (Figura 4).

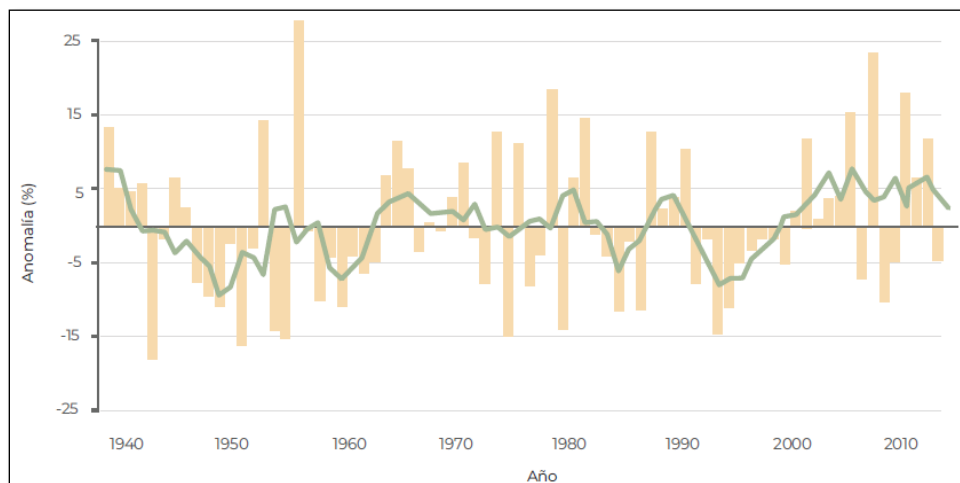


Figura 4. Anomalía de la precipitación anual en México 1941-2017 (SEMARNAT, 2019).

En el estado de San Luis Potosí se han presentado oscilaciones multidecenales en la precipitación y la temperatura y cambios climáticos de carácter local impulsados por modificaciones en los usos de suelo, para el periodo 1980-2010; los resultados sugieren que el clima en el estado se ha modificado de diversas maneras. Las tendencias interanuales en la precipitación son contrastantes (aumento y decremento) y localizadas, respecto a la temperatura máxima se ha incrementado en gran parte de los sitios generando un aumento en la evapotranspiración potencial (SEGAM, 2018).

### **Efectos en el ciclo hidrológico por influencia del clima**

El clima y el ciclo hidrológico están estrechamente vinculados, lo que complica definir las fronteras entre ambos; el clima depende directamente de variables relevantes del ciclo hidrológico, como la humedad atmosférica, humedad de los suelos y precipitación (Martínez-Austria *et al.*, 2014).

El agua disponible en la naturaleza es constante, debido al principio de conservación de la masa, evidentemente el clima rige el ciclo hidrológico y por tanto, los cambios climáticos implican cambios en el tiempo y en el espacio de los recursos hídricos disponibles; cambios en la precipitación condicionan el agua que precipita sobre la superficie continental y cambios en las temperaturas modifican los valores de evaporación y evapotranspiración alterando la cantidad y características de las escorrentías (Iglesias *et al.*, 2005).

Un cambio en el clima modificará la situación actual del ciclo hidrológico y causará la redistribución de los recursos hídricos en el tiempo y el espacio, asimismo, tendrá un efecto directo sobre la evaporación, la escorrentía, la humedad del suelo; la redistribución y los cambios de los recursos hídricos en el espacio harán que la sociedad humana y los ecosistemas presenten alteraciones. Al mismo tiempo, los cambios en los sistemas de recursos hídricos afectarán al clima local (Yang *et al.*, 2011).

Los sectores más vulnerables ante el cambio climático son el social y el productivo, mismos que tienen relación directa con los recursos hídricos. Con relación a ello, una variación del clima en un lugar determinado puede cambiar todo el ciclo de un ecosistema y repercutir directamente en la forma de vida de una población (Patiño-Gómez & Reza-García, 2012).

## Aspectos generales de El Niño/Oscilación del Sur

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es el principal mecanismo modulador del clima global a escala interanual. En México, se han abordado los efectos de la variabilidad climática sobre la hidroclimatología, en particular los impactos de las dos fases (El Niño/La Niña) de dicho fenómeno sobre los procesos hidrológicos del país. La fase niño tiene una recurrencia promedio entre 3 y 4 años, mientras que la fase niña entre 6 y 8 años (López de la Cruz & Frances, 2014).

Respecto a la fase positiva del ENOS, “El Niño” (EN) hace referencia a temperaturas oceánicas por encima del promedio a lo largo de las costas de Ecuador, Perú y el norte de Chile, así como a lo largo de la zona ecuatorial del Pacífico oriental, que persiste en promedio 12 meses, con una recurrencia de 2 a 7 años. En condiciones normales, la superficie del océano en la zona oeste del Pacífico tropical usualmente es caliente, la presión atmosférica es baja y las precipitaciones son frecuentes e intensas. Mientras que, en el extremo opuesto del Pacífico, el agua es relativamente fría, la presión atmosférica es alta y hay poca lluvia. Cuando se presenta EN, las aguas cálidas de Asia se dispersan hacia el este (Suramérica). Las regiones de baja presión y las lluvias torrenciales también migran hacia el Este. En consecuencia, la zona central y oriental del Pacífico se calienta y se torna más lluviosa, mientras que en el extremo occidental del Pacífico las condiciones son más secas y frescas (Bedoya *et al.*, 2010).

En la fase negativa “La Niña” (LN) se emplea para designar el evento extremo opuesto a EN. Es decir, el enfriamiento más allá de lo normal de la temperatura del océano tropical. Las características de LN son más frías que las condiciones normales del Pacífico oriental y más húmedas y cálidas que las condiciones normales en el Pacífico de la zona oeste (Bedoya *et al.*, 2010). Durante LN, las precipitaciones y tormentas disminuyen en el Pacífico ecuatorial central, y se concentran en Indonesia y el Pacífico occidental, generando inviernos menos fríos en Canadá y desastres por inundaciones en Suramérica y Asia (Sedano-Cruz, 2017).

Las dos fases del ENOS propician un efecto de dipolo en el clima de México; EN está asociado a condiciones de mayor humedad en el norte de México y condiciones de sequía en el centro y sur del país; mientras que LN, se asocia a condiciones de sequía para la región norte y mayor humedad para el centro-sur del país (Cerano-Paredes *et al.*, 2020).

El comportamiento de fenómenos macroclimáticos como el ENOS, ha sido caracterizado a través de índices o variables macroclimáticas. Dichas variables se calculan a partir de la diferencia entre anomalías estandarizadas o de las primeras componentes principales de la presión atmosférica, la temperatura superficial del océano, etc., en dos puntos conectados entre sí. Estas anomalías se monitorean y registran para conocer el funcionamiento de la dinámica atmosférica u oceánica cuando

se presentan fenómenos macroclimáticos. Constituyen un método efectivo para identificar aquellos patrones de variabilidad de baja frecuencia que presentan una mayor influencia en la hidrología (López de la Cruz, 2013). Una clasificación de años para El Niño, La Niña y Normal se realiza, por lo general, con el uso de diferentes índices océano-atmosféricos implementados por agencias climáticas, como la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de U.S.A. (NOAA, por sus siglas en inglés), (Bedoya, 2010).

## **Estudios previos de variabilidad climática**

### **Análisis de tendencias**

Se han consultado distintas investigaciones vinculadas con la variabilidad climática en diversas regiones del planeta y en el territorio mexicano, con el objetivo de poseer un panorama general sobre dicho tema.

Alencar da Silva-Alves *et al.* (2017) identificaron tendencias pluviométricas en la cuenca hidrográfica del Río Moxotó en Brasil, a partir de 32 estaciones meteorológicas correspondientes al periodo 1930-2014, los registros se procesaron a través del método estadístico de Mann-Kendall (MK), con una significancia estadística de  $\alpha = 0.05$ ; producto del análisis, se identificaron tendencias significativas positivas en el este, centro y sur de la cuenca mientras que en el oeste de la cuenca se presentó tendencia significativa decreciente.

En Irán, Moshir-Panahi *et al.* (2020), realizaron un análisis entre las 30 principales cuencas hidrológicas de dicho país durante el período 1986-2016; se examinaron series de tiempo utilizando la prueba estadística de MK a las variables de temperatura, precipitación, escorrentía, evapotranspiración y reservas de agua; en dicho periodo, el país registró un calentamiento, respecto a la precipitación en su mayoría disminuyó y la escorrentía aún más, mientras que, el almacenamiento de agua se agotó y la evapotranspiración aumentó en algunas cuencas y disminuyó en otras.

En África, en la cuenca del Río Chad, Mahmood *et al.* (2019), llevaron a cabo un estudio para examinar variabilidad climática y tendencias para el periodo de 1951-2015 a través de la prueba de MK; las variables analizadas fueron la temperatura y precipitación. Los resultados indican que el 84% de las series de tiempo de temperatura registraron señales significativas de tendencias positivas ( $\alpha = 0.001$ ), con una tasa promedio de cambio de  $0.022 \text{ } ^\circ\text{C/año}$ ; respecto a la precipitación entre el 25 y 38% de las series de tiempo, mostraron una tendencia significativa decreciente ( $\alpha = 0.05$ ); con base en lo anterior y aplicando una combinación de técnicas de análisis espectral se espera que la

temperatura aumente entre 0.65-1.6°C y que la precipitación disminuya en un 13-11% en las próximas dos décadas con respecto a 1961-1990.

En México, en los estados de Baja California y Baja California Sur, Martínez-Austria & Jano-Pérez (2021), realizaron un estudio que consideró 18 estaciones meteorológicas, donde se analizaron las variables de temperatura máxima y mínima con base en la prueba estadística no paramétrica de Spearman; el análisis de las temperaturas mínimas indican que en el estado de Baja California en la mayoría de las estaciones existe una tendencia significativa positiva (mes de agosto), mientras que en la zona de Baja California Sur, no se detectaron tendencias significativas. Respecto a las temperaturas máximas, hay una clara tendencia al aumento, en el caso de ambos estados.

Ruiz-Álvarez *et al.* (2016) desarrollaron una investigación en el estado de Aguascalientes, México, para determinar y cuantificar la tendencia en temperaturas máxima y mínima promedio mensual en estaciones meteorológicas (56 para temperatura máxima y 51 para temperatura mínima), con registros en un periodo continuo  $\geq 30$  años. El análisis estadístico se ejecutó con la metodología de MK. Se registró que, de 612 series de temperatura mínima, solo 247, presentaron una tendencia (129 registraron tendencia positiva y 118 tendencia negativa); de 672 series de temperatura máxima, únicamente 224 fueron significativas (167 registraron tendencia positiva y 57 tendencia negativa) con  $p \leq 0.05$ .

En los alrededores de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, Hernández-Constantino (2020), aplicó la prueba estadística de MK, para analizar tendencias en la precipitación, en la cual detectó una tendencia creciente en la precipitación con un nivel de confianza de 98% en el periodo 1979-2013. De igual manera, Jaimes-Arredondo (2020) analizó las tendencias significativas ( $\alpha = 0.05$ ) de precipitación y temperatura en la región del altiplano potosino para el periodo 1975-2015, utilizando la prueba estadística de MK; los resultados indican que en la precipitación las tendencias son positivas en verano y negativas en invierno, sugiriendo un cambio temporal en el comportamiento de dicha variable; además, gran parte de las estaciones meteorológicas analizadas, presentaron una tendencia creciente en las temperaturas medias mensuales.

En la región huasteca del estado de San Luis Potosí, periodo 1987-2015, Ríos-Sánchez (2018), realizó un análisis estadístico a través de imágenes satelitales y 44 estaciones meteorológicas empleando datos de precipitación y temperaturas máxima y mínima; los resultados muestran evidencia de un incremento paulatino en la temperatura, mientras que, en términos de precipitación, el análisis histórico registró una disminución.

Como se logra apreciar, en distintas regiones del planeta y de México, la prueba estadística de Mann-Kendall es ampliamente utilizada en el análisis de datos climáticos correspondientes a cuencas hidrográficas, así como a territorios estatales y regionales; dicha prueba se aplica con el objetivo de determinar tendencias estadísticamente significativas, en diversas variables meteorológicas. Respecto a las variables que destacan en los análisis, son: precipitación y temperaturas medias, máximas y mínimas; las cuales predominan en la mayoría de las investigaciones en periodos de estudio con un mínimo de 30 años.

### **Tendencias y rupturas**

Son escasos los análisis, donde se han aplicado pruebas estadísticas para la detección de tendencias y rupturas o puntos de cambio en las series de tiempo simultáneamente. De acuerdo con Jaiswal *et al.* (2015) la prueba de MK y la prueba de Pettitt, se utilizan ampliamente para detectar tendencia y punto de cambio en series históricas de variables climáticas e hidrológicas.

En la cuenca del Río Colorado, Kalra *et al.* (2017), evaluaron cambios en la temperatura y precipitación durante el periodo (1906-2010); analizaron datos a escala mensual para 29 divisiones climáticas aplicando el método de MK y la prueba de Pettitt; en términos generales, los resultados indicaron un clima más cálido y seco en la cuenca, ya que se detectaron tendencias de decremento en la precipitación durante el invierno (regiones altas); respecto a la temperatura, se registró un incremento significativo en varios meses (nivel de confianza de 90%), dichos cambios se detectaron a partir de la década de 1930.

Por su parte, Praveen *et al.* (2020) llevaron a cabo un análisis de la precipitación en el periodo 1905-2015, en toda la India; emplearon pruebas estadísticas tales como la de Pettitt y MK con el objetivo de detectar tendencias y rupturas en las series. Los resultados indicaron que la mayoría de las divisiones meteorológicas presentan tendencias negativas a escala anual y estacional, respecto a los puntos de cambio, la mayoría de las estaciones meteorológicas, registraron cambios posteriores a 1960.

Khosravi *et al.* (2016) evaluaron la precipitación en la provincia de Fars en Irán, en dicho estudio utilizaron datos mensuales de 22 estaciones pluviométricas para el periodo (1972-2011); para la determinación de tendencias aplicaron la prueba de MK, sin embargo, en la detección de puntos de cambio se aplicaron 4 métodos: Pettitt test, Standard Normal Homogeneity Test, Buishand range test y, Von Neuman ratio; los resultados indicaron una tendencia negativa en la mayoría de las estaciones

pluviométricas; no obstante, las tendencias no fueron significativas. Asimismo, no se registraron puntos de cambio en ningún método empleado en dicho análisis.

En Malasia Peninsular, Suhaila & Yusop (2018), analizaron las tendencias y puntos de cambio en la temperatura media, máxima y mínima, dicho análisis se aplicó a escala anual y estacional, periodo (1980-2011); los métodos empleados fueron el análisis de Sequential Mann-Kendall (SQ-MK) y la prueba de Pettitt. Los resultados indican tendencias significativas positivas, nivel de confianza (95%) en las tres variables de estudio, (escalas estacional y anual), la mayoría de los puntos de cambio se identificaron en la década de 1990.

Dicho lo anterior, se logra apreciar que las pruebas de MK y Pettitt se han utilizado de manera conjunta para la detección de tendencias y puntos de cambio en distintas partes del planeta. Asimismo, es relevante resaltar que las variables que principalmente se evalúan son la precipitación y temperaturas, por lo que se dichas pruebas estadísticas fueron seleccionadas para su aplicación en la presente investigación.

### **Índice de precipitación estandarizado (SPI)**

En la cuenca hidrológica del Río Sarawak, Malasia, Bong & Richard (2020), realizaron un estudio con base en la estimación del índice de precipitación estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés) utilizando datos de precipitación correspondientes al periodo (1975-2015) de 12 estaciones pluviométricas de la cuenca. El análisis de tendencias se llevó a cabo en distintas escalas temporales (3, 6 y 9 meses), aplicando el método estadístico de MK, los resultados mostraron que 8 estaciones presentan una tendencia al decremento y 4 estaciones registraron una tendencia positiva con un nivel de confianza del 95%, en términos generales se revela una tendencia negativa en los valores del SPI, a escala mensual y anual, lo que implica una mayor tendencia al incremento de eventos de sequía.

Por su parte, Ouatiki *et al.* (2019) analizaron la variabilidad de la precipitación en la cuenca hidrológica del Río Oum Er-Rbia, en Marruecos por lo que utilizaron el SPI a diversas escalas y posteriormente analizaron las tendencias (significancia estadística de  $\alpha = 0.05$ ) en diversas escalas temporales (mensual, estacional y anual), aplicando el método estadístico de MK; para dicho estudio usaron datos de 15 estaciones, correspondientes al periodo 1970-2010. Los resultados registraron que existe una tendencia predominante al decremento de la precipitación en la cuenca a excepción de 3 estaciones.



En el estado de Zacatecas, México, Magallanes-Quintanar *et al.* (2019) ejecutaron un análisis que contempló la estimación de SPI a escala de 6 y 12 meses, donde identificaron regiones homogéneas en la precipitación a través de un análisis de conglomerados; posteriormente, estimaron las tendencias de 4 SPI regionales que se analizaron en diversas escalas temporales: anual, estación húmeda y seca. Cabe mencionar que se utilizaron 31 estaciones meteorológicas con datos del periodo 1964-2014. Los resultados indican que las tendencias significativas son negativas ( $P < 0.05$ ) en la estación húmeda y seca, así como a escala anual en las regiones del semidesierto y los cañones; mientras que, a escala anual en las regiones montañosas, los resultados sugieren una disminución en las tendencias del SPI a doce meses (SPI-12) durante las últimas 5 décadas a lo largo de todo el territorio estatal.

La caracterización de la ocurrencia de eventos de sequía mediante series temporales se complementa a través de métodos multivariados, dichos métodos consisten en determinar si existen formas más simples de representar un conjunto de datos complejo, además de explorar si las observaciones se concentran en grupos y si existe una interdependencia entre los elementos. Esta clase de técnicas se han utilizado ampliamente para analizar datos climatológicos (Olivares-Barlin *et al.*, 2019).

En distintas regiones a nivel global y nacional se han desarrollado análisis a través de métodos multivariados, por citar algunas investigaciones, en el nordeste de Brasil, Paredes *et al.* (2015) emplearon el SPI para calcular la anomalía de la precipitación acumulada a escala trimestral, en el periodo de 1901-2010. Los patrones subyacentes que configura el SPI-3 en el dominio espacio-temporal, se identificaron aplicando un análisis por componentes principales (ACP) seguido de un análisis de conglomerados (AC). El ACP generó 10 componentes principales que retuvieron 76% de la varianza original, mientras que para identificar los patrones que tienen puntuaciones y cobertura seca, similares resultaron 11 grupos homogéneos con un nivel de confianza del 99%, además se identificaron tendencias en las series de tiempo a través de la prueba de MK, con un nivel de confianza del 95%, sin embargo, las sequías a escala mensual, no mostraron tendencias de largo plazo.

En el sureste de España, en la Demarcación Hidrográfica del Segura y Mancomunidad, Ruiz-Álvarez *et al.* (2021) regionalizaron patrones temporales de sequía mediante el SPI-12, para evaluar patrones de sequías hidrológicas y su distribución espacial, por lo que, se utilizaron registros de precipitación mensual correspondientes al periodo 1968–2017; la regionalización se realizó a partir del ACP, obteniendo 4 regiones homogéneas, cuya distribución espacial concordó con el contexto hidrológico, climático y orográfico de la región.

Esquivel-Arriaga *et al.* (2019) analizaron series del SPI, en la cuenca alta del Río Nazas, localizada en el estado de Durango, México, por lo que se consideraron datos de precipitación mensual de 17 estaciones distribuidas en la cuenca en el periodo 1980-2008, empleando un ACP. Este análisis permitió determinar el porcentaje de variabilidad común entre las estaciones e integrar un SPI regional; el ACP determinó que, del total de estaciones analizadas, 15 estaciones se agrupan en el componente principal (CP) I, el cual explica 49.60% de la variabilidad. Se determinó una correlación significativa ( $p < 0.01$ ) entre las 15 estaciones, por lo que se registró una variación común de la precipitación para 88.2% de las estaciones.

Como se logra apreciar, el SPI es ampliamente utilizado en distintas regiones del mundo, debido a que, para su estimación, solo se requieren datos de precipitación; asimismo, facilita el análisis a diversas escalas temporales para evaluar distintos tipos de sequía, y no solo permite analizar condiciones secas sino también condiciones húmedas; no obstante, a partir de este índice, es posible detectar tendencias y verificar si en una zona las condiciones tienden a ser más secas o más húmedas a escala mensual, estacional o anual. Por otro lado, el ACP, permite simplificar los SPI de diversas estaciones meteorológicas, lo que permite determinar SPI regionales que se denominan patrones dominantes de una región.

### **Influencia del ENOS en el régimen de variables hidrometeorológicas**

El ENOS es el fenómeno macroclimático más global, por ello, se ha posicionado el análisis de su influencia en la hidrometeorología de las cuencas hidrográficas como un tema de relevancia para la hidrología. Dicho fenómeno ha sido objeto de estudio en distintas regiones a nivel global y nacional, debido a que sus efectos son heterogéneos según la región de estudio; a continuación, se citan algunos estudios realizados en los últimos años.

Vilatte *et al.* (2017) analizaron la relación entre el fenómeno del ENOS y las condiciones pluviométricas en Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina, durante el periodo 1950-2015, a través del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, considerando una significancia estadística del 5%. El índice oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés) fue el índice climático que se aplicó para representar los registros históricos del ENOS. De manera general, se concluyó como baja-inexistente la correlación de las precipitaciones mensuales y anuales con respecto a dicho fenómeno.

Asimismo, en Venezuela, específicamente en la cuenca del Lago de Valencia, Hernández & Rodríguez (2020) analizaron la influencia del fenómeno del Niño en el régimen de las precipitaciones,

mismas que se estandarizaron a través del SPI; para determinar la correlación se empleó el coeficiente de Pearson con una confianza del 95% y se aplicaron dos índices climáticos para representar al ENOS. Los resultados indicaron que no existe evidencia estadística que revele una correlación entre la precipitación y el fenómeno del ENOS.

Loaiza Cerón *et al.* (2020) analizaron la variabilidad espacio-temporal de las sequías en Cali, Colombia y sus correlaciones con el fenómeno del ENOS. El SPI se empleó con el objetivo de detectar eventos de sequía a través de registros de precipitación mensual correspondientes a 24 estaciones distribuidas en la zona de estudio en el periodo 1971-2011; respecto al análisis de correlación se estimó el coeficiente de Pearson con nivel de significancia estadística al 5%, utilizando 7 índices climáticos *versus* los registros pluviométricos de 24 estaciones. Los resultados presentaron correlaciones negativas entre la precipitación y el fenómeno del ENOS.

Bravo-Cabrera *et al.* (2017) llevaron a cabo un análisis el efecto del ENOS sobre la precipitación a lo largo del territorio mexicano; para ello emplearon registros diarios de precipitación correspondientes a dos periodos de estudio: 1961-1990 y 1991-2013; además, se dividieron en dos épocas fría-seca y cálida-húmeda. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, con una significancia de 5%, con el objetivo de determinar la relación entre la precipitación y el índice Multivariado del ENOS (MEI, por sus siglas en inglés). Los resultados denotan que en la región noroeste del país posee una relación directa entre dichas variables, mientras que se detectó una relación inversa en la región sur en los meses de verano.

Cerano Paredes *et al.* (2020) estudiaron el comportamiento temporal de las sequías a través del SPI-12 y determinaron la influencia del fenómeno climático ENOS en la cuenca del Río Yaqui, Sonora; emplearon registros del periodo 1937-2016 correspondientes a 28 estaciones, para determinar la correlación entre las variables aplicaron un análisis espectral de coherencia de ondas en el cual se relacionó el SPI regional (mediante un ACP *versus* el índice Niño 3.4). Los resultados denotan una relación entre la variabilidad del SPI y el fenómeno del ENOS, los períodos secos y lluviosos más importantes registrados han sido influenciados de manera significativa por la influencia del ENOS; valores del SPI negativos extremos están relacionados con la fase de La Niña mientras que los valores positivos más altos del SPI se relacionan con la fase de El Niño.

Como se logra apreciar el fenómeno del ENOS, posee una correlación positiva o negativa en la variable de la precipitación de acuerdo con la región de estudio, aunque no en todos los casos existe dicha correlación. Sin embargo, dichos estudios se centran en analizar la influencia de dicho fenómeno respecto a la precipitación o a través del SPI. La gran mayoría de los estudios emplean el

coeficiente de Pearson, por lo que se aplicó en el presente estudio, asimismo es importante resaltar que los índices que se utilizan para representar el fenómeno del ENOS son diversos y varía la cantidad de los que se emplean, por lo que en el presente análisis contemplo aplicar cinco de los más utilizados (Oceanic Niño Index, Extreme Eastern Tropical Pacific, Central Tropical Pacific, East Central Tropical Pacific y Multivariate ENSO Index).

### **Estudios previos del cambio climático**

Durante los últimos años, el interés por analizar el cambio climático a escala global y regional se ha acrecentado debido a que este fenómeno incide directamente en aspectos ambientales, económicos y sociales; los siguientes estudios evidencian la relevancia de detectar si existen cambios en el clima de una determinada región, a partir de los 27 índices de cambio climático, propuestos por el ETCCDI.

En Galicia, España, Rilo & Lorenzo (2020), llevaron a cabo un análisis de tendencias a escalas anual y estacional de los principales índices extremos de temperatura y precipitación a través de datos correspondientes a 17 estaciones meteorológicas durante el periodo 1960-2017. Respecto a los índices de temperatura se consideraron 9 y en precipitación se contemplaron 10; una vez que se calcularon los índices, se aplicó el método de MK para determinar tendencias significativas con un nivel de confianza de 90 y 95%. En términos generales, la mayoría de los índices de temperatura presentan tendencias positivas, mientras que en los de precipitación presentan un descenso en la mayor parte de los casos.

Por su parte, Gbode *et al.* (2019) realizaron un estudio en Nigeria con el objetivo de analizar las tendencias de 17 índices, por lo que se emplearon datos a escala diaria de temperatura y precipitación correspondientes al periodo 1971-2013 a partir de 24 estaciones distribuidas en 3 zonas climáticas. Los datos fueron homogenizados a través de RHtest versión 4 y los índices se calcularon mediante RClimDex versión 1.0; posteriormente, se llevó a cabo el análisis de tendencias a través de la prueba de MK, con un nivel de confianza de 95% ( $p \leq 0.05$ ), Los resultados registraron tendencias significativas de incremento en índices de temperatura en la mayoría de las estaciones localizadas en las 3 zonas; en el caso de los índices correspondientes a la precipitación, de manera general se aprecia alta variabilidad, sin embargo, se detectó que en algunas estaciones la precipitación total anual tiende a incrementar.

En el noroeste de China, específicamente en la zona de las montañas Qilian, Lin *et al.* (2017) evaluaron la distribución espacial y tendencias temporales (escalas anual y mensual) de los extremos climáticos de precipitación y temperatura; se utilizaron datos de 15 estaciones meteorológicas del periodo 1960-2014. Se evaluaron 16 índices de temperatura y 10 de precipitación. Asimismo, se

aplicó el método de regresión lineal para el análisis de tendencias en conjunto con la prueba de MK para evaluar la significancia estadística de dichas tendencias, representando las que contuvieran un nivel de significancia al 5%. De manera general, se registró que en la temperatura se presentan tendencias significativas de incremento, no obstante, respecto a los extremos de precipitación, en su mayoría presentaron una tendencia positiva.

En el territorio mexicano son escasos los estudios que contemplan el análisis de los índices de cambio climático. En la Reserva de la Biosfera “El Vizcaino” en Baja California Sur, Kachok & Ivanova (2019), evaluaron las tendencias de 16 índices con base en datos de temperaturas máximas y mínimas, así como de precipitación durante el periodo de 1960 al 2012, empleando datos correspondientes a 9 estaciones meteorológicas; a los datos se les aplicó un control de calidad y un análisis de homogeneidad. El 75% de los índices mostró una tendencia al aumento y el 25% una tendencia a la disminución.

Por su parte, Figueroa-Gallegos (2017) analizó tendencias de los 27 índices de cambio climático del ETCCDI, en la cuenca del Río Grande, Chiapas; dichos índices se calcularon a través de series de datos registrados de temperaturas máximas y mínimas y precipitación (escala diaria) durante el periodo 1961-2014, correspondientes a 3 estaciones meteorológicas. El cálculo de los índices se realizó a través del programa estadístico RClindex. En términos generales, se registró que la temperatura mínima y máxima presenta una tendencia ascendente significativa, con un nivel de confianza de 95%.

Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta (2017), realizaron la detección de extremos climáticos en la precipitación y temperatura en el estado de Guerrero; se aplicaron los 27 índices en 47 estaciones meteorológicas para el periodo de estudio 1971-2000. Se empleó el programa RClindex y el módulo RHTest para verificar la homogeneidad de las series de datos. Los resultados registraron el valor correspondiente a la tendencia para cada estación; de los 27 índices únicamente 11 registraron tendencia significativa; 5 índices se asocian con la precipitación y 3 de ellos presentaron una tendencia positiva; respecto a la temperatura, únicamente 2 índices registraron una tendencia de incremento.

En el estado de Zacatecas, Pita-Díaz & Ortega-Gaucin (2020), analizaron tendencias en 8 índices (4 relacionados con la temperatura y 4 con la precipitación), para el periodo de 1976-2015 a escalas anual y estacional. Posteriormente, se aplicó la prueba estadística de MK, con el objetivo de determinar tendencias al 5% de significancia estadística. En general, los resultados revelan cambios relevantes en los índices de la temperatura, tal como el incremento en la temperatura máxima y el

decremento en la temperatura mínima; respecto a la precipitación, se registró un incremento en las regiones norte y este.

Ahora bien, los índices propuestos por el ETCCDI permiten realizar un análisis de detección de cambio climático en diversas regiones del Planeta y de México, por lo que aplicar una metodología empleada a nivel global, permite inferir si existen señales de cambio climático en diversas regiones climáticas.

### **Región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde**

La región de estudio abarca la porción centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde; se localiza en la zona media del estado de San Luis Potosí, México. Geopolíticamente abarca los municipios de Armadillo de los Infante, San Nicolás Tolentino, Cerritos, Villa Juárez, Rioverde, Ciudad Fernández, Guadalcázar y en menor proporción Zaragoza, Santa María del Río, San Ciró de Acosta, Rayón, Cárdenas, Alaquines y Cd. del Maíz. En la región de estudio se localiza la zona conurbada Rioverde-Ciudad Fernández, así como la zona agrícola de Rioverde considerada una de las más importantes de México y posiblemente la más importante del estado de San Luis Potosí, según Charcas–Salazar *et al.* (2012).

### **Planteamiento del problema y Justificación**

Como se logra apreciar, los cambios en el clima representan una amenaza que podría afectar a distintos sectores en diversas escalas temporales y espaciales, lo que ha originado que se desencadenen una serie de estudios que analicen las posibles afectaciones sobre los recursos hídricos. Dichos análisis han determinado modificaciones históricas y/o futuras en los patrones hidrometeorológicos y con base en los estudios se han logrado implementar medidas de adaptación y mitigación.

Evidentemente, la relación entre el sistema climático y el ciclo hidrológico está estrechamente vinculada, lo que podría ocasionar una serie de afectaciones de diversos signos de acuerdo con las particularidades de cada región. No obstante, México se ha caracterizado por ser un país vulnerable ante los efectos del cambio climático, lo que representa un factor de riesgo para el territorio nacional. El impacto del cambio climático en los recursos hídricos en el país variará de una zona hidrológica a otra, dependiendo de sus características climatológicas, de uso de suelo y de relieve (Velázquez-Zapata *et al.*, 2017).

Con base en lo anterior, es posible evidenciar la gran importancia que representa analizar la variabilidad climática y el cambio climático, debido a que los cambios observados en el clima han captado la atención de diversos sectores, generado un apogeo en la investigación de dichos fenómenos. Durante las últimas décadas, diversas regiones han sido afectadas por cambios en los patrones climáticos que han causado impactos en los sistemas humanos y naturales en el planeta; varias de las regiones presentan cambios en el ciclo hidrológico, afectando el recurso hídrico en calidad y cantidad (IPCC, 2014).

No obstante, es fundamental mencionar la importancia que posee la subcuenca hidrológica del Río Verde, debido a que se localiza la zona agrícola de Rioverde considerada como la más importantes del estado; de acuerdo con datos de INEGI (2016), en la región de estudio, alrededor de 350 km<sup>2</sup> son destinados a agricultura de riego en distintas modalidades (anual, permanente y semipermanente); por otro lado, 1528 km<sup>2</sup> son empleados en actividades de agricultura de temporal y se distribuyen irregularmente en el interior de la zona, lo que caracteriza a la subcuenca hidrológica como una región estratégica en el desarrollo socioeconómico del estado, considerando de igual manera que la densidad de habitantes en la zona es muy representativa. Por lo anterior expuesto, es relevante evaluar si existen tendencias significativas en los patrones climáticos de la región de estudio. Asimismo, es imprescindible detectar si existen señales de cambio climático debido a que en la subcuenca del Río Verde no se han desarrollado análisis de esta índole; por lo que se considera oportuno desarrollar dicha investigación. De acuerdo con Moshir-Panahi *et al.* (2020), la evaluación exhaustiva de las variaciones hidroclimáticas y las tendencias de cambio son esenciales para comprender, mitigar y adaptarse a los cambios fundamentales de los recursos hídricos. Finalmente, el presente estudio fungiría como un punto de referencia para el desarrollo de futuros proyectos de investigación y la implementación de estrategias de mitigación y adaptación en la región de estudio para el adecuado desarrollo de la agricultura y demás actividades de la población.

## **Hipótesis**

Existen tendencias significativas en la variabilidad climática, así como indicios de cambio climático en la región de estudio durante el periodo 1980-2018.

## **Objetivo general**

Determinar la presencia de tendencias significativas en la variabilidad climática y cambio climático en la región centro-noroccidental de la subcuenca del Río Verde a partir de registros meteorológicos históricos y un análisis estadístico robusto durante el periodo 1980-2018.

## **Objetivos específicos**

1. Generar una base de datos homogénea y robusta con las variables de precipitación, temperatura media, máxima y mínima a partir de la información de estaciones meteorológicas.
2. Determinar tendencias significativas en la variabilidad climática a través de un análisis de tendencias y rupturas en las variables de estudio.
3. Evaluar el índice de precipitación estandarizado (SPI), mediante la determinación de tendencias y un análisis multivariado.
4. Evaluar el forzamiento de la variabilidad climática de baja frecuencia en los regímenes de temperatura, índices de precipitación estandarizados y escurrimiento superficial a partir de un análisis de correlación.
5. Evaluar la presencia de cambio climático mediante un análisis de tendencias de los índices del ETCCDI.



# **1. Región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, San Luis Potosí, México.**

En el presente capítulo, se describen los aspectos geográficos, ambientales y socioeconómicos que caracterizan a la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde.

## **1.1 Localización de la región de estudio**

La región de estudio abarca la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde; dicha subcuenca se localiza en la zona media del estado de San Luis Potosí, México; De acuerdo con datos de INEGI (2018), los municipios que se ubican en el interior de la región de estudio son: Armadillo de los Infante, San Nicolás Tolentino, Cerritos, Villa Juárez, Rioverde, Ciudad Fernández, Guadalcázar y en menor proporción Zaragoza, Santa María del Río, San Ciró de Acosta, Rayón, Cárdenas, Alaquines y Cd. del Maíz (Figura 5).

## **1.2 Fisiografía**

### **1. 2. 1. Provincias fisiográficas**

La región de estudio se localiza principalmente en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y una mínima porción corresponde a la provincia de la Mesa del Centro (Figura 6). La provincia de la Sierra Madre Oriental abarca una porción de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Veracruz. Sus montañas están constituidas por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas, principalmente de la Era Mesozoica; los estratos de estas rocas se encuentran doblados en forma de grandes pliegues que conforman una sucesión de crestas alternadas con bajos; las cumbres oscilan entre los 2 000 y 3 000 msnm (INECC, 2022).

### **1. 2. 2. Subprovincias fisiográficas**

De acuerdo con el INEGI (2001 b), la extensión centro-norte de la región de la subcuenca se localiza principalmente en la subprovincia fisiográfica denominada “Sierras y Llanuras Occidentales”; asimismo, la porción sur corresponde a la subprovincia “Carso Huasteco” y una mínima extensión del occidente se ubica en las “Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato” mientras que al este una fracción minuciosa corresponde a la “Gran Sierra Plegada” (Figura 7).

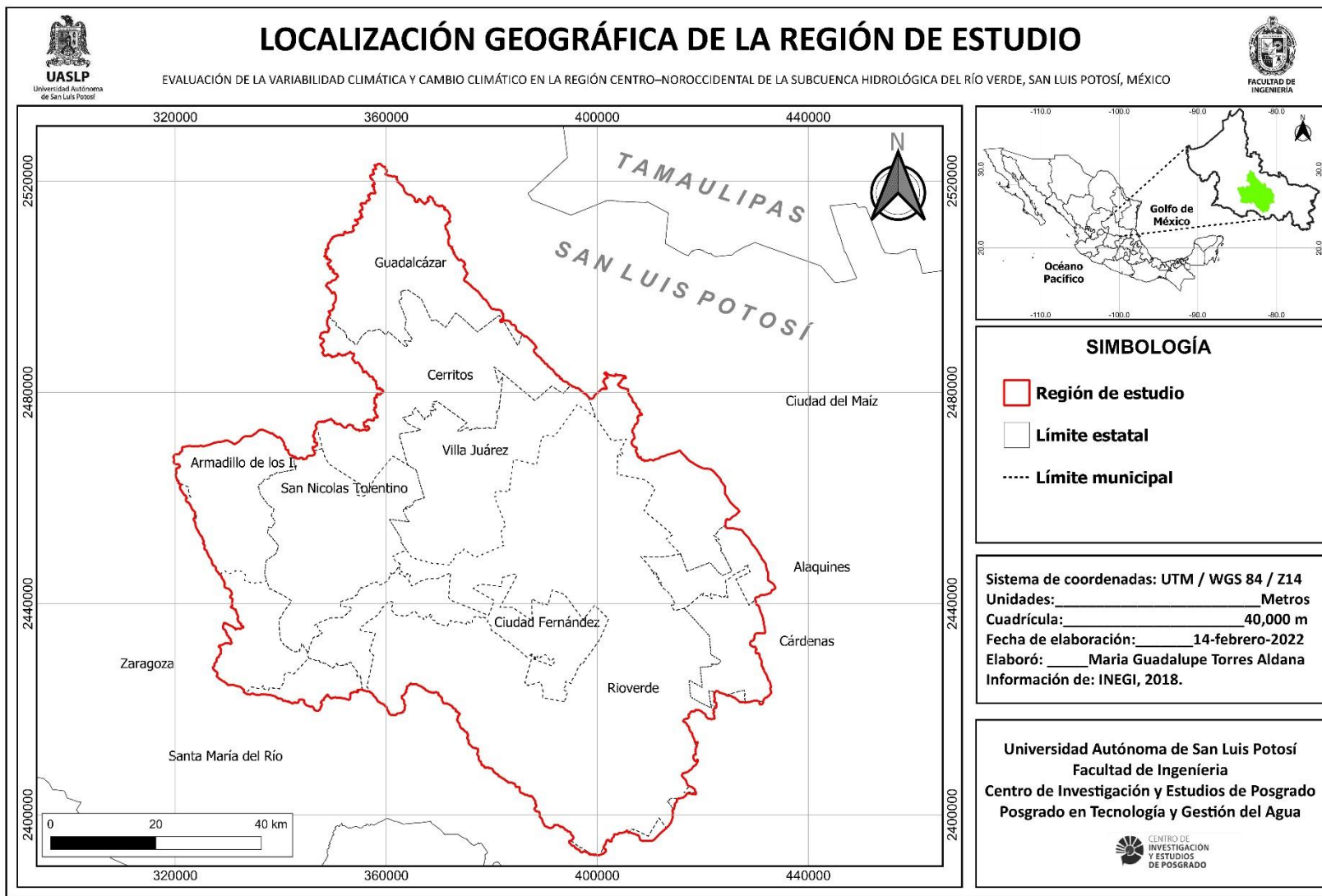


Figura 5. Localización de la zona de estudio (Elaboración propia con base en INEGI, 2018).

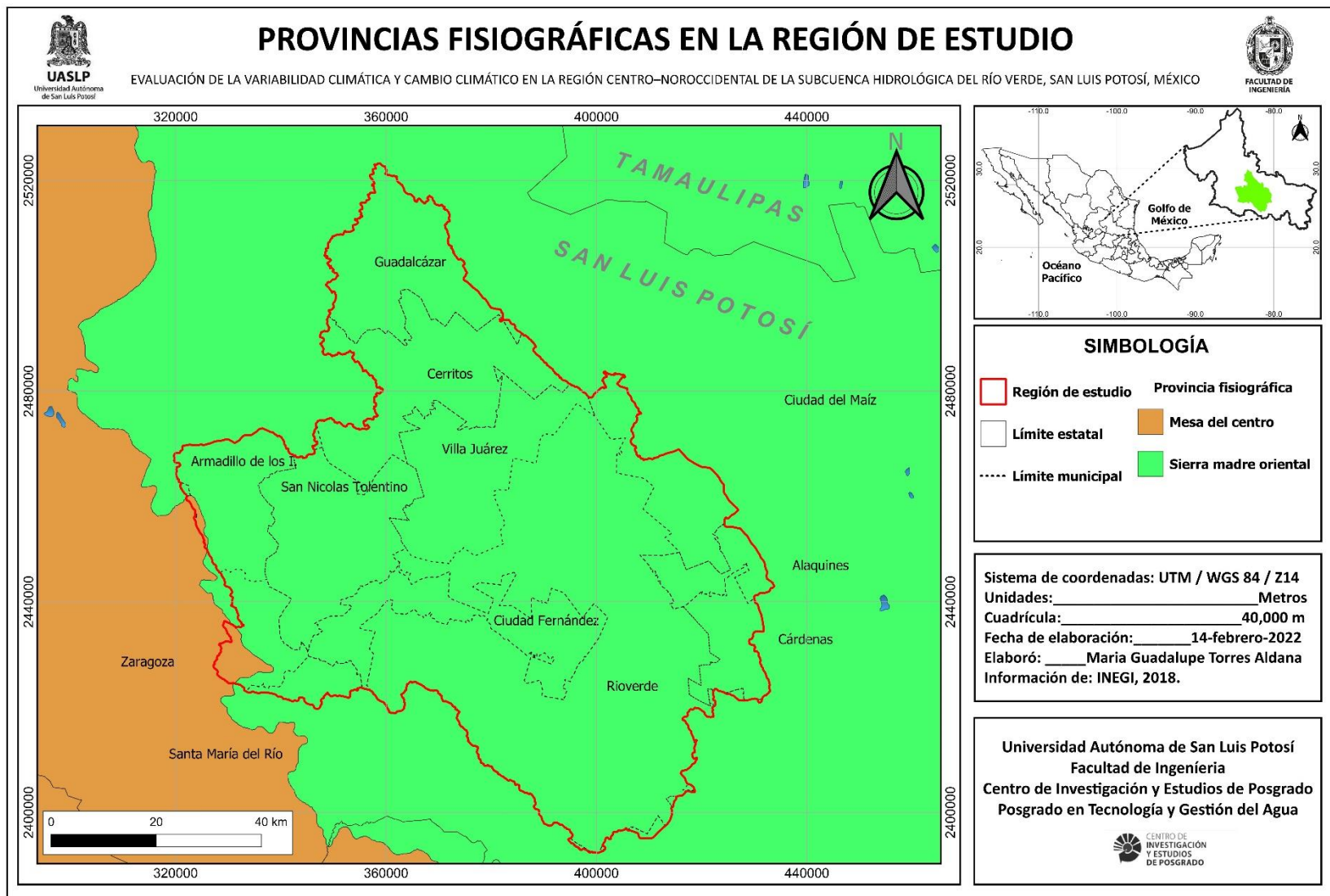


Figura 6. Provincias fisiográficas en la región de estudio (Elaboración propia con base en INEGI, 2001; INEGI, 2018).

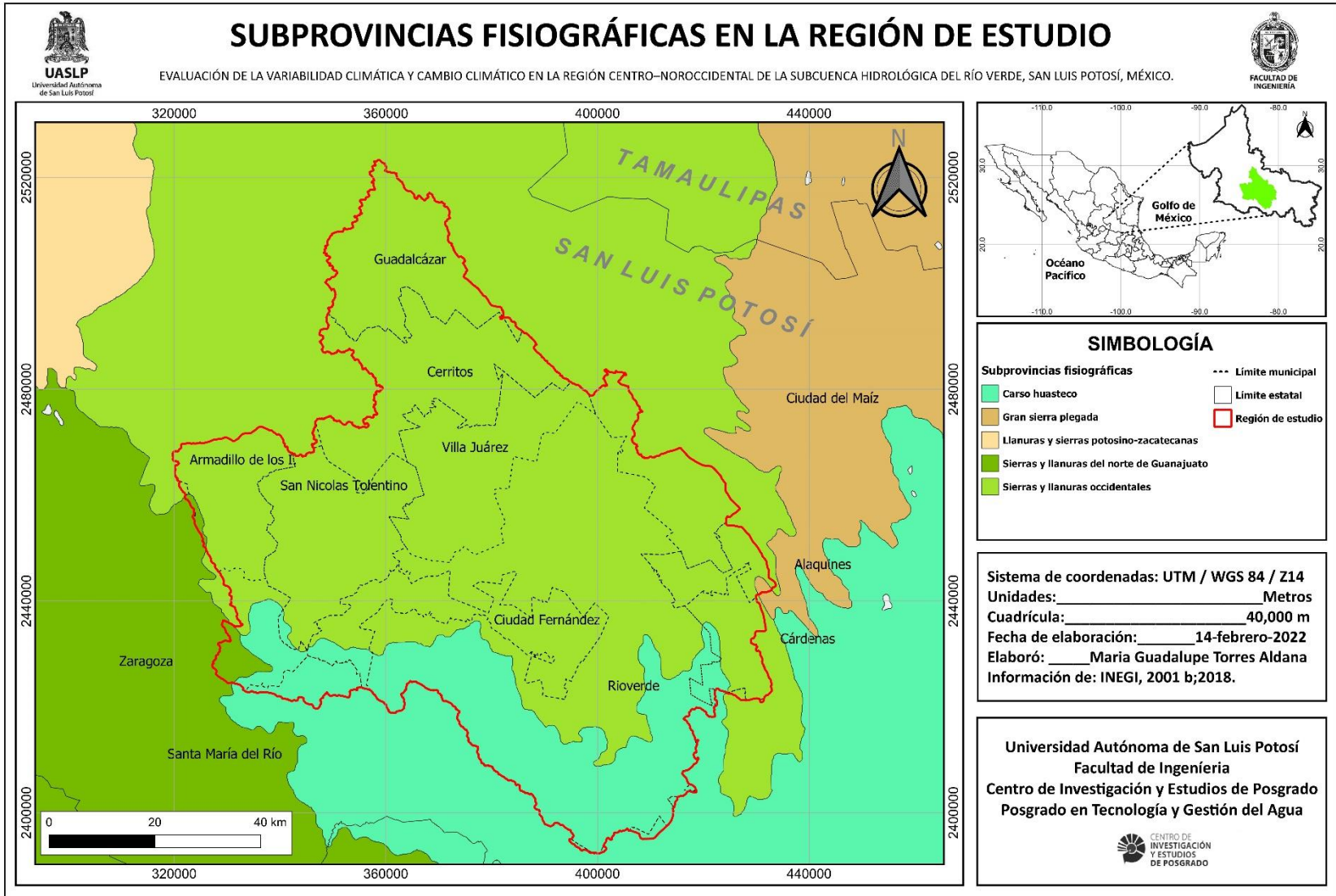


Figura 7. Subprovincias fisiográficas en la región de estudio (Elaboración propia con base en INEGI, 2001 b; 2018).

### 1. 3 Clima

Con base en la clasificación climática de Köppen adaptada a México por Enriqueta García en la región de estudio se presentan tres tipos de climas. El 83.0 % del área corresponde al clima semiárido-semicálido “BS<sub>1</sub>hw”, y se localiza principalmente de noreste al sureste, mientras que, el 10.8 % del territorio es de tipo semiárido-templado “BS<sub>1</sub>kw” y se ubica en la parte noroccidente y oeste de la región, y el resto de la región (6.2 %), es de tipo árido-semicálido “BS<sub>0</sub>hw”, y se encuentra principalmente en la zona centro de la subcuenca con una mínima porción en el lado oeste como se observa en la Figura 8 (García, E. & CONABIO, 1998).

#### 1. 3. 1 Características de los tipos de climas

De acuerdo con García, E. & CONABIO (1998), los tres tipos de climas que se presentan en la región centro-noroccidental de la subcuenca del Río Verde se describen a continuación:

**Semiárido-semicálido (BS<sub>1</sub>hw):** Este tipo de clima se caracteriza por poseer temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caluroso mayor de 22 °C; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5-10.2% del total anual.

**Semiárido-templado (BS<sub>1</sub>kw):** Este clima presenta temperatura media anual en un rango de entre los 12 y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 ° C, temperatura del mes más cálido menor de 22 °C; lluvias en verano y porcentaje de precipitación invernal del 5-10.2% del total anual.

**Árido-semicálido (BS<sub>0</sub>hw):** Se caracteriza por presentar temperatura media anual entre 18 y 22 ° C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más cálido entre 18 y 22 °C; precipitaciones de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5-10.2% del total anual.

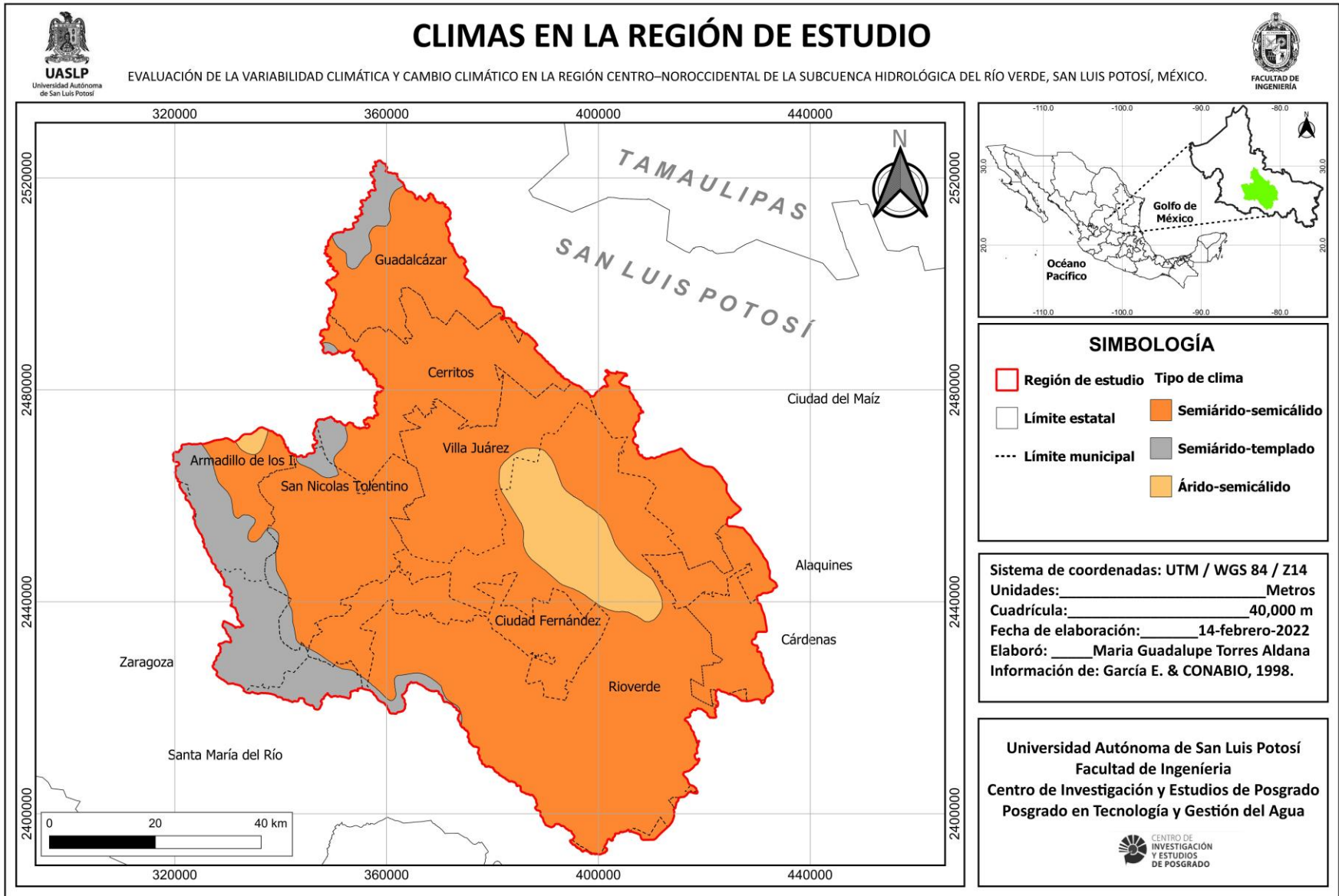


Figura 8. Climas en la región de estudio (Elaboración propia con base en García, E. & CONABIO, 1998; INEGI, 2018).

## 1.4 Hidrología

La región de estudio se ubica en la Región Hidrológica denominada “Pánuco”, como se logra apreciar en la Figura 9; La Región Pánuco se ubica en una porción importante del estado San Luis Potosí. Los ríos más importantes dentro de esta área son los ríos: Santa María, Verde, Tambaón, Gallinas, Valles y Moctezuma-Pánuco (DOF, 2017). La región de estudio alcanza una extensión de aproximadamente 7 450 km<sup>2</sup> y se localiza en la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde (Figura 10).

El Río Verde nace 35 km al oriente de la Cd. de San Luis Potosí, con una elevación promedio de 2 600 msnm en la cordillera que divide la cuenca del Pánuco de la Región Hidrológica, “El Salado”. Su curso es en dirección este-sureste, paralelo al del Río Santa María y confluye a él por la margen izquierda a una elevación de 250 msnm. En el valle existen desarrollos agrícolas beneficiados con aguas de del río y de los manantiales de Media Luna y Los Anteojitos, localizados al suroeste de la Cd. de Rioverde. El Manantial de la Media Luna descarga en promedio 135.3 hm<sup>3</sup>/año, con base en la estimación del periodo 1965-2005, mismos que se emplean en el Distrito de Riego “049”. Aguas abajo de la Ciudad de Rioverde, a una elevación de 950 msnm, el Río Verde penetra nuevamente en zonas topográficas accidentadas hasta su confluencia con el Río Santa María; Los principales tributarios del Río Verde son: Río Santa Catarina, Río Caracol, Arroyo Rayón, y varios tributarios menores en la región de El Refugio-Ciudad Fernández, como el Arroyo Morales, Arroyo Grande, Arroyo El Sauz y Arroyo San Rafael (DOF, 2014).

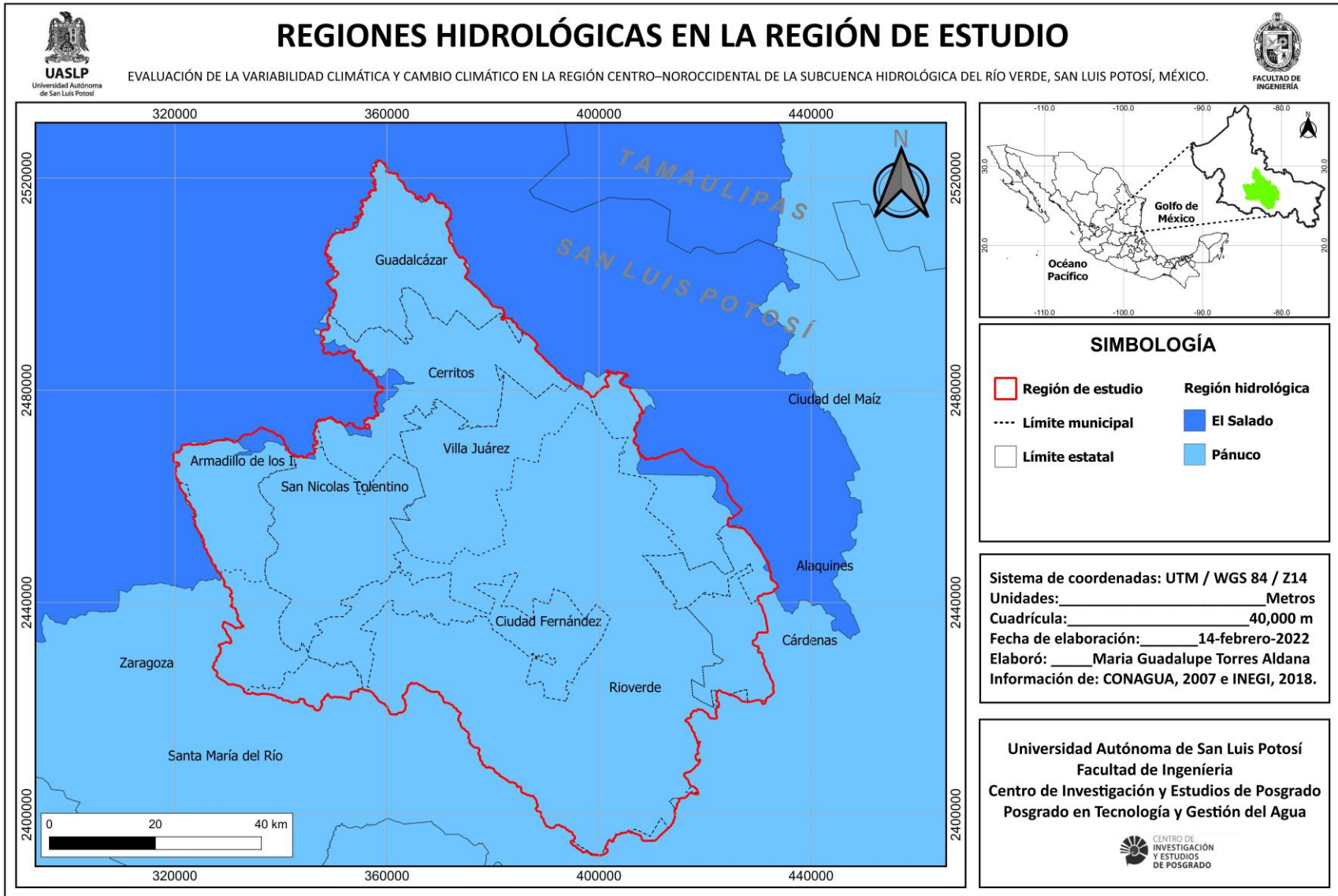


Figura 9. Regiones hidrológicas en la región de estudio (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2007 e INEGI, 2018)



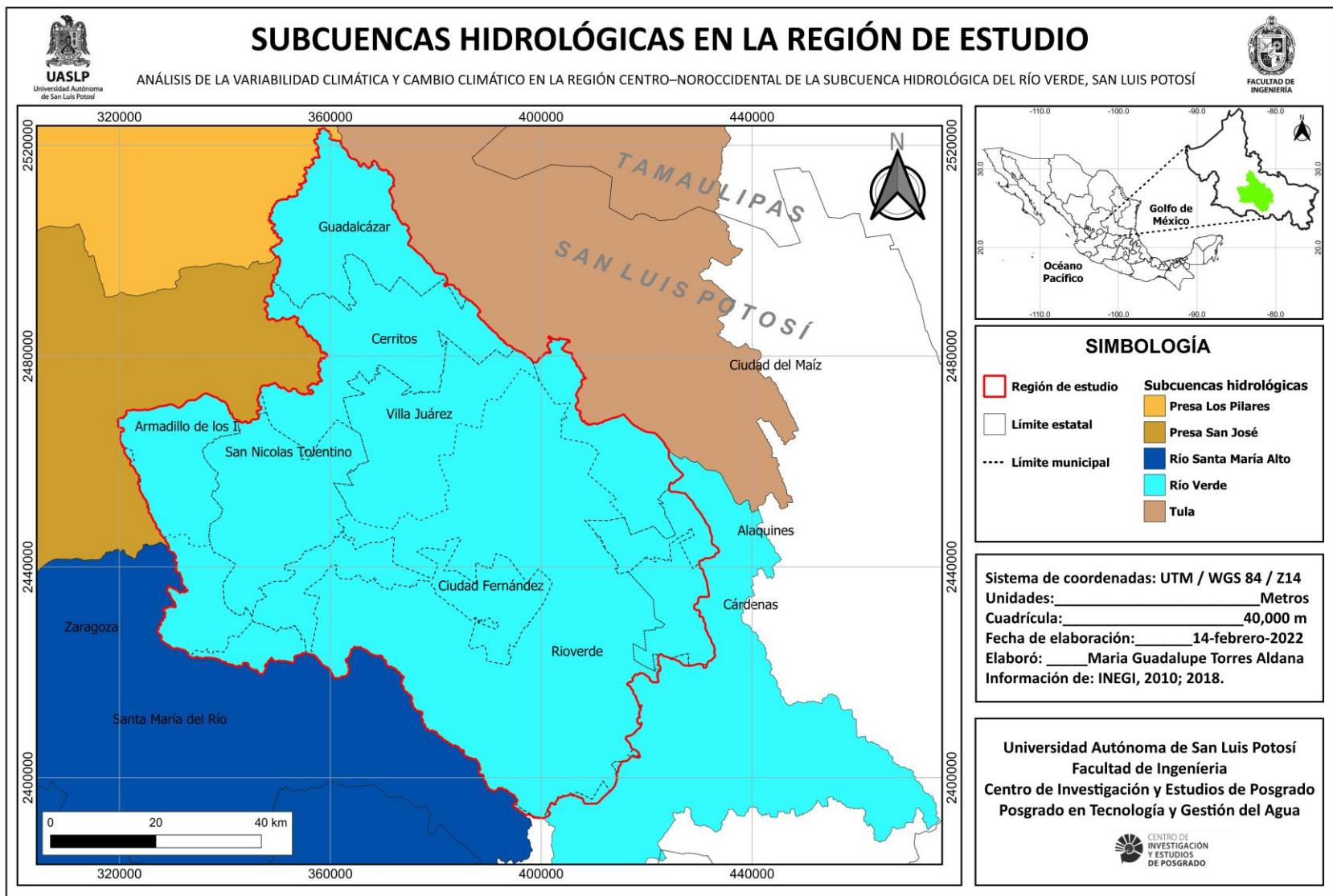


Figura 10. Subcuencas hidrológicas en la región de estudio (Elaboración propia con base en información de INEGI, 2010; 2018).

## **1.5 Topografía**

La zona de estudio presenta un gradiente de elevación con un rango de 821 - 2 598 msnm. Como se observa en la Figura 11, desde el noroccidente (municipio de Guadalcázar) hasta el suroccidente (suroeste de Rioverde) las elevaciones son superiores a los 2 000 msnm, no obstante, en la zona centro-norte (Cerritos, Villa Juárez, Cd. Fernández y Rioverde) las altitudes son menores, caracterizando una zona de valle en dirección centro-norte hacia el suroeste de la subcuenca hidrológica donde se presentan elevaciones cercanas a los 850 msnm.

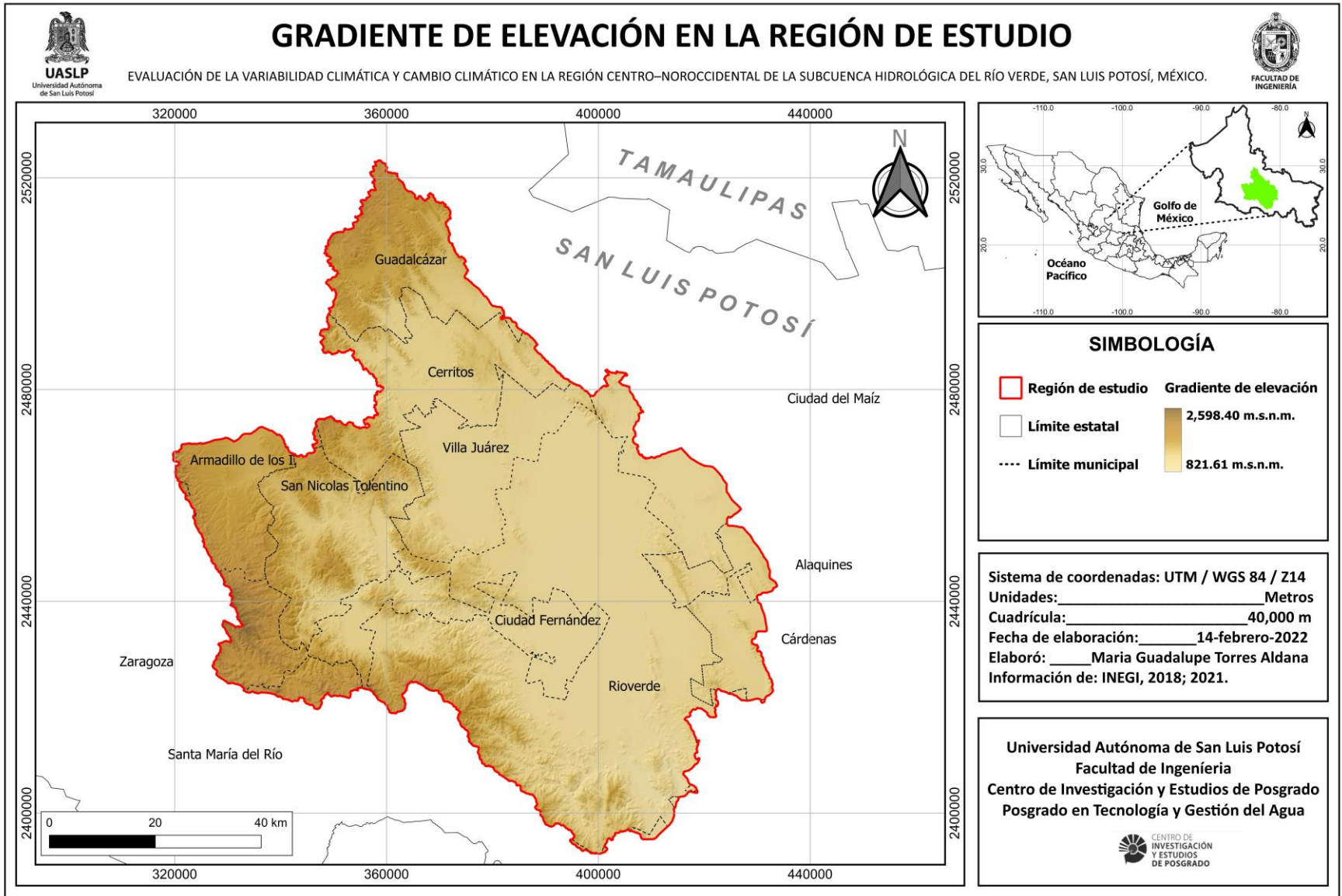


Figura 11. Gradiente de elevación en la región de estudio (Elaboración propia con base en INEGI,2018; 2021).

## 1.6 Edafología

La región de estudio posee una gran diversidad de suelo con 18 clases (Tabla 2), sin embargo, el tipo “Litosol”, predomina en aproximadamente el 50.0 % del área de estudio y se distribuye en mayor medida en centro-oeste de la subcuenca, no obstante, se presenta en menor proporción en el norte y este; el Vertisol Pélico se posiciona como la segunda clase con mayor presencia (10.6 %) y se localiza en la zona centro-norte, seguido del Xerosol gypsico con un 8.7 % ubicado en el centro. El Castañozem cálcico ocupa un 5.9 % y se ubica en dos porciones, la primera en el centro y la segunda en el suroeste; el Xerosol háplico, se encuentra al lado oeste de la subcuenca con un 5.6 %. El resto de las clases de suelo, en conjunto representan el 20.8% del territorio (Figura 12).

Tabla 2. Porcentaje de los tipos de suelos en la región de estudio (Elaboración propia con base en INIFAP & CONABIO, 1995)

TIPO DE SUELO	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	% REGIÓN DE ESTUDIO
Litosol	3599.50	48.31
Vertisol pélico	793.30	10.65
Xerosol gypsico	649.80	8.72
Castañozem cálcico	441.00	5.92
Xerosol háplico	414.90	5.57
Chernozem cálcico (calcárico)	343.00	4.60
Feozem háplico	324.70	4.36
Feozem lúvico	267.41	3.59
Rendzina	235.80	3.16
Regosol calcárico	154.70	2.08
Xerosol cálcico	106.92	1.43
Regosol eútrico	37.30	0.50
Solonchak órtico	19.60	0.26
Castañosem háplico	17.20	0.23
Fluvisol calcárico	16.29	0.22
Yermosol cálcico	14.57	0.20
Luvisol crómico	12.09	0.16
Cambisol cálcico (calcárico)	1.81	0.02

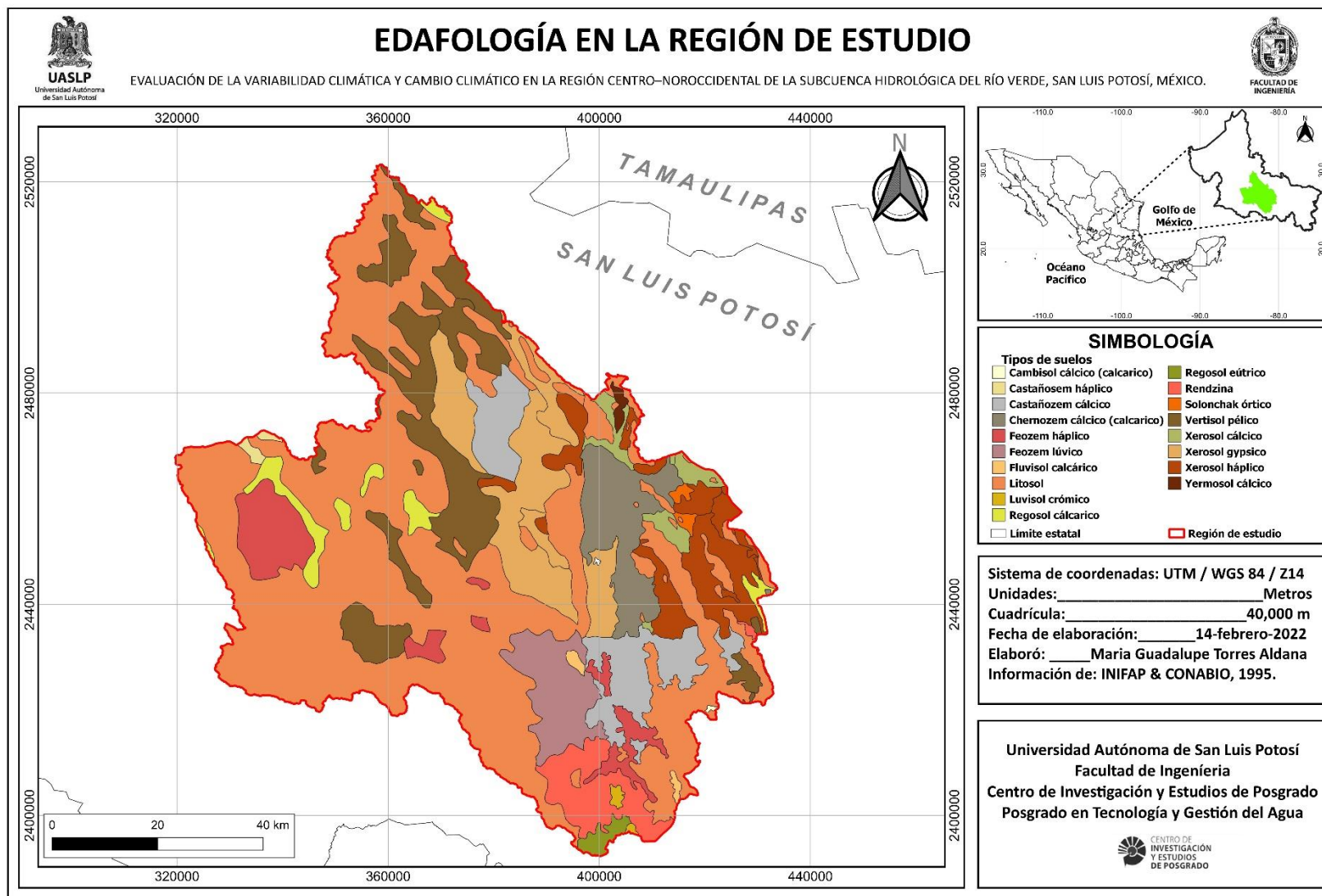


Figura 12. Edafología en la región de estudio (Elaboración propia con base en INIFAP & CONABIO, 1995).

## **1.7 Uso de suelo y vegetación**

En la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, existe una gran diversidad de usos de suelo y vegetación con un total de 37 clases (Figura 13); por su parte el matorral submontano, es la especie que predomina y se extiende en un 26.8% del territorio de la subcuenca, especialmente en las zonas centro-este, norte y sur; asimismo, la agricultura de temporal anual posee una superficie del 14.5%, su distribución es irregular, si bien en mayor medida en la zona centro-norte. Además, las vegetaciones secundarias arbustivas de matorral submontano y bosque de encino ocupan el 7.7 y 7.2% respectivamente de la superficie total, la primera se extiende en la zona centro-norte y la última, especialmente en la región occidente, en menor proporción en el norte y una mínima extensión en el sur. Por otro lado, el bosque de mezquite alcanza un 5.3% de extensión de la región de estudio, predominando en la zona centro-este; el resto de las categorías representan el 37.9% y su distribución se caracteriza por ser irregular y en mínimos porcentajes (Tabla 3).

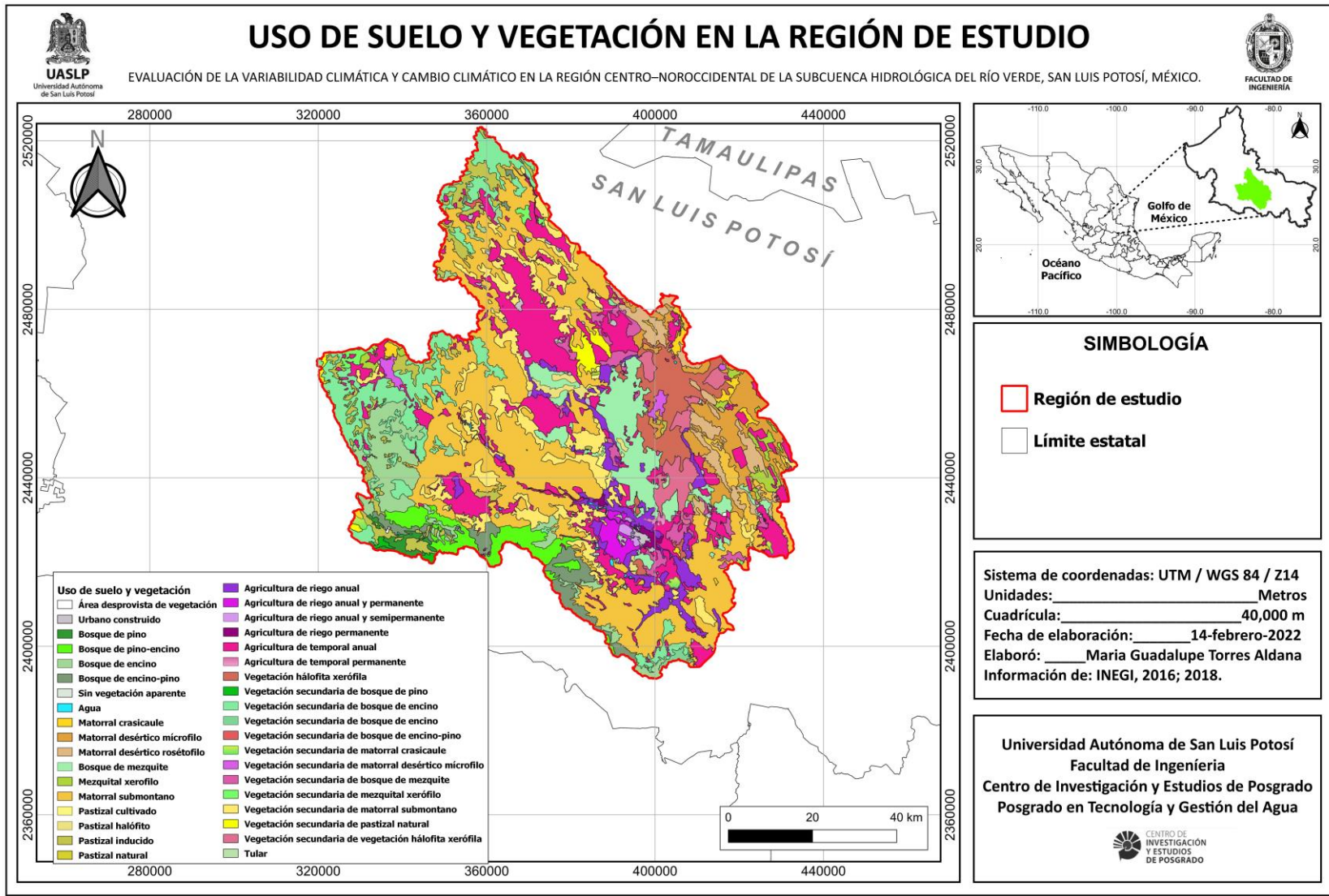


Figura 13. Usos de suelo y vegetación en la región de estudio (Elaboración propia con base en INEGI, 2016; 2018).

Tabla 3. Porcentaje de los usos de suelo y vegetación en la región de estudio (Elaboración propia con base en INEGI, 2016)

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	% EN LA REGIÓN DE ESTUDIO
Matorral submontano	2002.23	26.87
Agricultura de temporal anual	1082.12	14.52
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano	574.63	7.71
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	537.27	7.21
Bosque de mezquite	396.28	5.32
Bosque de encino	338.90	4.55
Matorral desértico micrófilo	296.20	3.98
Vegetación halófila xerófila	272.22	3.65
Pastizal inducido	265.04	3.56
Agricultura de riego anual	264.09	3.54
Matorral desértico rosetófilo	213.74	2.87
Bosque de pino-encino	201.19	2.70
Bosque de encino-pino	175.22	2.35
Vegetación secundaria arbustiva de vegetación halófila xerófila	138.52	1.86
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de mezquite	134.72	1.81
Mezquital xerófilo	73.57	0.99
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	60.49	0.81
Agricultura de riego anual y permanente	58.33	0.78
Urbano construido	56.63	0.76
Matorral crasicaule	50.16	0.67
Pastizal halófilo	39.95	0.54
Bosque de pino	37.90	0.51
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	36.14	0.49
Vegetación secundaria arbustiva de mezquital xerófilo	27.84	0.37
Agricultura de riego permanente	18.43	0.25
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	15.70	0.21
Agua	15.37	0.21
Pastizal cultivado	13.88	0.19
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	13.78	0.18
Agricultura de riego anual y semipermanente	12.52	0.17
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	12.11	0.16
Agricultura de temporal permanente	5.77	0.08
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	4.12	0.06
Tular	2.81	0.04
Área desprovista de vegetación	1.99	0.03
Sin vegetación aparente	0.63	0.01
Pastizal natural	0.59	0.01



## **1.8 Áreas naturales protegidas**

Según datos de la SEMARNAT & CONANP (2017) en la región de estudio se localizan dos Áreas Naturales Protegidas (ANP's). El ANP denominada “El Potosí”, se localiza en el interior de la subcuenca hidrológica de manera total específicamente en el suroccidente de municipio de Rioverde, mientras que aproximadamente la mitad de la ANP denominada “Sierra de Álvarez”, se ubica en el oeste de la región de estudio (Figura 14).

Por su parte, el decreto de la ANP “El Potosí” fue publicado el 15 de septiembre de 1936; dicha ANP, posee una superficie de 2 000 ha, y se localiza en las partes más altas de los macizos montañosos de la Serranía de Rioverde, SLP, aún se encuentran extensiones forestales de gran relevancia principalmente de bosques de pino-encino y encino-pino (DOF, 2015).

La ANP “Sierra de Álvarez” se decretó el 07 de abril de 1987 bajo la categoría de área de protección de flora y fauna; posee una superficie total de 16 900 ha distribuida en los municipios: Armadillo de los Infante, Zaragoza, San Nicolás Tolentino, los tipos de vegetación que existen son: Bosque de Encino, Pastizal inducido y natural, según SIMEC & CONANP (2022).

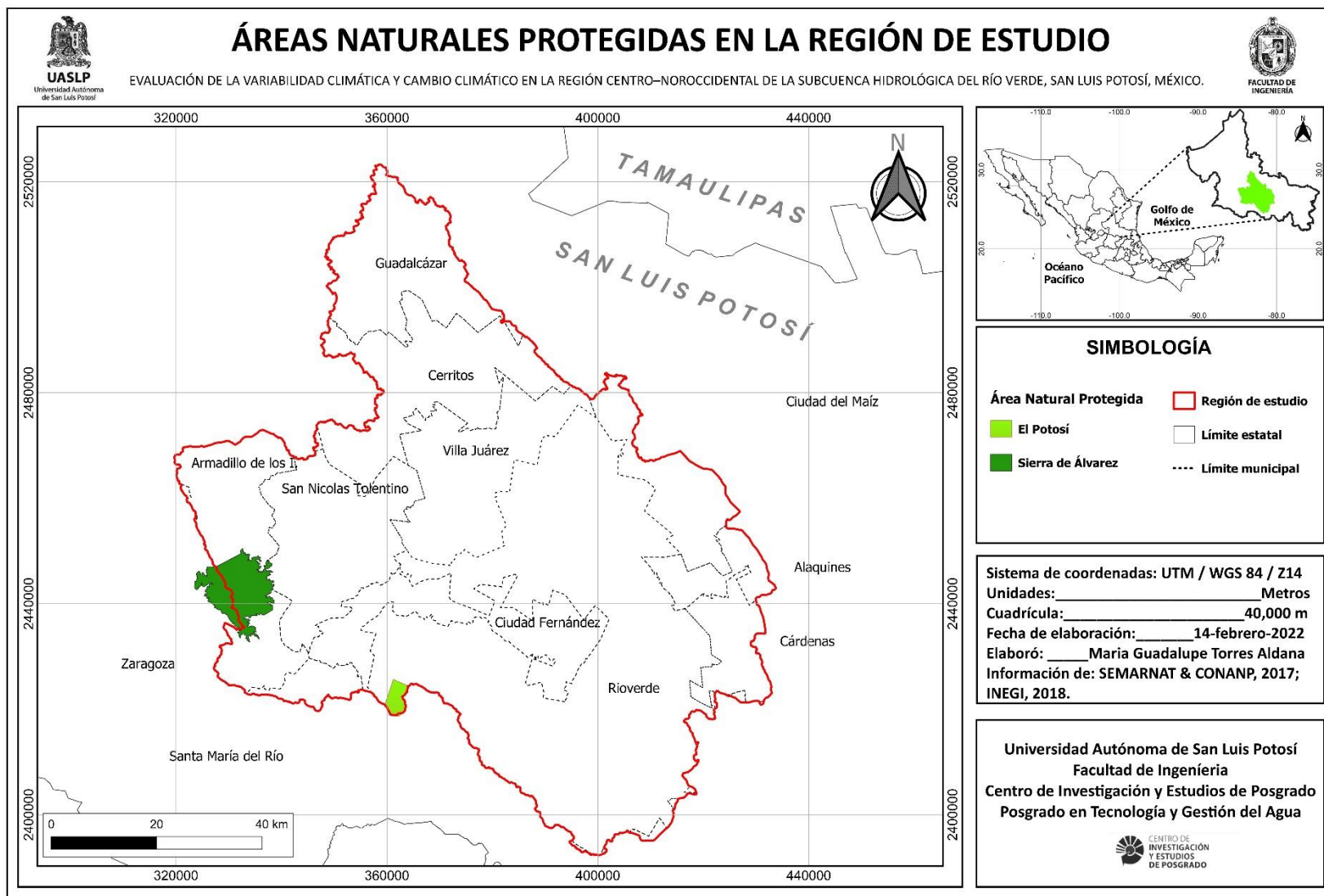


Figura 14. Áreas naturales protegidas en la región de estudio (Elaboración propia con base en SEMARNAT & CONANP, 2017; INEGI, 2018).

## 1. 9 Aspectos socioeconómicos

La región de estudio abarca 14 municipios en diversas proporciones, algunos de manera total o parcial; por tal motivo, la descripción socioeconómica se realizó con base en los 7 municipios que poseen su respectiva cabecera municipal en el interior de la subcuenca hidrológica del Río Verde, dichas localidades municipales son: Armadillo de los Infante, San Nicolás Tolentino, Cerritos, Villa Juárez, Rioverde, Ciudad Fernández y Guadalcázar.

### 1. 9. 1 Aspectos demográficos

En la región de estudio, se localiza la zona conurbada de Rioverde y Ciudad Fernández. De acuerdo con la Comisión Metropolitana y de Conurbación de Rioverde y Cd. Fernández (CMCRFC, 2021) dicha zona representa el 5.85% en extensión territorial con respecto al estado de San Luis Potosí, considerando los habitantes de ambos municipios alcanzan el cuarto lugar por la magnitud de la población. En el 2020, se reportó una población de 146 049 habitantes (97 943 Rioverde y 48 106 Cd. Fernández), el incremento de la población durante el periodo de 1990-2020 fue de 24 837 habitantes.

Por su parte, el resto de los municipios registraron una población de menor magnitud que la zona conurbada durante el año 2020. Según el Consejo Estatal de Población (COESPO, 2022), la cantidad de habitantes de los municipios anteriormente mencionados, sin considerar la zona conurbada se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Habitantes por municipio durante el 2020 (Elaboración propia con base en COESPO, 2022)

MUNICIPIO	HABITANTES	MUJERES	HOMBRES
		%	%
Guadalcázar	25 119	50.2	49.8
Cerritos	22 075	51.2	48.8
Villa Juárez	10 302	50.2	49.8
San Nicolás Tolentino	4 779	50.4	49.6
Armadillo de los Infante	4 013	50.2	49.8

### 1. 9. 2 Aspectos económicos

Según la CMCRCF (2021), durante el 2020, el porcentaje de la población económicamente activa (PEA), en la zona conurbada de Rioverde y Cd. Fernández fue de 60.90% del total de la población mayor de 12 años, es decir, 70 220 personas. Dicho porcentaje se ha incrementado en los últimos 20 años en la zona conurbada para el año 2000 la PEA correspondía a 39.36%, lo que representa un aumento de 21.57%; la PEA ocupada durante el 2020 en Rioverde y Cd. Fernández, se clasificó principalmente en 3 sectores: primario (agricultura, ganadería, silvicultura, caza o pesca), secundario (minería, generación y suministro de electricidad y agua, construcción o industria manufacturera) y terciario (comercio, transporte, servicios financieros, servicios profesionales, gobierno u otros) (Tabla 5).

Tabla 5. PEA por sector económico en la Zona Conurbada Rioverde-Cd. Fernández, 2020 (Elaboración propia con base en CMCRCF, 2021)

Sector Económico	Rioverde	Cd. Fernández
	PEA (%)	
Primario	13.80	22.81
Secundario	23.47	19.98
Terciario	62.21	56.79
Sin especificar	0.52	0.42

Como se logra apreciar, la PEA que se desempeñó en el sector primario es superior en el municipio de Cd. Fernández. Asimismo, en las localidades de Guadalcázar, Villa Juárez, San Nicolás Tolentino y Armadillo de los Infante el porcentaje de la PEA que se dedica a dicho sector, superan el 25%, según COESPO (2022). Respecto al sector secundario, en la Zona Conurbada, el municipio de Rioverde presenta un mayor porcentaje que Cd. Fernández. Por su parte, Armadillo de los Infante, San Nicolás Tolentino, Villa Juárez registraron porcentajes superiores al 30% de PEA en dicho sector, según datos de COESPO (2022). Evidentemente, el sector terciario se posiciona como el sector dominante en la Zona Conurbada con más del 50 % de PEA en ambos municipios. De igual forma, Cerritos, Guadalcázar y Villa Juárez destacan en el comercio y servicios superando el 30% de la población económica activa en dichas actividades del sector terciario (COESPO, 2022).

## **2. Evaluación de la variabilidad climática e índice de precipitación estandarizada.**

### **2.1 Introducción**

En la etapa inicial del presente estudio, se llevó a cabo la evaluación de la variabilidad climática en la región centro-noroccidental de la subcuenca hidrológica del Río Verde, San Luis Potosí, México. En esta fase se contemplaron 4 variables denominadas: precipitación total, temperatura media, temperatura máxima extrema y temperatura mínima extrema, (escalas mensual y anual) las series de tiempo analizadas aprobaron distintas pruebas de calidad y corresponden al periodo de 1980-2018. Inicialmente se aplicó un análisis de tendencias a través de la prueba estadística Mann-Kendall (MK) (Kendall, M. G., 1975; Mann, H. B., 1945) y se estimaron las magnitudes de cambio de las tendencias a través del método de Sen's Slope (Sen, 1968). Además, se analizó si dichas tendencias presentaron ruptura o punto de cambio en las series de tiempo mediante la prueba de Pettitt (1979). Asimismo, se estimó el índice de precipitación estandarizada (SPI, por sus siglas en inglés) a escala trimestral (SPI-3) y escala anual (SPI-12), posteriormente se aplicó la prueba de MK para detectar tendencias en dicho índice a diversas escalas temporales (anual, estación húmeda y seca).

### **2.2 Estaciones meteorológicas en la región de estudio**

En primer lugar, se identificaron las estaciones meteorológicas que se localizaban en el interior de la subcuenca, así como las estaciones aledañas al límite de la región de estudio, a través de la descarga del archivo KML, que contiene la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) donde se seleccionaron 36 estaciones con estatus "operando". Sin embargo, la disponibilidad de los registros difería de una estación a otra, por lo que se solicitaron los registros de las estaciones a la Comisión Nacional del Agua, a través de la dirección local del estado de San Luis Potosí, dicha información fue proporcionada en archivos de Microsoft Excel. Posteriormente, una vez que se analizó la información, se discriminaron estaciones con base en criterios de calidad y disponibilidad de datos por lo que se contemplaron 23 estaciones para la precipitación total y 20 estaciones para la temperatura media, máxima y mínima extrema.

### **2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia**

En la revisión de la calidad de los datos, se aplicaron dos pruebas; Helmert y Anderson (Campos-Aranda 1998; 2010), con el objetivo de verificar que las series de datos fueron homogéneas e independientes, lo anterior se realizó a través del programa de cómputo Microsoft Excel a los registros históricos de la variable de precipitación total anual de cada estación meteorológica.

### 2.3.1 Prueba de Helmert

De acuerdo con Campos-Aranda (1998) para determinar la homogeneidad de una muestra de datos de precipitación se aplica la prueba de Helmert, dicha prueba es muy sencilla y radica en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación es de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es establecida. Por lo contrario, si una desviación es seguida por otra de signo inverso, un cambio (C) será registrado. Cada año, a excepción del primero, precisarán una secuencia o un cambio. Si la serie es homogénea, la diferencia entre el número de secuencias (S) y el número de cambios (C) en el registro deberá ser cero, dentro de los límites de un error probable, el cual depende de la amplitud del registro (n), esto es:

$$S - C = 0 \pm \sqrt{n - 1} \text{ o bien: } S - C = \pm \sqrt{n - 1}$$

### 2.3.2 Prueba de Anderson

La independencia en las series en estudio denota que las mismas no poseen un patrón definido, tal como la presencia de gradientes o errores sistemáticos. La prueba de Anderson es ampliamente aplicada y recomendada para la estimación de la independencia en series temporales hidrológicas o meteorológicas (Fuentes-Montepeque, 2021). De acuerdo con Campos-Aranda (2010) la propiedad de independencia se verifica por medio de la persistencia, la cual se cuantifica con base en el coeficiente de correlación serial de orden  $k$ , el cual indica que tan fuertemente es afectado un evento por el anterior a él, el cual está desfasado o tiene un retraso  $k$ . El coeficiente de correlación serial de orden 1 ( $r_1$ ), se cuantifica para un registro o serie anual de máximos de tamaño  $n$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$r_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{Covarianza}}{\sqrt{Sx^2 \cdot Sy^2}}$$

Creando parejas  $x, y$  de un dato con el siguiente, posteriormente, ese con el que sigue y así sucesivamente; formando tantas parejas como  $n - 1$ .

La prueba de Anderson indica que cuando el valor calculado de  $r_1$  no excede al intervalo definido por lo límites o curvas de control ( $Lc$ ), no es estadísticamente diferente de cero y por lo tanto la persistencia no existe. La expresión de tales curvas es:

$$Lc = \frac{-1 \pm 1.964 \sqrt{(n-2)}}{(n-1)}$$

El signo que se utiliza en la ecuación anterior corresponde al de  $r_1$ , la condición de independencia en los datos de una serie hace válidos los resultados del análisis probabilístico o predicciones buscadas (Campos-Aranda, 2010). Inicialmente, el análisis se realizó a las treinta y seis estaciones específicamente a todos los registros históricos de la precipitación total anual (Tabla 6), sin embargo, algunas estaciones no cumplían con uno o ambos criterios de calidad, por lo que se aplicaron nuevamente las pruebas de Helmert y Anderson exclusivamente a los registros disponibles a partir de 1980 (Tabla 7).

Tabla 6. Pruebas de calidad en registros históricos de precipitación total anual (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

No.	CLAVE	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	PERIODO	PRUEBA HELMERT	PRUEBA ANDERSON
1	24050	Paredes	1960-2018	H	I
2	24193	San José Del Tapanco	1981-2017	H	I
3	24171	Huizachal	1980-2018	H	I
4	24097	Vigas	1961-2018	NH	I
5	24110	Ojo De Agua Seco	1961-2018	H	I
6	24172	Manantial Media Luna	1979-2018	H	I
7	24062	Rioverde OBS	1990-2017	NH	I
8	24114	Rioverde DGE	1961-2018	NH	I
9	24045	Nogal Oscuro	1965-2018	NH	I
10	24170	El Charco	1980-2018	NH	NI
11	24051	Paso De San Antonio	1944-2018	NH	I
12	24177	Santa Catarina	1979-2018	H	NI
13	24034	La Salitrera	1961-2018	NH	I
14	24004	Armadillo De Los Infante	1961-2018	H	I
15	24071	San Nicolás Tolentino	1961-2018	H	I
16	24052	Pastora	1962-2018	NH	I
17	24066	San Francisco	1961-2017	H	I
18	24195	Las Tablas	1982-2017	H	I
19	24130	Granjenal	1985-2018	H	I
20	24054	Pedro Montoya	1966-2018	H	I
21	24060	Rayón	1961-2018	NH	I
22	24006	Cárdenas	1929-2018	H	I
23	24173	Presa Álvaro Obregón	1936-2017	NH	I
24	24013	Colonia Álvaro Obregón	1961-2018	H	I
25	24159	La Morita	1977-2018	H	I
26	24190	La Libertad	1982-2018	NH	I
27	24168	Buenavista	1980-2018	H	I
28	24032	Guadalcázar	1962-2018	NH	NI
29	24008	Cerritos	1962-2017	H	I
30	24103	Villa Juárez	1962-2017	H	I
31	24197	El Terrero	1983-2017	NH	I

No.	CLAVE	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	PERIODO	PRUEBA HELMERT	PRUEBA ANDERSON
32	24153	Col. Benito Juárez	1993-2018	NH	I
33	24179	Xoconostle	1980-2018	H	I
34	24106	Zaragoza	1961-2018	H	I
35	24046	Ojo Caliente	1966-2018	NH	I
36	24067	San José Albuquerque	1961-2017	H	I

H: Estación homogénea, NH: Estación no homogénea, I: Estación Independiente y NI: Estación no independiente.

Tabla 7. Pruebas de calidad en registros de precipitación total anual a partir de 1980 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

No.	CLAVE	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	PERIODO	PRUEBA HELMERT	PRUEBA ANDERSON
1	24097	Vigas	1980-2018	H	I
2	24062	Rioverde OBS	1990-2017	NH	I
3	24114	Rioverde DGE	1980-2018	H	I
4	24045	Nogal Oscuro	1980-2018	NH	I
5	24170	El Charco	1980-2018	NH	NI
6	24051	Paso De San Antonio	1980-2018	NH	I
7	24177	Santa Catarina	1980-2018	H	NI
8	24034	La Salitrera	1980-2018	NH	I
9	24052	Pastora	1980-2018	H	I
10	24060	Rayón	1980-2018	H	I
11	24173	Presa Álvaro Obregón	1980-2017	H	I
12	24190	La Libertad	1982-2018	NH	I
13	24032	Guadalcázar	1980-2018	NH	NI
14	24197	El Terrero	1983-2017	NH	I
15	24153	Col. Benito Juárez	1993-2018	NH	I
16	24046	Ojo Caliente	1980-2018	NH	I

H: Estación homogénea, NH: Estación no homogénea, I: Estación Independiente y NI: Estación no independiente.

## 2.4 Análisis de disponibilidad de registros históricos

Una vez que resultaron 25 estaciones meteorológicas que cumplían con las dos pruebas de calidad, se verificó la disponibilidad de los registros históricos, es decir, se corroboró que contenían un porcentaje representativo de datos, por lo que se procedió a cuantificar que las estaciones no contuvieran un porcentaje superior al 20% de registros faltantes, así como no contener más de tres años consecutivos sin registros en cada una de las 4 variables de estudio (Tabla 8).



Tabla 8. Disponibilidad de registros en estaciones meteorológicas de calidad (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

No.	CLAVE	ESTACIÓN METEOROLÓGICA	PERIODO	DATOS FALTANTES (%)				AÑOS CONSECUTIVOS SIN REGISTRO (>3)			
				P	TMED	TMAX	TMIN	P	TMED	TMÁX	TMÍN
1	24050	Paredes	1960-2018	11.2	10.3	10.3	10.5				
2	24193	San José Del Tapanco	1981-2017	5.7	5.5	5.5	5.5				
3	24171	Huizachal	1980-2018	6.6	9.7	9.7	10.5				
4	24097	Vigas	1961-2018	15.8	16.7	16.2	16.4				
5	24110	Ojo De Agua Seco	1961-2018	16.9	16.7	16.7	16.5	X	X	X	X
6	24172	Manantial Media Luna	1979-2018	2.6	2.4	2.4	2.9				
7	24114	Rioverde DGE	1961-2018	1.5	1.5	1.8	1.8				
8	24004	Armadillo De Los Infante	1961-2018	1.8	5.0	4.8	5.0				
9	24071	San Nicolás Tolentino	1961-2018	4.2	4.0	3.7	4.0				
10	24052	Pastora	1962-2018	4.2	4.6	4.4	4.4				
11	24066	San Francisco	1961-2017	7.2	26.1	25.9	27.0		X	X	X
12	24195	Las Tablas	1982-2017	14.5	11.6	13.6	11.4				
13	24130	Granjenal	1985-2018	36.0	31.1	32.9	34.9	X	X	X	X
14	24054	Pedro Montoya	1966-2018	10.1	12.1	12.1	12.1				
15	24060	Rayón	1961-2018	6.6	7.0	7.0	7.0				
16	24006	Cárdenas	1929-2018	3.3	3.5	3.5	3.5				
17	24173	Presa Álvaro Obregón	1936-2017	13.6	10.5	10.5	13.8				
18	24013	Colonia Álvaro Obregón	1961-2018	8.3	8.6	8.3	8.8				
19	24159	La Morita	1977-2018	10.8	40.4	40.4	41.0		X	X	X
20	24168	Buenvista	1980-2018	9.9	9.9	9.9	9.9				
21	24008	Cerritos	1962-2017	1.3	5.5	5.5	4.8				
22	24103	Villa Juárez	1962-2017	3.3	8.8	8.8	8.8				
23	24179	Xoconostle	1980-2018	5.5	17.5	17.5	17.6		X	X	X
24	24106	Zaragoza	1961-2018	3.3	5.7	5.7	5.7				
25	24067	San José Albuquerque	1961-2017	7.9	8.1	7.7	8.6				

Precipitación total mensual, TMED: Temperatura media mensual, TMAX: Temperatura máxima mensual, TMIN: Temperatura mínima mensual.

## 2.5 Estimación de datos faltantes

En el 2017, según la World Meteorological Organization (WMO, por sus siglas en inglés), estableció que las series temporales climáticas deben contener un mínimo de 30 años de registros, mismos que deben garantizar su continuidad temporal sin ausencia de información. Dado lo anterior y en vista de los conflictos que surgen en los vastos años de registros de una estación, es posible que las series de tiempo presenten datos faltantes, los cuales deben ser estimados para los posteriores análisis que se realicen sobre las series consideradas. Las series de datos hidrometeorológicas presentan datos faltantes o erróneos por falta de continuidad en los registros o errores instrumentales, surgiendo la necesidad de desarrollar métodos para calcular estimaciones aproximadas al valor real, y de esta manera contribuir en una mejor consistencia de los análisis (Cruz-Roa & Barrios, 2018). Por lo anterior, se estimaron datos faltantes de la variable de precipitación total mensual a través del método racional deductivo y asimismo algunos datos faltantes se estimaron mediante el método del promedio aritmético de estaciones adyacentes, los métodos se aplicaron a través de Microsoft Excel.

### 2.5.1 Método racional deductivo

De acuerdo con Campos-Aranda, (1998) el método permite estimar registros mensuales faltantes (máximo once), basándose en los registros de los años completos, la técnica acepta la hipótesis que considera que los meses desconocidos tendrían un porcentaje igual al porcentaje promedio, se designan las siguientes variables:

$i$  = cada uno de los meses desconocidos.

$P_i$  = precipitación mensual desconocida en cada año incompleto (mm).

$\sum S_i$  = suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce, en porcentaje.

$\sum P$  = suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos en milímetros.

$S_i$  = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses faltantes

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i}$$

Por lo cual:

$$P_i = \left( \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

La expresión entre paréntesis es un valor constante para cada año incompleto, por lo que finalmente se tiene:

$$P_i = K * S_i$$

En la Tabla 9, se presenta un ejemplo de los registros completos de la precipitación total a través del método racional deductivo, correspondientes a la estación meteorológica “Rioverde DGE”.

Tabla 9. Registros completos de precipitación total en la estación meteorológica “24114” (Elaboración propia con base a CONAGUA, 2021).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	25.9	12.0	1.6	7.5	70.0	3.9	6.7	15.5	127.4	21.8	1.8	16.7
1981	44.7	6.4	8.1	146.6	110.3	179.4	83.9	54.7	92.3	23.7	0.2	15.7
1982	1.0	11.6	26.6	123.9	57.7	0.0	22.7	26.7	57.4	73.8	19.8	31.0
1983	20.2	2.1	1.5	0.1	46.7	13.5	133.4	22.5	69.4	21.4	23.0	0.1
1984	31.9	21.0	0.3	0.0	56.6	48.9	139.0	78.9	157.7	2.1	2.8	15.9
1985	3.4	1.9	1.1	172.4	34.6	116.1	243.1	44.4	39.8	2.8	33.5	7.0
1986	0.0	0.3	0.0	133.7	23.6	49.0	86.0	10.1	35.4	81.0	44.6	14.9
1987	7.1	2.5	3.8	16.8	35.2	67.1	186.7	10.0	44.5	8.2	9.9	0.4
1988	5.1	0.6	26.0	28.1	53.9	62.4	65.5	165.8	39.7	9.5	0.1	2.0
1989	3.2	6.0	0.0	49.3	4.0	96.3	23.9	137.9	76.7	55.4	15.0	8.6
1990	10.3	13.1	2.4	1.0	39.2	28.3	21.3	176.9	119.1	84.0	12.0	0.0
1991	1.8	8.5	3.3	0.6	35.7	131.9	246.0	28.1	156.5	67.5	2.8	19.9
1992	65.2	6.5	5.7	82.0	83.3	16.3	74.1	64.9	50.3	95.1	9.0	13.2
1993	3.5	3.6	0.1	10.3	83.1	195.5	57.2	76.6	296.3	44.5	20.7	0.7
1994	16.4	1.4	3.2	67.4	26.0	61.5	8.5	74.0	85.3	73.0	5.5	1.3
1995	6.7	1.3	0.3	0.6	10.4	15.0	28.0	159.8	36.3	38.0	16.5	13.5
1996	1.6	1.3	1.4	4.3	2.8	93.9	81.2	50.8	86.3	44.2	11.4	1.1
1997	7.8	13.7	52.2	84.6	127.9	26.3	20.0	26.4	12.8	89.6	13.7	0.7
1998	19.0	0.0	2.1	0.0	1.3	12.0	25.6	84.0	256.8	136.4	14.9	0.0
1999	0.0	0.2	18.8	3.5	39.2	44.4	136.4	40.3	97.9	1.0	7.4	2.2
2000	7.8	0.1	3.8	5.4	28.0	106.4	1.4	67.3	38.8	63.6	5.9	10.4
2001	12.1	9.8	1.4	18.5	24.9	72.5	107.6	83.3	141.6	37.2	59.7	1.8
2002	20.2	27.2	8.3	1.8	12.3	96.5	13.5	17.7	121.6	43.9	16.0	2.8
2003	11.4	0.0	0.0	19.5	10.0	33.6	79.1	31.6	54.1	92.1	5.6	5.7
2004	27.1	1.2	23.4	14.8	22.4	139.2	72.0	38.7	69.2	43.9	6.3	14.0
2005	7.7	29.0	29.9	0.0	22.7	15.3	153.8	29.7	37.3	76.6	2.5	0.7
2006	9.1	0.0	4.6	3.7	52.8	11.9	53.9	107.9	66.5	39.3	48.8	38.8
2007	3.2	49.3	11.1	37.4	58.3	102.3	119.8	180.4	67.6	24.8	32.5	0.0
2008	3.1	4.6	1.7	1.5	21.3	112.0	157.5	164.2	150.0	59.0	11.7	12.7
2009	6.7	0.6	3.1	0.0	62.3	77.8	17.1	37.9	82.2	145.7	9.4	21.3
2010	60.3	85.5	0.0	75.1	53.3	85.7	377.8	28.7	214.8	15.5	0.0	0.0
2011	6.7	0.7	9.2	1.0	1.0	150.8	235.5	19.0	76.8	12.9	4.5	0.9
2012	24.8	85.1	7.9	8.2	6.4	57.3	46.6	39.6	41.1	7.6	21.2	0.4
2013	19.3	0.2	0.5	0.0	15.1	69.4	7.8	151.9	242.7	26.4	76.9	64.2
2014	12.2	0.0	16.2	2.7	50.7	80.8	106.3	73.5	201.8	53.2	18.4	11.7
2015	7.5	6.7	119.6	6.0	26.7	78.0	111.3	79.3	58.1	80.6	17.8	2.4
2016	2.9	4.8	17.1	42.2	78.6	123.0	77.7	132.5	62.7	38.1	72.0	9.7
2017	0.0	1.3	14.9	23.6	15.5	23.9	88.2	99.4	82.1	156.8	0.6	4.2
2018	2.1	12.5	0.8	11.7	60.6	90.8	3.2	13.5	135.5	63.5	22.2	0.5

**Nota:** Los registros en color verde son datos estimados con el método racional deductivo.

## 2.5.2 Método del promedio aritmético

La metodología del promedio aritmético empleada para estimar datos faltantes representa una técnica muy aplicada para completar series de datos, basándose en estaciones adyacentes (Bastidas *et al.*, 2020). Según, Shabalala *et al.* (2019), el método del promedio aritmético consiste en obtener los datos faltantes promediando aritméticamente los datos de las estaciones vecinas para el mismo período considerado, la técnica utiliza la ecuación que se muestra a continuación.

$$Px = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} Pi$$

$Px$ = Valor estimado

$Pi$ = Valor observado de las estaciones vecinas

$n$ = Número de las estaciones vecinas

Dicho método se aplicó con los registros disponibles de las estaciones adyacentes, con el objetivo de estimar los datos faltantes de la temperatura media, temperatura máxima y mínima extrema, además en algunos datos faltantes de precipitación total, cuando el método racional deductivo no era aplicable. Se presenta ejemplo de datos estimados para las temperaturas máximas en el mes de abril (Tabla 10).

Tabla 10. Ejemplo de registros completos de temperatura máxima en el mes de abril 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

AÑO	24172	24171	24052	24114	24071	24173
1980	40.0	40.0	39.5	38.8	38.0	29.0
1981	38.0	39.0	37.5	37.6	38.0	36.5
1982	41.0	41.0	39.5	41.0	40.3	41.0
1983	42.5	38.5	39.5	40.8	40.0	41.0
1984	43.0	43.5	38.0	41.0	40.0	41.0
1985	37.5	37.0	38.5	37.0	36.0	36.5
1986	41.0	43.5	38.5	39.8	36.0	39.5
1987	39.0	39.5	38.0	37.1	30.8	36.5
1988	41.5	40.5	36.5	39.3	35.0	39.0
1989	39.0	39.5	39.5	36.9	34.0	36.0
1990	40.0	39.0	38.0	39.8	37.0	39.5
1991	44.0	48.0	42.0	41.2	37.0	41.5
1992	40.0	38.0	38.0	37.0	33.5	35.5
1993	40.5	39.0	38.6	38.2	34.0	37.0
1994	41.0	45.0	39.5	38.2	36.0	38.0

AÑO	24172	24171	24052	24114	24071	24173
1995	43.0	42.0	30.0	39.5	38.0	39.0
1996	41.5	34.0	30.0	38.8	36.0	39.0
1997	40.0	36.0	40.0	37.8	32.0	37.0
1998	46.0	45.0	43.2	43.1	38.0	42.5
1999	43.0	43.0	45.0	40.7	37.0	40.0
2000	44.0	45.0	45.0	42.2	36.0	41.5
2001	42.0	39.0	41.0	39.6	37.0	38.5
2002	41.0	41.0	40.0	39.5	37.0	38.0
2003	42.0	42.0	43.0	39.5	37.0	39.0
2004	40.0	41.0	36.0	38.5	35.0	38.0
2005	43.0	41.0	40.0	41.2	37.0	39.0
2006	42.0	39.0	40.0	41.0	37.0	39.0
2007	40.0	40.0	40.0	39.8	35.0	37.0
2008	41.0	42.0	42.0	41.0	37.0	39.0
2009	41.0	36.0	42.0	41.0	35.0	41.0
2010	41.0	36.0	38.0	38.6	34.0	39.0
2011	44.0	37.0	44.0	43.0	37.0	41.0
2012	39.0	39.0	39.0	39.0	34.0	36.0
2013	44.0	43.0	41.0	44.0	38.0	42.0
2014	41.0	39.0	41.0	42.0	36.0	38.0
2015	37.0	37.0	38.0	39.5	33.0	36.0
2016	39.0	40.0	37.0	41.0	36.0	37.0
2017	42.0	39.0	42.0	41.4	34.0	40.0
2018	39.0	41.0	41.0	39.5	36.0	38.0

**Nota:** Los registros en color rojo son datos estimados a través de promedio aritmético

## 2.6 Estimación de valores medios

El valor medio de una variable hidrológica en una zona de estudio representa el valor medio repartido de forma uniforme en toda el área (Aragón-Hernández *et al.*, 2019). La estimación de los valores medios de las 4 variables de estudio del periodo 1980-2018, se llevó a cabo mediante el método de isoyetas. Dicho método requiere las áreas entre cada una de las isoyetas distribuidas en la región de estudio, por lo que se utilizó el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arcgis 10.8, donde se ingresaron los datos de cada una de las estaciones de las 4 variables en archivos de tipo CSV. Posteriormente, se realizó la interpolación mediante el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), a través de “ArcToolbox - Spatial Analyst Tools-Interpolation-IDW”, donde se ingresó cada archivo CSV, y se definió la configuración de Environment; específicamente en la sección “Processing Extend” se añadió el polígono de la región de estudio en formato Shapefile (SHP), asimismo en la sección “Raster Analysis – Mask” se agregó el archivo SHP de la región de estudio. El archivo de salida era de tipo ráster, por lo que se debían extraer las isoyetas en formato

vectorial; en dicho proceso se utilizó la herramienta “Surface- Contour”, se ingresó el ráster y se definió el intervalo. En las variables de temperatura se consideró un intervalo de 1 °C y, respecto a la precipitación, el intervalo se definió en función del mes para el que se estimaba el cálculo, generando así un archivo SHP con las líneas de las isoyetas, sin embargo, se realizó la unión de las isoyetas e isolíneas con el polígono de la región de estudio en archivo SHP de tipo líneas, mediante la herramienta “Extend Tool”; posteriormente, se convirtió en polígonos para estimar las áreas entre cada isoyeta e isolíneas, dicho proceso se logró a través de “ArcToolbox-Data Management Tools-Features- Feature to Polygon”, como se muestra en la Figura 15.

Posteriormente, se calcularon las áreas de los polígonos, y finalmente se añadieron a una plantilla de Microsoft Excel que consideró lo descrito a continuación. De acuerdo con Velásquez *et al.*, (2019) el método de las isoyetas se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$Pm = \frac{\sum Pi \times Ai}{\sum Ai}$$

Donde:

$Pm$  = Precipitación media

$Pi$  = Precipitación observada

$Ai$  = Área de isoyetas

## 2.7 Análisis de tendencias

El análisis estadístico de tendencias se realizó aplicando el método de Mann-Kendall, a los datos mensuales y anuales de las 4 variables de estudio, correspondientes a cada una de las estaciones meteorológicas y a la región de estudio mediante los valores de las isoyetas. El análisis de tendencias se llevó a cabo a través de una plantilla de Microsoft Excel denominada “MAKENSES” disponible en FMI (2002) con base en los criterios de su respectivo manual de usuario (Salmi *et al.*, 2002).

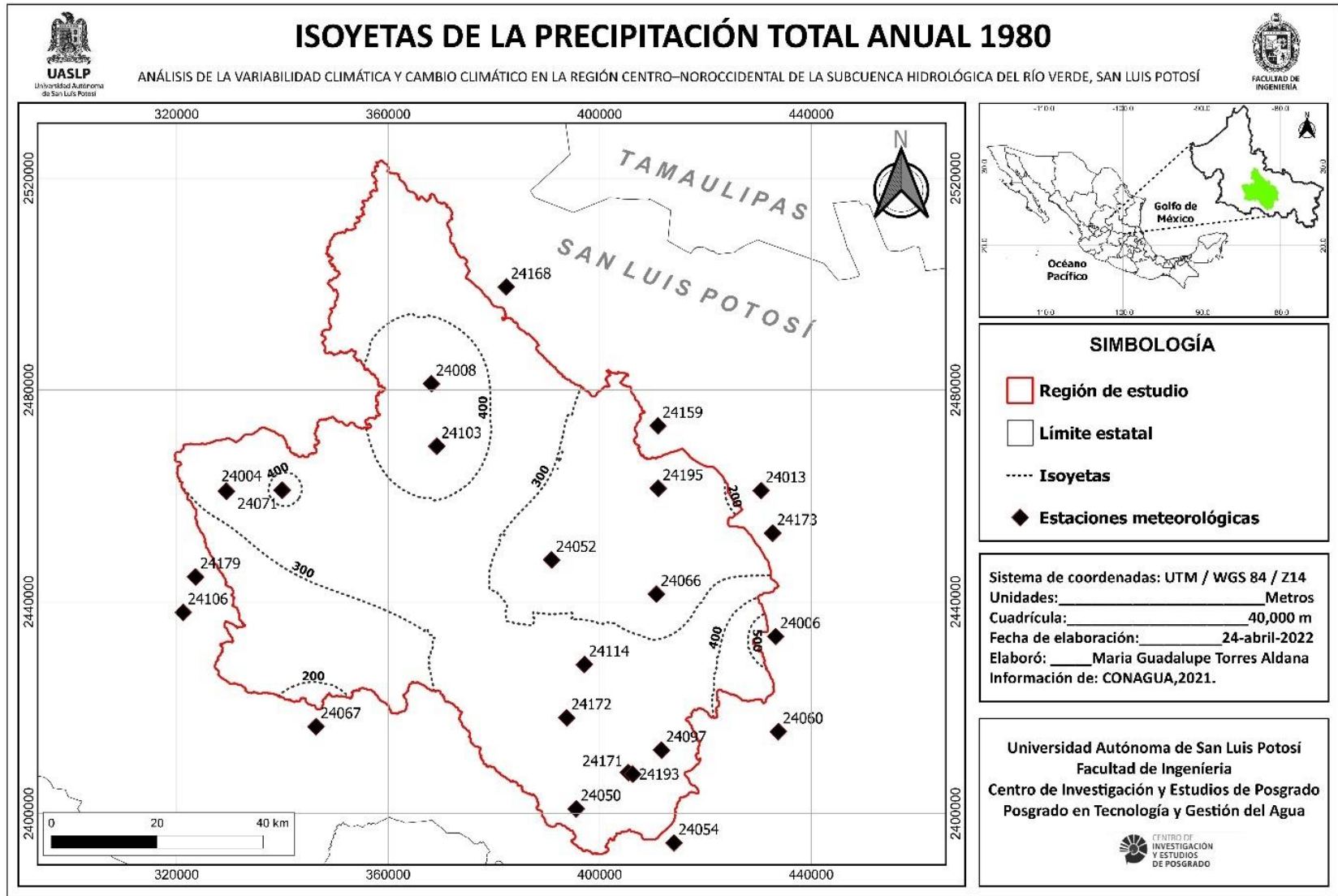


Figura 15. Isoyetas de la precipitación total anual 1980 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

### 2.7.1 Prueba Mann-Kendall

Según, Alencar Da Silva & Nóbrega (2017) entre las técnicas existentes para realizar análisis de tendencias la metodología propuesta por Mann y Kendall es la sugerida por la Organización Meteorológica Mundial. La prueba de Mann-Kendall se emplea comúnmente para detectar tendencias monótonas en serie de datos ambientales, climáticos e hidrológicos; es una prueba estadística ampliamente aplicada en el análisis de tendencias en climatología y en series temporales hidrológicas (Alhaji *et al.*, 2018).

En una serie temporal  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , Mann (1945) plantea que para que la hipótesis nula “ $H_0$ ” sea la verdadera los datos que componen la serie temporal deben ser variables aleatorias, independientes e igualmente distribuidas. Para que la hipótesis alternativa “ $H_1$ ” sea la verdadera los datos de la serie temporal deben seguir una tendencia monoatómica.

La siguiente ecuación representa la estadística de la prueba de Mann-Kendall (Alencar Da Silva & Nóbrega, 2017):

$$S = \sum_{k=1}^{n_1-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

Donde:

$$\text{sgn} | (x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

$X_j$  representa los datos estimados de la secuencia de valores,  $n$  representa la longitud de la serie temporal. Reciben valor cero (0) si  $(X_j - X_k) = 0$ ; y [-1] si  $(X_j - X_k) > 0$ , por fin, [1] si  $(X_j - X_k) < 0$ . Supone que  $H_0$  sea verdadera,  $S$  debe presentar una distribución aproximadamente normal con media cero y variancia  $\text{Var}(S) = [(n*(n-1) *(2*n+5)]/18$ . El valor de  $S$  indica la posible existencia de tendencias, desde que el valor de  $S$  sea significativamente diferente de cero. Siendo  $S$  diferente de cero, la hipótesis nula  $H_0$  puede ser rechazada, y la hipótesis alternativa  $H_1$  sería aceptada (Mann, 1945). El valor estadístico de la prueba es representado por  $Z$ , y se expresa con la siguiente ecuación:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{(\text{Var}(s))^{1/2}} & \text{Si } S > 0 \\ 0 & \text{Si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{(\text{Var}(s))^{1/2}} & \text{Si } S < 0 \end{cases}$$



La determinación de una tendencia estadísticamente significativa es evaluada por el valor de  $Z$ , un valor positivo de  $Z$  indica tendencia al incremento y el valor negativo muestra un decremento en la tendencia. El valor  $Z$  es el parámetro de salida de la prueba Mann-Kendall. Para probar cualesquier tendencia, creciente o decreciente, para un nivel de significancia  $\alpha$ , se rechaza la hipótesis nula cuando el valor absoluto de  $Z$  sea mayor que  $Z_{1 - \alpha/2}$  (Alencar Da Silva-Alves *et al.*, 2017). En el presente análisis se consideró un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . ahora bien, cuando el valor absoluto de  $Z$  es igual que 0 la hipótesis nula al nivel de 5% será aceptada, sin tendencia. Siendo el resultado de  $Z$  igual o mayor que 1.96 representa valor positivo, lo que indica existencia de tendencia significativa creciente; sí el valor de  $Z$  es igual o menor que -1.96 indica valor negativo y representa una tendencia significativa decreciente (Alves *et al.*, 2015).

## 2.8 Estimación de la magnitud de cambio

La estimación de la magnitud de cambio de las tendencias se realizó mediante el método de Sen's slope, los cálculos se obtuvieron de manera simultánea que el análisis de tendencias empleando la plantilla MAKENSES disponible en FMI (2002).

El método desarrollado por Sen (1968), permite determinar la magnitud de la tendencia lineal, la pendiente se estima para  $N$  pares de puntos de datos,  $Q$ , como:

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \text{ para } i = 1, \dots, N$$

Donde  $X_j$  y  $X_k$  son los valores de los datos en el tiempo  $j$  y  $k$ , respectivamente; con  $j > k$  la pendiente mediana entre todos los pares de datos de las estimaciones de la pendiente  $Q$  es la pendiente lineal de Sen.

Puesto que el análisis de Mann-Kendall y la estimación de la magnitud de cambio se realizaron en conjunto, a continuación, se presentan las Tablas 11, 12, 13 y 14 mismas que muestran los resultados de las magnitudes de cambio en las tendencias significativas en las 4 variables de estudio.

Tabla 11. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		mm·mes <sup>-1</sup>												mm·año <sup>-1</sup>
Las Tablas	24195	-0.21	<b>-0.17</b>	0.00	0.00	-0.55	0.23	-0.95	0.02	-0.60	0.03	-0.10	0.00	-1.33
Vigas	24097	0.08	<b>-0.10</b>	<b>0.10</b>	-0.05	<b>-1.05</b>	0.75	-0.23	0.92	-0.38	0.80	0.24	-0.04	1.32
Paredes	24050	0.00	0.02	0.08	-0.11	-0.33	1.59	0.75	1.12	1.52	<b>1.74</b>	0.15	-0.05	<b>6.40</b>
San José Del Tapanco	24193	0.00	-0.05	<b>0.02</b>	-0.16	-0.50	1.00	-0.06	0.63	0.42	<b>1.27</b>	0.22	0.00	2.98
Manantial Media Luna	24172	-0.18	0.00	0.05	-0.18	<b>-0.98</b>	0.83	-0.43	1.00	0.64	0.82	0.25	-0.06	1.71
Huizachal	24171	-0.02	0.00	0.00	-0.05	-0.70	0.58	-0.01	0.29	0.61	0.94	0.00	<b>-0.15</b>	-0.38
Rioverde DGE	24114	-0.04	-0.03	0.12	-0.28	-0.63	0.95	-0.09	0.57	0.61	0.65	0.22	-0.07	1.74
Pastora	24052	-0.05	0.00	0.00	-0.13	-0.01	0.58	-0.86	0.32	0.04	-0.08	0.07	<b>-0.17</b>	-0.09
San Nicolás Tolentino	24071	0.00	0.00	<b>0.08</b>	-0.14	-0.59	<b>1.61</b>	-1.56	0.06	1.11	0.44	0.33	0.00	-0.53
Presa Álvaro Obregón	24173	0.00	0.00	0.14	-0.17	<b>-0.51</b>	0.31	-0.30	0.46	-0.33	0.25	0.19	-0.01	0.31
Cerritos	24008	-0.21	-0.03	0.04	-0.96	-0.89	1.04	0.00	0.28	<b>2.58</b>	-0.17	0.08	-0.19	0.20
Cárdenas	24006	-0.06	-0.05	0.00	-0.05	<b>-0.68</b>	0.79	-0.38	0.87	0.12	0.52	0.20	<b>-0.13</b>	0.76
Pedro Montoya	24054	0.01	-0.03	<b>0.11</b>	0.00	-0.22	1.29	-0.05	0.81	0.60	<b>1.60</b>	0.24	-0.01	4.25
Rayón	24060	-0.02	-0.03	0.00	0.00	<b>-0.54</b>	0.61	-0.41	0.42	-0.20	0.97	0.21	-0.07	0.38
Buenvista	24168	0.01	-0.05	0.00	0.00	0.26	<b>1.74</b>	-0.42	<b>1.72</b>	<b>1.24</b>	0.37	0.05	-0.09	<b>8.00</b>
Villa Juárez	24103	-0.06	-0.03	0.06	-0.48	-0.45	0.07	-0.85	0.38	1.34	-0.06	0.25	-0.14	-1.61
San José Albuquerque	24067	0.00	0.00	0.00	-0.20	-0.75	0.64	-0.17	0.81	<b>1.36</b>	0.18	0.00	0.00	1.52
Colonia Álvaro Obregón	24013	0.00	0.00	0.00	-0.17	0.10	<b>1.00</b>	0.23	0.69	0.68	0.33	0.14	0.00	<b>5.53</b>
Armadillo De Los Infante	24004	0.00	-0.11	<b>0.29</b>	-0.18	-0.50	0.42	-0.91	0.50	<b>1.18</b>	0.11	0.11	-0.17	0.69
Zaragoza	24106	0.00	0.00	0.00	-0.19	-0.19	0.60	-0.09	0.61	<b>1.14</b>	0.00	0.00	0.00	2.76
Xoconostle	24179	0.06	0.00	0.00	-0.23	-0.11	0.74	-0.21	0.42	<b>1.35</b>	0.34	0.17	0.00	2.42
San Francisco	24066	-0.07	0.00	0.00	0.00	<b>-0.62</b>	0.35	-0.01	0.11	-0.50	-0.16	0.00	0.00	-1.29
La Morita	24159	0.00	0.00	<b>0.01</b>	0.00	0.00	0.76	0.00	0.53	0.61	0.14	<b>0.25</b>	0.00	3.17
Región De Estudio	---	-0.04	-0.12	0.06	-0.32	-0.38	0.81	-0.17	0.43	0.62	0.17	0.07	-0.13	1.01

Nota: Las tendencias con significancia estadística  $\alpha = 0.05$ , se presentan en negrita.

Tabla 12. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		°c/mes												°c/año
Las Tablas	24195	0.02	0.02	0.02	-0.01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	0.01	-0.02	0.03	0.00
Vigas	24097	0.00	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	-0.01	<b>-0.05</b>	0.01	0.00
Paredes	24050	-0.02	0.00	-0.04	-0.01	-0.02	-0.04	-0.05	-0.03	-0.05	-0.06	<b>-0.08</b>	-0.06	-0.04
San José Del Tapanco	24193	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	0.02	-0.03	0.04	<b>0.02</b>
Manantial Media Luna	24172	<b>-0.06</b>	0.00	-0.03	-0.02	-0.03	-0.04	-0.02	<b>-0.03</b>	-0.03	<b>-0.03</b>	<b>-0.08</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.04</b>
Huizachal	24171	0.01	0.06	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	-0.04	-0.02	0.00
Rioverde (DGE)	24114	0.01	<b>0.06</b>	0.03	<b>0.04</b>	0.03	0.02	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	<b>0.03</b>	0.00	0.03	<b>0.03</b>
Pastora	24052	0.01	<b>0.07</b>	0.03	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.09</b>	0.04	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>
San Nicolás Tolentino	24071	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	<b>0.03</b>	0.02	0.03	0.00	0.04	<b>0.01</b>
Presa Álvaro Obregón	24173	0.00	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	<b>0.03</b>	0.01	-0.01	0.01	0.01
Cerritos	24008	0.04	<b>0.10</b>	<b>0.13</b>	<b>0.13</b>	<b>0.10</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	0.01	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>
Cárdenas	24006	0.03	<b>0.05</b>	0.02	<b>0.04</b>	0.03	0.03	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	0.02	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>
Pedro Montoya	24054	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	0.03	-0.01	0.02	<b>0.03</b>
Rayón	24060	-0.01	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.01
Buenavista	24168	-0.04	-0.02	-0.04	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	-0.01	-0.01	<b>-0.07</b>	<b>-0.07</b>	-0.01
Villa Juárez	24103	0.02	0.06	0.07	0.08	<b>0.08</b>	0.06	0.03	0.07	0.07	0.07	0.03	0.05	0.06
San José Albuquerque	24067	0.04	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.04</b>	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	0.01	0.01	<b>0.05</b>
Colonia Álvaro Obregón	24013	-0.03	-0.02	-0.03	<b>-0.07</b>	-0.01	-0.03	-0.03	<b>-0.05</b>	-0.01	-0.04	<b>-0.07</b>	-0.02	<b>-0.04</b>
Armadillo De Los Infante	24004	-0.01	0.04	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00
Zaragoza	24106	<b>0.05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>
Región De Estudio	---	0.00	<b>0.04</b>	0.03	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	0.02	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	0.00	0.02	<b>0.03</b>

Nota: Las tendencias con significancia estadística  $\alpha = 0.05$ , se presentan en negrita.

Tabla 13. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura máxima extrema 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		°C/mes												°C/año
Las Tablas	24195	0.07	<b>0.10</b>	0.01	0.02	0.00	0.00	<b>0.06</b>	0.05	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>	0.03	<b>0.07</b>	<b>0.04</b>
Vigas	24097	0.04	0.04	0.02	0.00	0.03	0.02	0.06	<b>0.05</b>	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.02
Paredes	24050	0.03	0.05	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03
San José Del Tapanco	24193	0.00	0.03	0.03	-0.04	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	-0.02
Manantial Media Luna	24172	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	<b>-0.09</b>	<b>-0.08</b>	-0.01
Huizachal	24171	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.08	0.03	<b>0.10</b>	<b>0.08</b>	0.00	0.03	-0.08	-0.03	0.03
Rioverde DGE	24114	<b>0.05</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	-0.01	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	0.03	<b>0.05</b>	0.02	<b>0.06</b>	<b>0.05</b>
Pastora	24052	<b>0.10</b>	0.07	0.00	<b>0.06</b>	0.03	0.00	0.04	0.05	0.00	<b>0.09</b>	0.05	<b>0.13</b>	<b>0.06</b>
San Nicolás Tolentino	24071	0.00	0.00	<b>-0.08</b>	-0.05	-0.04	-0.06	-0.04	0.00	0.00	-0.02	-0.05	0.00	<b>-0.04</b>
Presa Álvaro Obregón	24173	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	<b>-0.06</b>	0.00	0.00	<b>-0.05</b>	0.00	-0.03	0.00	-0.01
Cerritos	24008	<b>0.09</b>	<b>0.16</b>	<b>0.21</b>	<b>0.17</b>	<b>0.17</b>	<b>0.13</b>	<b>0.15</b>	<b>0.17</b>	<b>0.09</b>	<b>0.10</b>	0.00	0.03	<b>0.13</b>
Cárdenas	24006	<b>0.05</b>	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.11</b>	0.00	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>
Pedro Montoya	24054	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	0.06	0.07	0.00	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	0.04	0.05	0.00	0.02	<b>0.05</b>
Rayón	24060	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	<b>0.07</b>	0.00	0.00	-0.03	0.00	-0.01
Buenavista	24168	0.00	0.04	0.06	<b>0.10</b>	0.07	0.00	0.03	<b>0.06</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Villa Juárez	24103	0.00	0.07	0.06	<b>0.12</b>	<b>0.18</b>	<b>0.13</b>	<b>0.17</b>	<b>0.20</b>	<b>0.15</b>	<b>0.11</b>	0.02	0.02	<b>0.11</b>
San José Albuquerque	24067	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>	<b>0.16</b>	<b>0.10</b>	<b>0.14</b>	<b>0.13</b>	<b>0.12</b>	<b>0.06</b>	0.00	0.00	<b>0.04</b>	<b>0.10</b>
Colonia Álvaro Obregón	24013	0.04	0.09	0.02	0.00	0.03	-0.04	-0.05	-0.03	0.00	-0.03	-0.04	0.01	0.00
Armadillo De Los Infante	24004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	<b>0.04</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zaragoza	24106	<b>0.05</b>	<b>0.09</b>	<b>0.05</b>	0.04	0.06	0.00	0.05	<b>0.07</b>	0.00	0.04	0.00	0.04	<b>0.04</b>
Región De Estudio	---	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	0.033	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	0.005	0.029	<b>0.05</b>

**Nota:** Las tendencias con significancia estadística  $\alpha = 0.05$ , se presentan en negrita.

Tabla 14. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura mínima extrema 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		°c/mes												°c/año
Las Tablas	24195	<b>-0.13</b>	-0.08	-0.06	<b>-0.13</b>	<b>-0.14</b>	-0.07	<b>-0.10</b>	<b>-0.11</b>	0.02	0.00	-0.11	-0.09	<b>-0.07</b>
Vigas	24097	0.01	-0.02	0.02	-0.06	<b>-0.07</b>	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	-0.05	0.08	0.01
Paredes	24050	-0.03	-0.06	-0.08	-0.07	<b>-0.11</b>	<b>-0.10</b>	<b>-0.11</b>	<b>-0.09</b>	-0.07	-0.08	0.00	<b>-0.09</b>	<b>-0.08</b>
San José Del Tapanco	24193	0.05	0.03	<b>0.12</b>	0.04	0.00	<b>0.07</b>	<b>0.05</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	0.09	0.00	<b>0.10</b>	<b>0.07</b>
Manantial Media Luna	24172	-0.03	-0.03	0.00	-0.06	<b>-0.09</b>	<b>-0.06</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.05</b>	0.00	-0.02	-0.06	-0.07	<b>-0.05</b>
Huizachal	24171	0.03	0.00	0.10	0.00	-0.04	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.05	-0.04	-0.02
Rioverde DGE	24114	0.04	0.05	0.02	0.01	-0.03	0.03	0.02	<b>0.05</b>	0.06	0.06	0.02	0.02	<b>0.04</b>
Pastora	24052	<b>-0.08</b>	-0.07	-0.02	0.00	0.00	<b>0.06</b>	<b>0.06</b>	<b>0.09</b>	<b>0.13</b>	0.04	-0.04	-0.05	0.02
San Nicolás Tolentino	24071	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	<b>0.07</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	0.05	0.00	0.00	<b>0.03</b>
Presa Álvaro Obregón	24173	0.05	<b>0.08</b>	0.08	0.00	0.00	0.05	<b>0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>0.11</b>	<b>0.09</b>	0.02	0.05	<b>0.06</b>
Cerritos	24008	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.02	<b>0.10</b>	<b>0.09</b>	0.06	0.00	-0.04	-0.04	0.05
Cárdenas	24006	0.03	<b>0.07</b>	0.03	0.02	0.00	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	0.03	<b>0.09</b>	<b>0.11</b>	0.03	0.00	<b>0.04</b>
Pedro Montoya	24054	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	-0.02	0.00	0.03
Rayón	24060	-0.03	0.00	0.06	0.04	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.00	0.03	0.02
Buenavista	24168	<b>-0.09</b>	<b>-0.07</b>	0.00	-0.04	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	-0.07	<b>-0.14</b>	<b>-0.12</b>	<b>-0.04</b>
Villa Juárez	24103	0.00	-0.01	0.08	0.00	-0.02	0.00	-0.06	0.00	0.06	0.07	0.04	0.00	0.01
San José Albuquerque	24067	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
Colonia Álvaro Obregón	24013	0.00	0.00	0.00	<b>-0.11</b>	<b>-0.09</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.02
Armadillo De Los Infante	24004	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	-0.03	0.00	0.01
Zaragoza	24106	-0.01	0.02	<b>0.08</b>	<b>0.17</b>	<b>0.09</b>	<b>0.16</b>	<b>0.14</b>	<b>0.11</b>	<b>0.14</b>	<b>0.10</b>	0.00	0.00	<b>0.09</b>
Región De Estudio	---	-0.02	-0.01	0.03	-0.01	-0.02	0.03	0.01	<b>0.02</b>	<b>0.06</b>	0.03	-0.04	-0.02	0.01

**Nota:** Las tendencias con significancia estadística  $\alpha = 0.05$ , se presentan en negrita

## 2.9 Detección de rupturas

La detección de rupturas se realizó a través de la prueba de Pettitt, con el objetivo de determinar si las tendencias significativas registraron un punto de ruptura y, de ser así, identificar a partir de que década. Dicho método se realizó a través del software estadístico denominado XLSTAT; a través del programa de cómputo Microsoft Excel en la sección XLSTAT, localizada en la barra de herramientas del programa, enseguida se seleccionó el menú del signo (+), posteriormente en análisis de series temporales, seguido de pruebas de homogeneidad, seleccionando la prueba de Pettitt.

### 2.9.1 Prueba de Pettitt

De acuerdo con Kundzewicz & Robson (2004), la prueba de Pettitt (1979) es una alternativa interesante en comparación con otros métodos no paramétricos, debido a que es más potente y robusta en la detección de cambios en la media y varianza. Dicha prueba asume que las observaciones son independientes. Pone a prueba la hipótesis nula  $H_0$ , que, al dividir la muestra en dos, no se presentan cambios en la media. Se produce una comparación basada en el rango entre las observaciones situadas antes y después de tiempo  $t$ , de donde tenemos la variable de máximo valor absoluto  $k(t)$ :

$$k(t) = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

Posteriormente, se obtiene el tiempo para el cual la cantidad de información acumulada es la mayor, se le denomina punto estadístico de Pettitt  $k(t)$ . Denotando que es el tiempo y es la cantidad de información:

$$T = \arg \max(k(t))$$
$$k = \max_{1 \leq t \leq n} (|k(t)|)$$

Donde  $k$  es el estadístico final de Pettitt y  $T$  es el punto de cambio o “punto de Pettitt”. La significancia estadística asociada con el rechazo de la hipótesis nula  $H_0$  esta dada aproximadamente por:

$$p \approx 2 \exp\left(\frac{-6k^2}{n^3 + n^2}\right)$$

Por lo que, para un nivel de significancia  $\alpha$  de primer orden, si  $p < \alpha$  la hipótesis nula es rechazada (ausencia de punto de cambio); en dicho análisis se consideró un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ , es decir, un nivel de confianza del 95%.

## **2.10 Resultados del análisis de tendencias y rupturas**

A continuación, se presentan los resultados de las décadas de rupturas en las tendencias significativas, para cada una de las cuatro variables de estudio (Tablas 15, 16, 17 y 18). Sin embargo, no en todas las tendencias se registró una ruptura.

Tabla 15. Rupturas en tendencias significativas de la precipitación total 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		DÉCADA												
Las Tablas	24195													
Vigas	24097					<b>1990</b>								
Paredes	24050													<b>2000</b>
San José Del Tapanco	24193													
Manantial Media Luna	24172					<b>1990</b>								
Huizachal	24171													
Rioverde DGE	24114													
Pastora	24052												<b>1990</b>	
San Nicolás Tolentino	24071													
Presa Álvaro Obregón	24173													
Cerritos	24008													
Cárdenas	24006					<b>1990</b>								
Pedro Montoya	24054			<b>2000</b>										
Rayón	24060													
Buenavista	24168								<b>1990</b>	<b>2000</b>				<b>2000</b>
Villa Juárez	24103													
San José Albuquerque	24067													
Colonia Álvaro Obregón	24013													
Armadillo De Los Infante	24004			<b>1990</b>										
Zaragoza	24106									<b>2000</b>				
Xoconostle	24179													
San Francisco	24066													
La Morita	24159			<b>2000</b>								<b>2000</b>		
Región De Estudio	---													



Tabla 16. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura media 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		DÉCADA												
Las Tablas	24195													
Vigas	24097													
Paredes	24050													
San José Del Tapanco	24193								2000					
Manantial Media Luna	24172	2000							2000			2000	2000	2000
Huizachal	24171													
Rioverde DGE	24114				1990			1990	1990					1990
Pastora	24052		1990		1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990		1990	1990
San Nicolás Tolentino	24071													
Presa Álvaro Obregón	24173													
Cerritos	24008		1990	1990	1990	1990	2000	1990	1990	1990	1990		1990	1990
Cárdenas	24006				1990			2000	2000	1990	2000		2000	2000
Pedro Montoya	24054								1990	1990				1990
Rayón	24060													
Buenavista	24168												1990	
Villa Juárez	24103					2000								
San José Albuquerque	24067		1990		2000			2000	2000	1990	2000			2000
Colonia Álvaro Obregón	24013				2000				1990			1990		
Armadillo De Los Infante	24004													
Zaragoza	24106	1990	1990	1990	1990	1990	2000	2000	2000	1990	1990		2000	1990
Región De Estudio	---		1990		1990			1990	1990	1990				1990

Tabla 17. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura máxima extrema 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		DÉCADA												
Las Tablas	24195													
Vigas	24097								1990					
Paredes	24050													
San José Del Tapanco	24193													
Manantial Media Luna	24172											2000	1990	
Huizachal	24171													
Rioverde DGE	24114		2000		1990	1990			1990				2000	1990
Pastora	24052	1990			1990						1990		1990	1990
San Nicolás Tolentino	24071			2000										
Presa Álvaro Obregón	24173						1990							
Cerritos	24008	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000			2000
Cárdenas	24006								2000	1990	1990			1990
Pedro Montoya	24054		2000	2000					1990					2000
Rayón	24060								2000					
Buenvista	24168													
Villa Juárez	24103				1990	1990	2000	1990	1990	1990	2000			1990
San José Albuquerque	24067	1990	2000	2000	1990	2000	2000	2000	2000	2000				2000
Colonia Álvaro Obregón	24013													
Armadillo De Los Infante	24004								1990					
Zaragoza	24106		2000	1990					2000					2000
Región De Estudio	---	1990	2000	1990	1990	1990		1990	1990		2000			1990

Tabla 18. Rupturas en tendencias significativas de la temperatura mínima extrema 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
		DÉCADA												
Las Tablas	24195	2000			2000	2000		1990	1990					2000
Vigas	24097					2010								
Paredes	24050					2010			2000				1990	2000
San José Del Tapanco	24193			1990			1990	1980	2000				2000	1990
Manantial Media Luna	24172					2000	2000	2000	1990					2000
Huizachal	24171													
Rioverde DGE	24114								2000					1990
Pastora	24052	1990					1990		2000	2000				
San Nicolás Tolentino	24071						1990	2000	1990	2000				1980
Presa Álvaro Obregón	24173		1990					2000	2000	2000	1990			1990
Cerritos	24008							1990	1990					
Cárdenas	24006						2000	2000		2000	1990			2000
Pedro Montoya	24054													
Rayón	24060													
Buenvista	24168	1990	2000									2000	1990	2000
Villa Juárez	24103													
San José Albuquerque	24067													
Colonia Álvaro Obregón	24013				1980									
Armadillo De Los Infante	24004													
Zaragoza	24106			1990	2000	1990	1990	2000	1990	2000				2000
Región De Estudio	---													

A continuación, se presentan los resultados de las tendencias significativas, magnitud de cambio y rupturas para el periodo 1980-2018, a través de los siguientes mapas (Figuras 16 a 44). Con base en los resultados de dichos análisis, únicamente se generaron mapas correspondientes a los meses en que existieran tendencias significativas  $\geq 20\%$  en las estaciones de la precipitación total y  $\geq 30\%$  en el caso de la temperatura media, máxima y mínima extrema. Asimismo, se generaron los mapas correspondientes al resultado anual para cada una de las 4 variables de estudio: Figura 16 (precipitación total), Figura 20 (temperatura máxima), Figura 30 (temperatura media) y Figura 39 (temperatura mínima).

En el análisis de tendencias y rupturas de los datos de precipitación total anual para el periodo 1980-2018, solo se presentaron tendencias significativas en el sur de la subcuenca (estación 24050), al norte y este del límite de la subcuenca (estaciones 24168 y 24013) con tasas de cambio de 5.5 a 8.0 mm·año<sup>-1</sup>, respecto a las rupturas éstas se registraron en la década del 2000 (estaciones 24168 y 24050). Sin embargo, a nivel regional no se presentó una tendencia significativa (Figura 16). Respecto a los resultados del análisis de la precipitación total mensual, durante el invierno, específicamente en marzo, presentó tendencias significativas de incremento en el oeste y sur de la región de estudio (estaciones, 24004, 24071, 24193 y 24097), así como al este y sur de los límites de la subcuenca (estaciones 24159 y 24054) con tasas de cambio desde los 0.01 a 0.29 mm·año<sup>-1</sup>. Los resultados del análisis de rupturas exhiben que éstas se registraron rupturas en la década de 1990 (estación 24004) y en la del 2000 (estaciones 24159 y 24054); a escala regional no se ha registrado una tendencia significativa (Figura 17).

En primavera, en el mes de mayo, existen tendencias significativas de decremento en el este y sur de la región de estudio (estaciones 24066, 24172 y 24097); asimismo, al este de los límites de la subcuenca (estaciones 24173, 24066 y 24060) con tasas de cambio desde -0.5 a -1.0 mm·año<sup>-1</sup>. Se registraron rupturas en la década de 1990 (estaciones 24006, 24172 y 24097). A nivel regional no se ha registrado una tendencia significativa en el comportamiento de la precipitación total mensual (Figura 18).

En verano, durante el mes de septiembre, se presentaron tendencias significativas de incremento en la zona norte y oeste de la región de estudio (estaciones 24008 y 24004); asimismo, en el norte y oeste de los límites de la subcuenca (estaciones 24168, 24179, 24106 y 24067) con tasas de cambio de 1.14 a 2.58 mm·año<sup>-1</sup>; se registraron rupturas en la década del 2000 (estaciones 24168 y 24106). No se ha registró una tendencia significativa a nivel regional (Figura 19).

El comportamiento de las tendencias de la precipitación total no posee un patrón espacial definido puesto que se registraron tendencias significativas positivas y negativas en las zonas altas (región montañosa) y zonas bajas (valle) de la subcuenca de estudio.

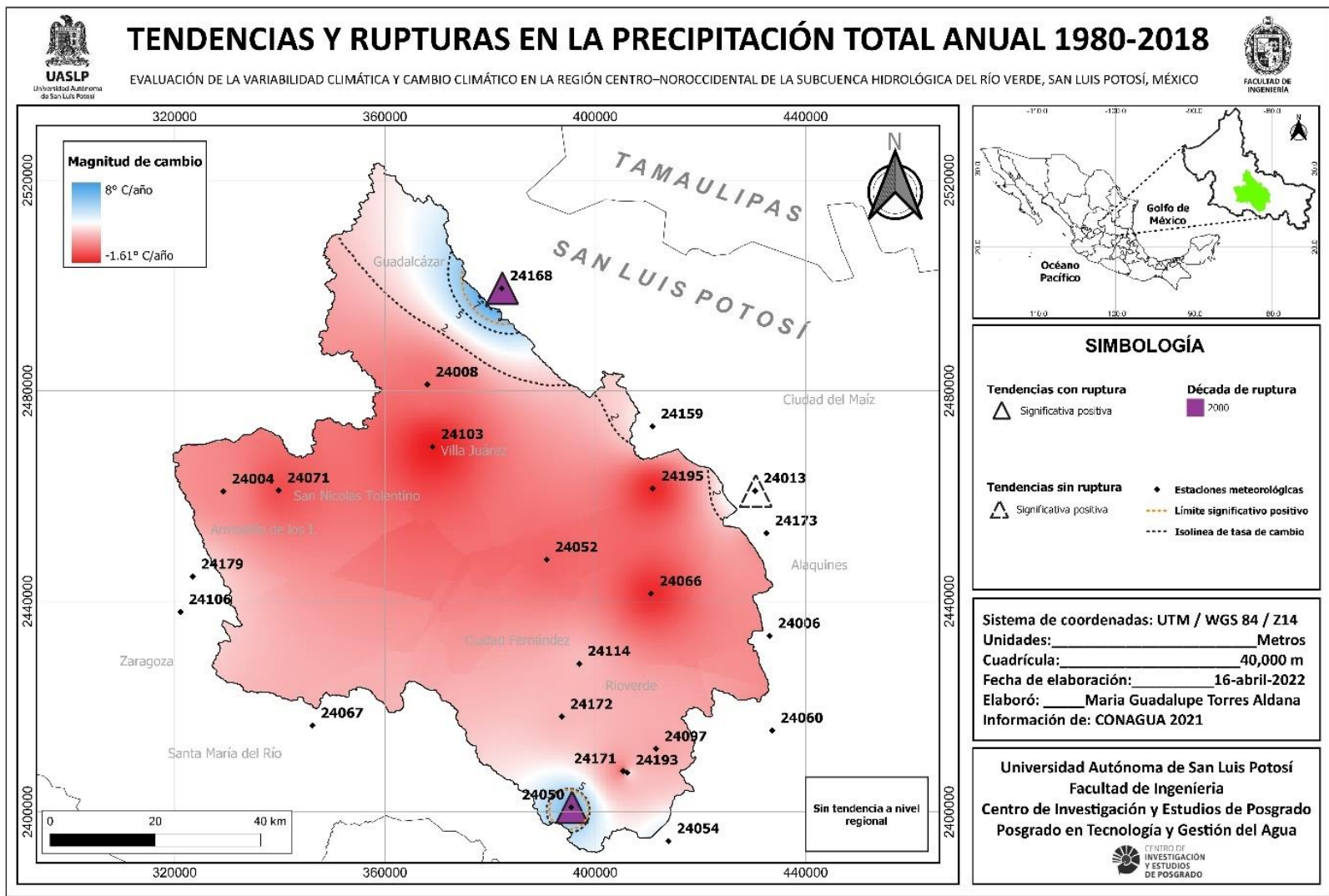


Figura 16. Tendencias y rupturas en la precipitación total anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

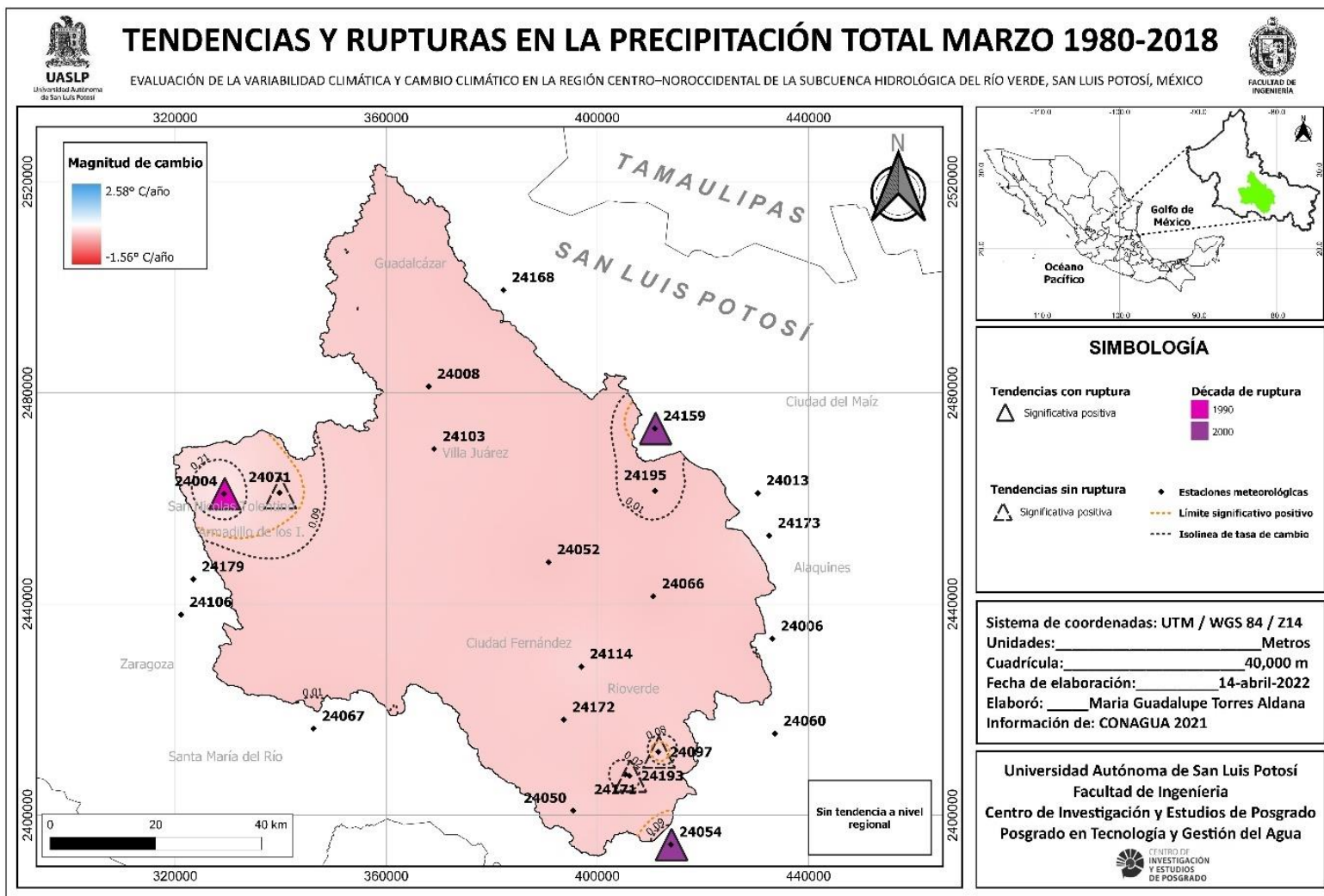


Figura 17. Tendencias y rupturas en la precipitación total marzo 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

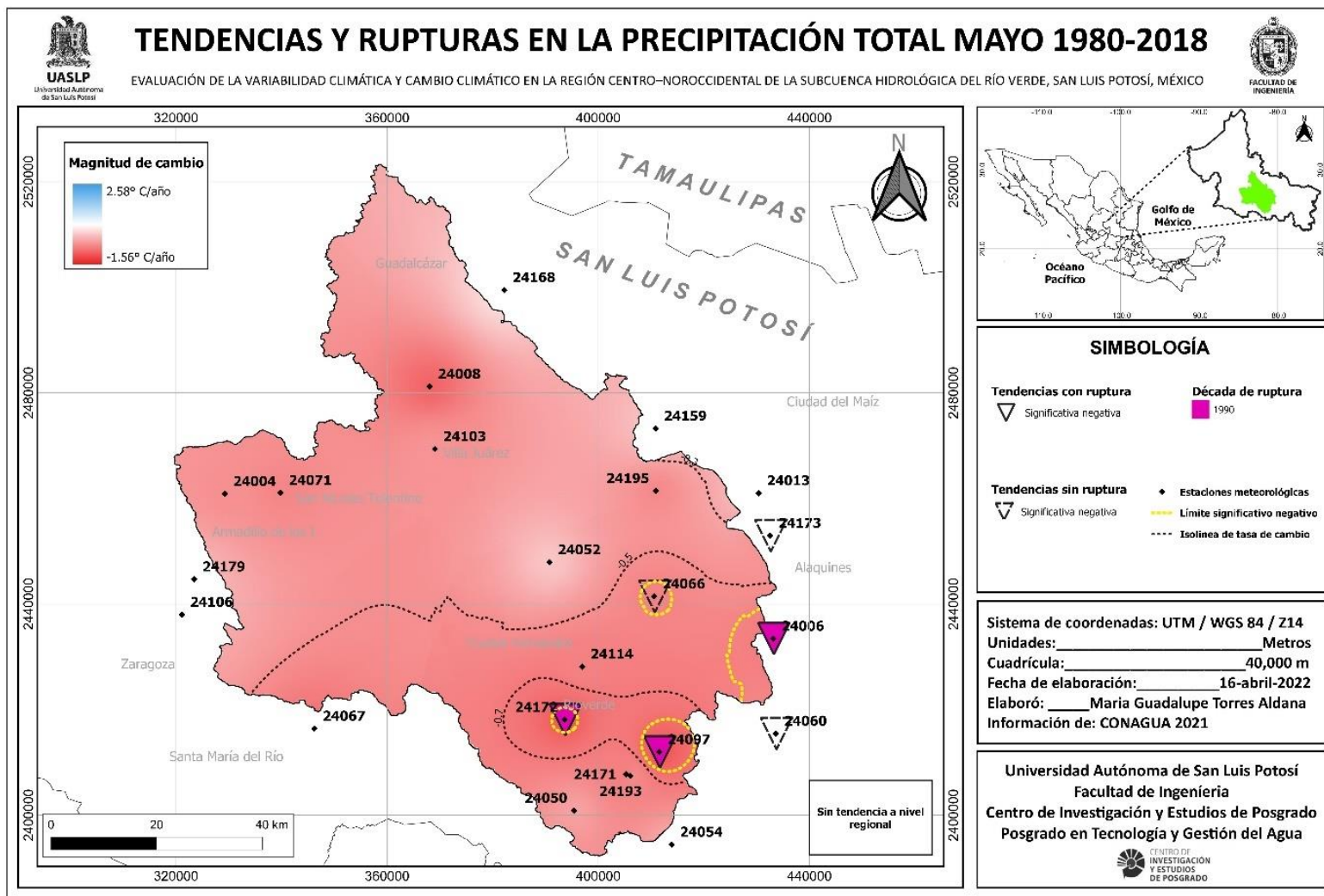


Figura 18. Tendencias y rupturas en la precipitación total mayo 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).



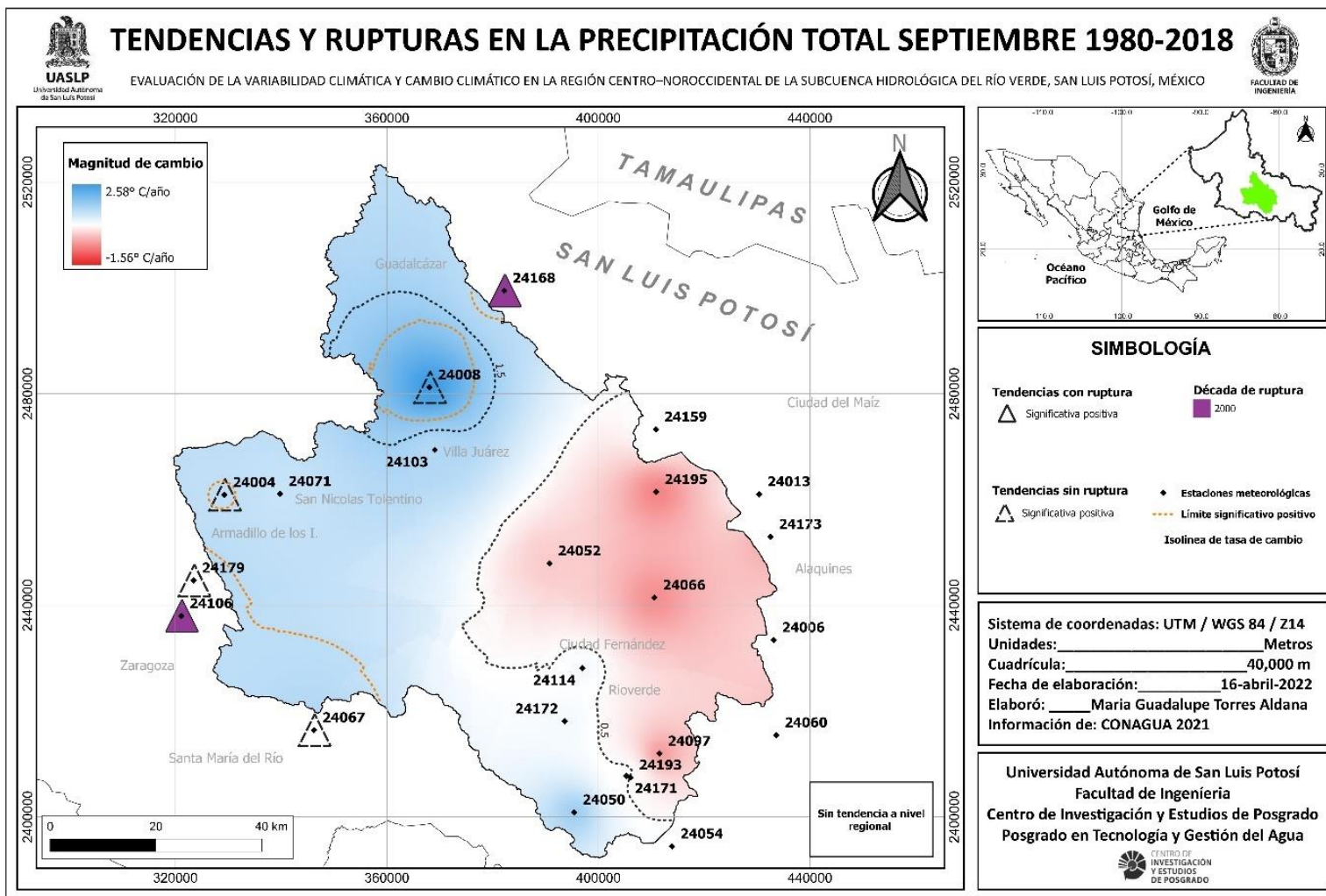


Figura 19. Tendencias y rupturas en la precipitación total septiembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Los resultados del análisis de tendencias y rupturas de los datos de la temperatura máxima anual (periodo 1980-2018), presentaron tendencias significativas de incremento en el norte, centro y este (estaciones 24008, 24103, 24052, 24114 y 24195), así como al oeste, sur y este de los límites de la subcuenca (estaciones 24106, 24067, 24054 y 24006) con tasas de cambio desde los 0.04 a 0.13 °C·año<sup>-1</sup>. Asimismo, se registró una tendencia al decremento en el occidente de la subcuenca (estación 24071) con magnitud de cambio de -0.03 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron principalmente en la década de 1990 (estaciones 24006, 24114, 24052 y 24103) y en la década del 2000 (estaciones 24008, 24106, 24067 y 24054). Puesto que la gran mayoría del territorio presentó una tendencia de incremento en la temperatura máxima anual, se registró tendencia de incremento a nivel regional con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> y con ruptura en la década de 1990 (Figura 20).

Los resultados correspondientes al invierno específicamente en enero presentaron tendencias significativas de incremento en el norte y centro de la subcuenca (estaciones 24008, 24052 y 24114) asimismo, al oeste, este y sur de los límites de la zona de estudio (estaciones 24106, 24067, 24006 y 24054), con tasas de cambio en el rango de 0.05 a 0.1 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones, 24052 y 24067) y la del 2000 (estación 24008). En términos regionales la tendencia significativa es incremento en la temperatura máxima con tasa de cambio de 0.07 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 21).

Mientras que, en febrero los resultados denotan que existen tendencias significativas de incremento en el norte, centro y este de la zona de estudio (estaciones 24008, 24114 y 24195); así como en oeste y sur del límite de la subcuenca (estaciones 24106, 24067 y 24054) con tasas de cambio desde de 0.08 a 0.16 °C·año<sup>-1</sup>. Todas las estaciones con tendencia significativa presentaron ruptura en la década de los 2000 a excepción de la zona este (estación 24195). A nivel regional se registró tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de febrero con tasa de cambio de 0.08 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 2000 (Figura 22).

En el mes de marzo se registró, que existen tendencias significativas de incremento en la zona norte y centro de la subcuenca (estaciones 24008 y 24114), asimismo al oeste y sur de los límites de la subcuenca (estaciones 24106, 24067 y 24054), con magnitudes de cambio desde los 0.05 a 0.21 °C·año<sup>-1</sup>; no obstante, también se presentó una tendencia de decremento en la zona occidente de la región de estudio (estación 24071) con tasa de cambio de -0.08 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron principalmente en la década del 2000 (estaciones 24008, 24071, 24067, 24054), y en menor medida en la década de 1990 (estación 24106). Ahora bien, la tendencia que predomina es al incremento, a nivel regional ya se detectó una tendencia significativa positiva con magnitud de cambio de 0.05 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 23).

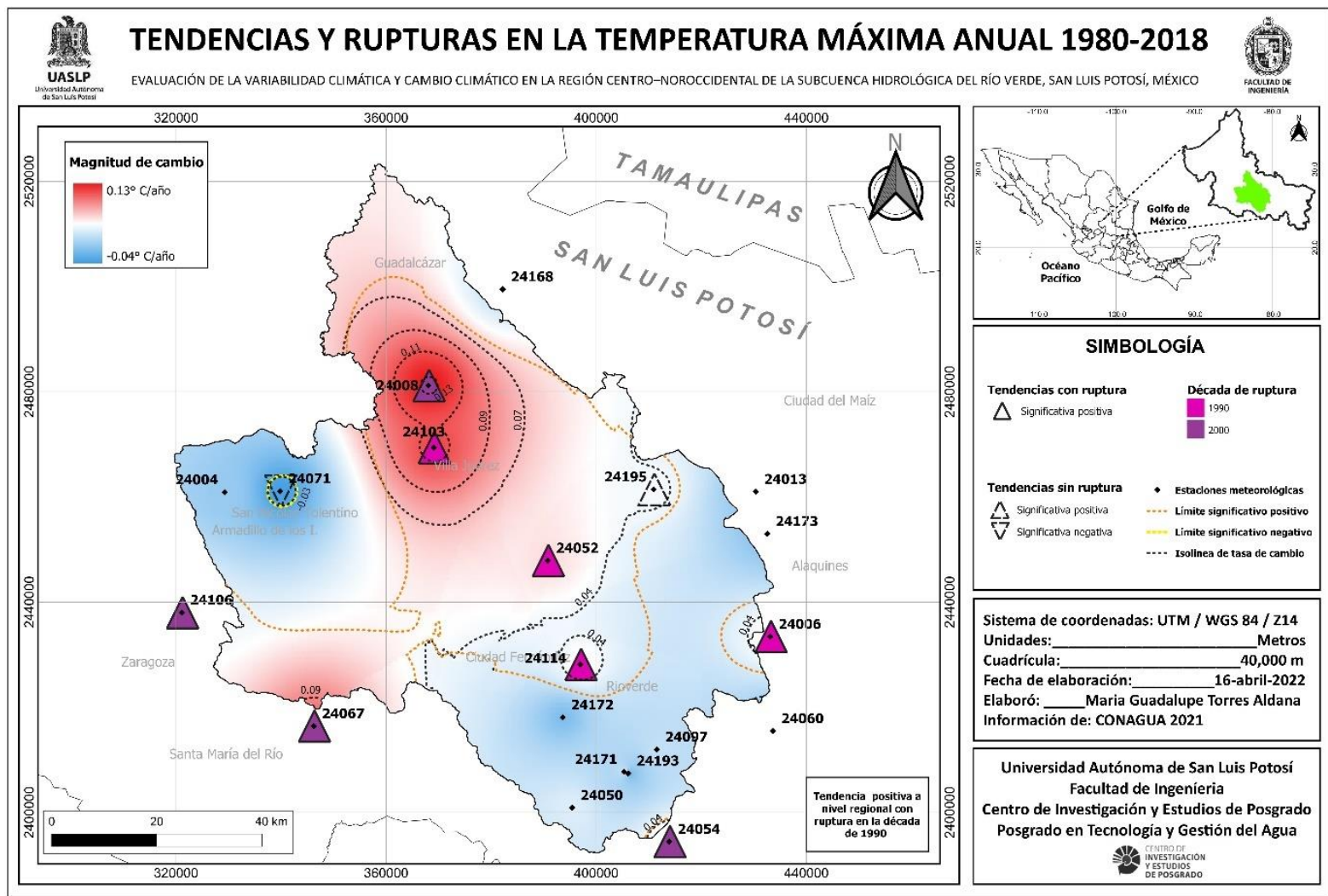


Figura 20. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

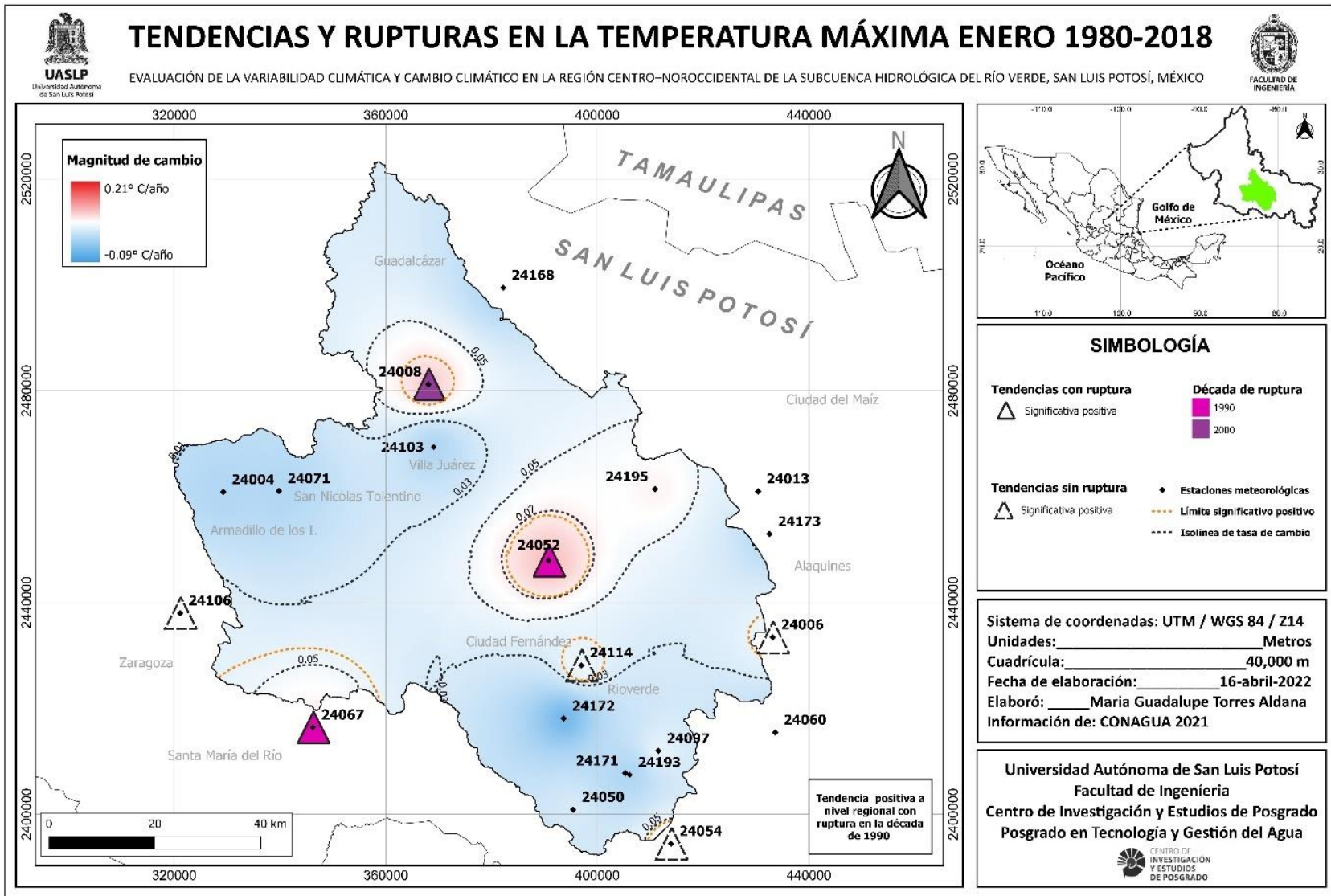


Figura 21. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima enero 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

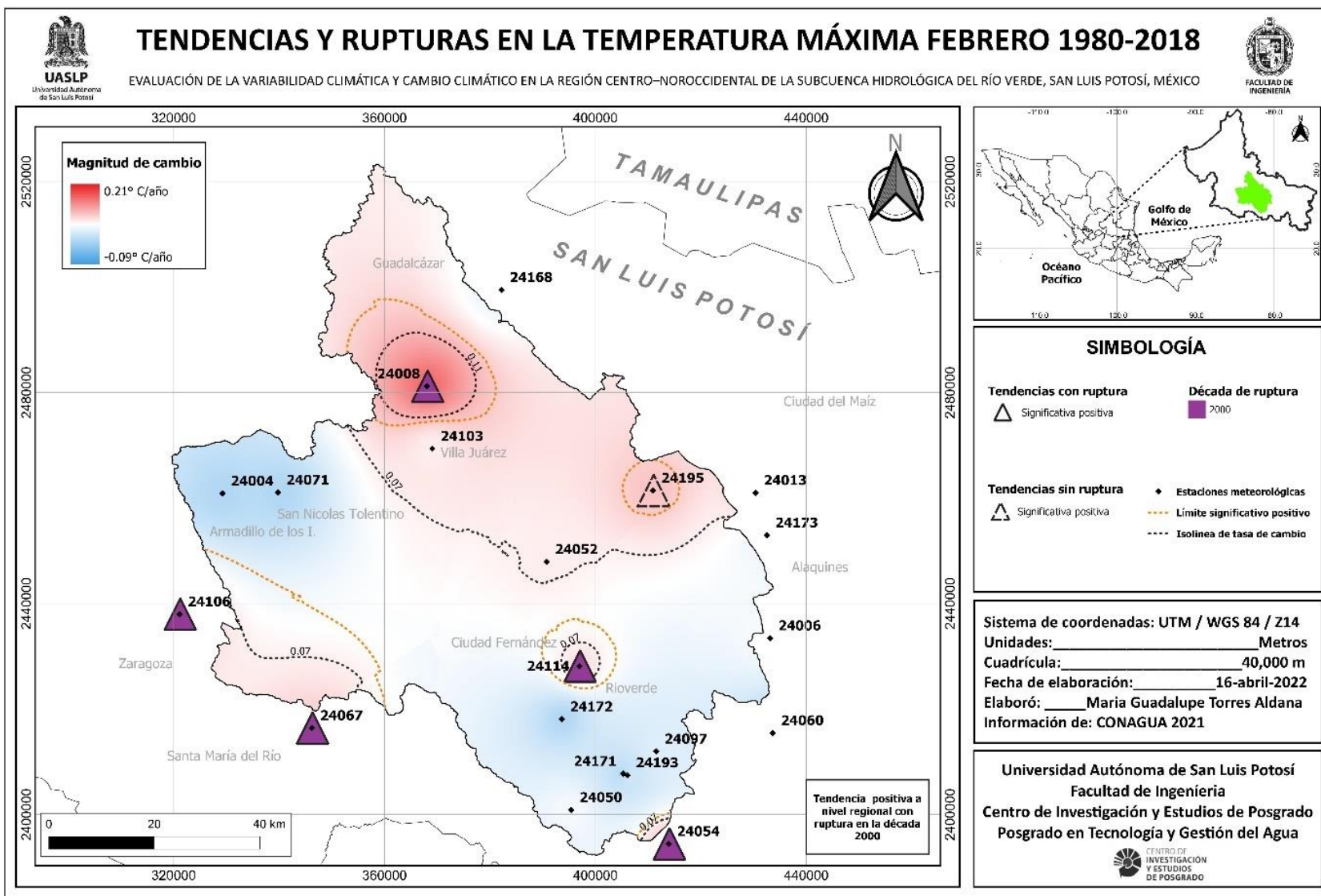


Figura 22. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima febrero 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

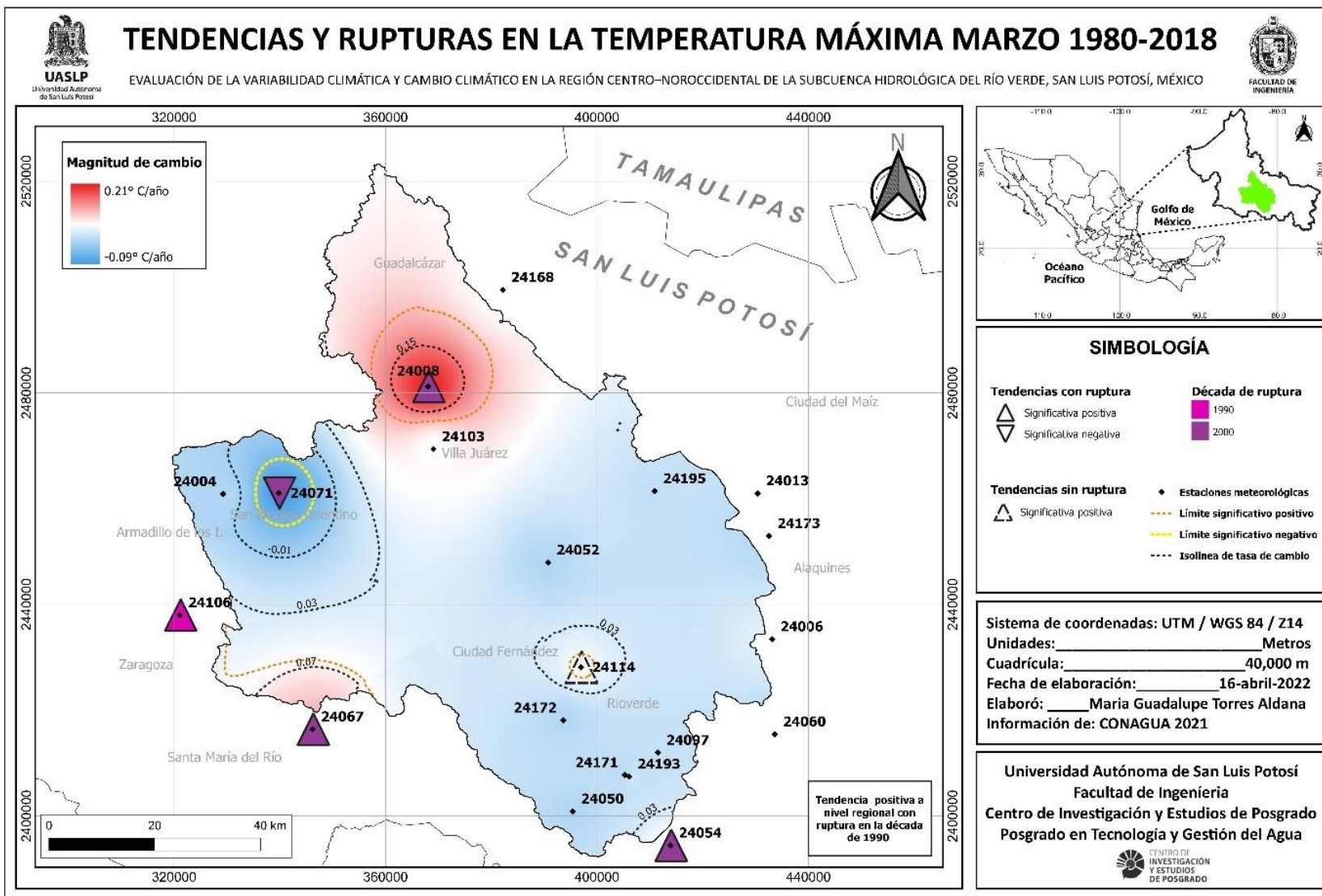


Figura 23. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima marzo 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Los resultados correspondientes a la primavera, específicamente durante el mes de abril denotan que existen tendencias significativas de incremento en el norte y centro de la región de estudio (estaciones, 24008, 24103, 24052 y 24114); de igual forma en el norte y oeste de los límites de la zona de estudio (estaciones 24168 y 24067) con tasas de cambio desde de 0.06 a 0.17 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron principalmente en la década de 1990 (estaciones 24103, 24052, 24114 y 24067) y en la década del 2000 (estación 24008). En términos regionales, se registró tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de abril con tasa de cambio de 0.06 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 24).

En el verano (julio, agosto y septiembre) de manera específica en julio, se registró que existen tendencias significativas de incremento en el norte, centro, este y sur de la región de estudio (estaciones 24008, 24103, 24114, 24195 y 24171), así como hacia el oeste, este y sureste de los límites de la zona de estudio (24067, 24006 y 24054) con tasas de cambio desde de 0.06 a 0.17 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estación 24103) y en la década del 2000 (estaciones 24008 y 24067). A nivel regional, se registró tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de julio con tasa de cambio de 0.08 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 25).

Respecto al mes de agosto, los resultados del análisis denotan que existen tendencias significativas de incremento al norte, oeste, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24103, 24004, 24114, 24171 y 24097), asimismo cerca de los límites de la región de estudio hacia el norte, oeste, este y sur (estaciones 24168, 24106, 24067, 24006, 24060 y 24054), con tasas de cambio desde 0.04 a 0.20 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron principalmente en la década de 1990 (estaciones 24103, 24004, 24114, 24097 y 24054) y del 2000 (estaciones 24008, 24067, 24106, 24006 y 24060). A escala regional, se registró tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de agosto con tasa de cambio de 0.09 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 26).

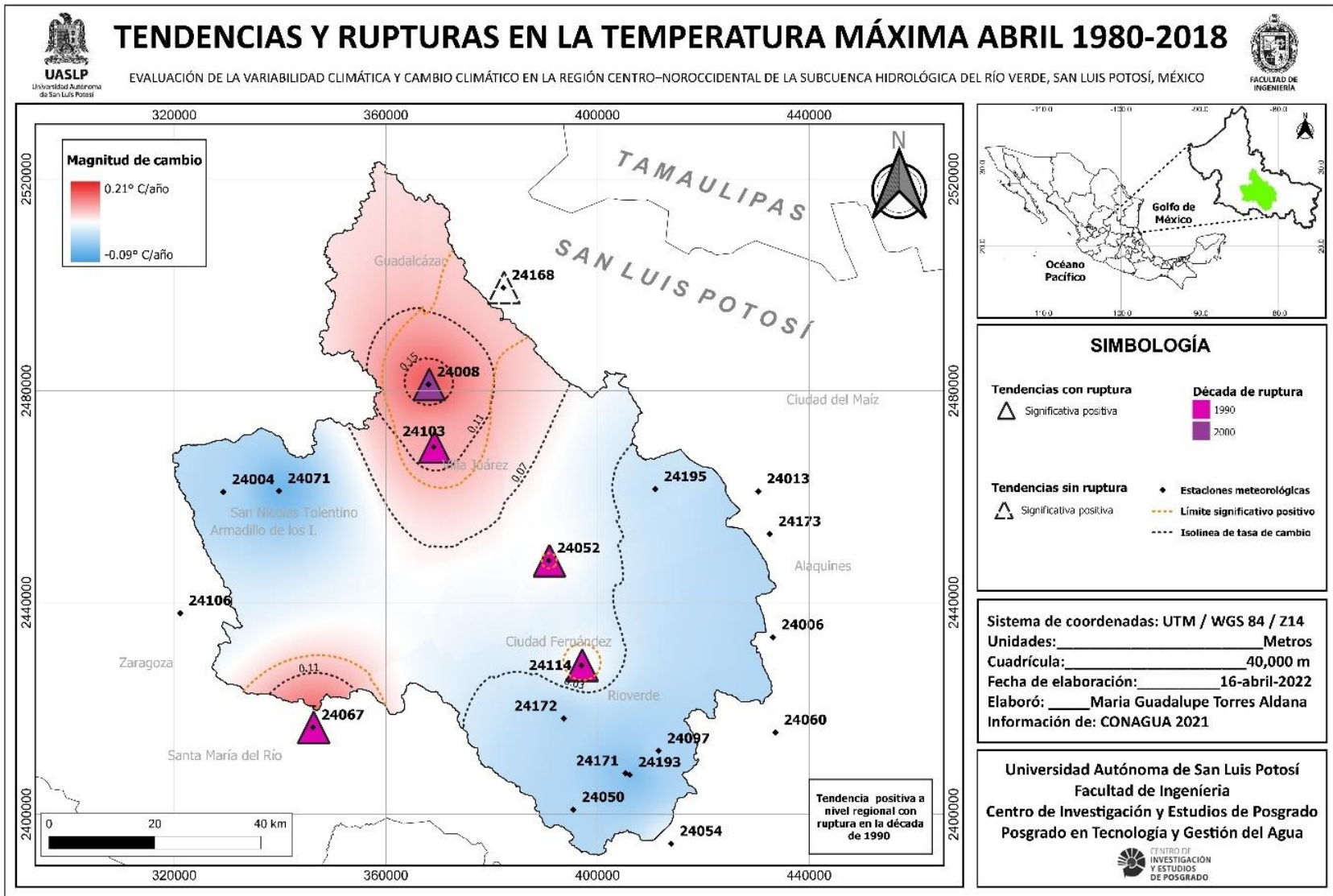


Figura 24. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima abril 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).



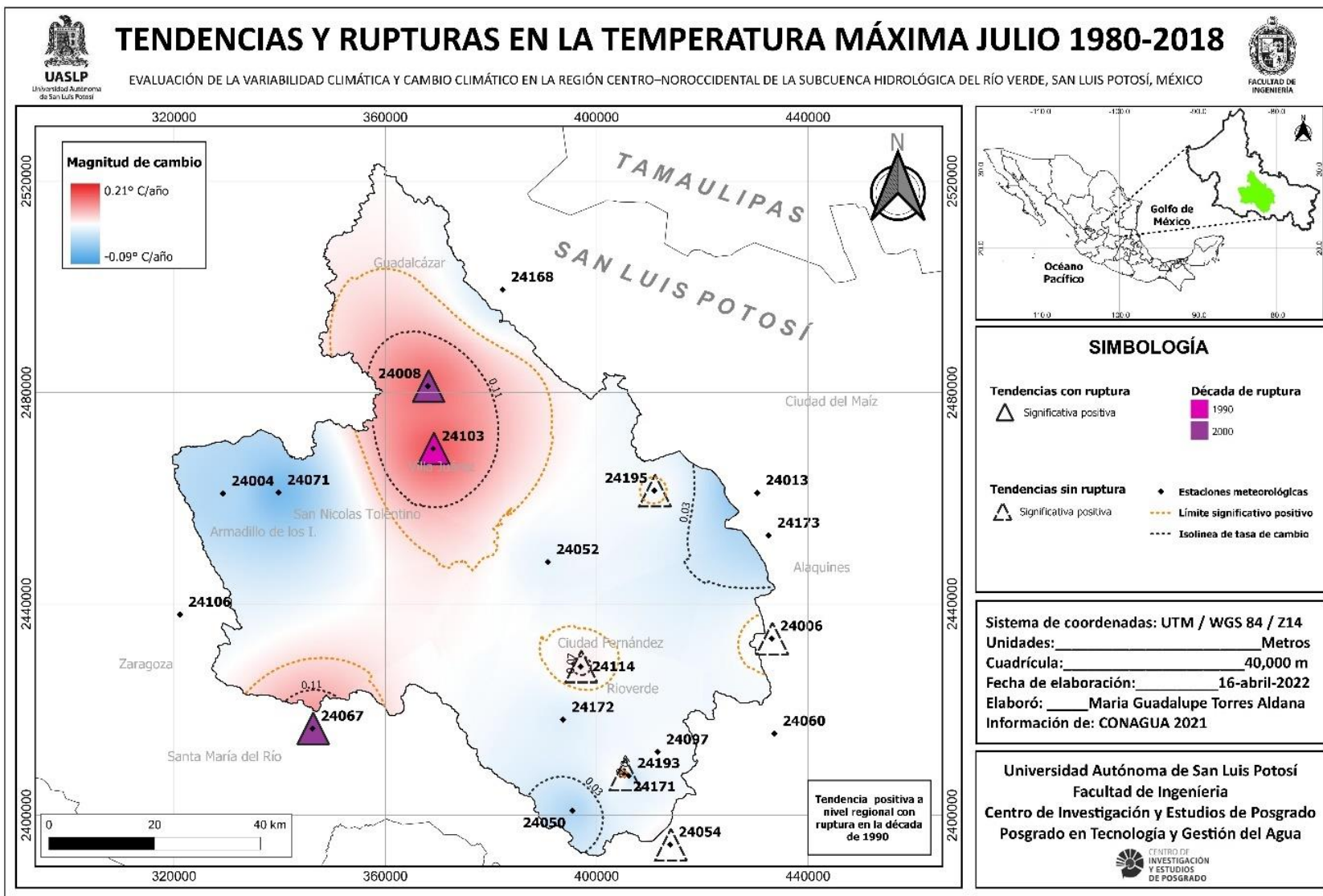


Figura 25. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima julio 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

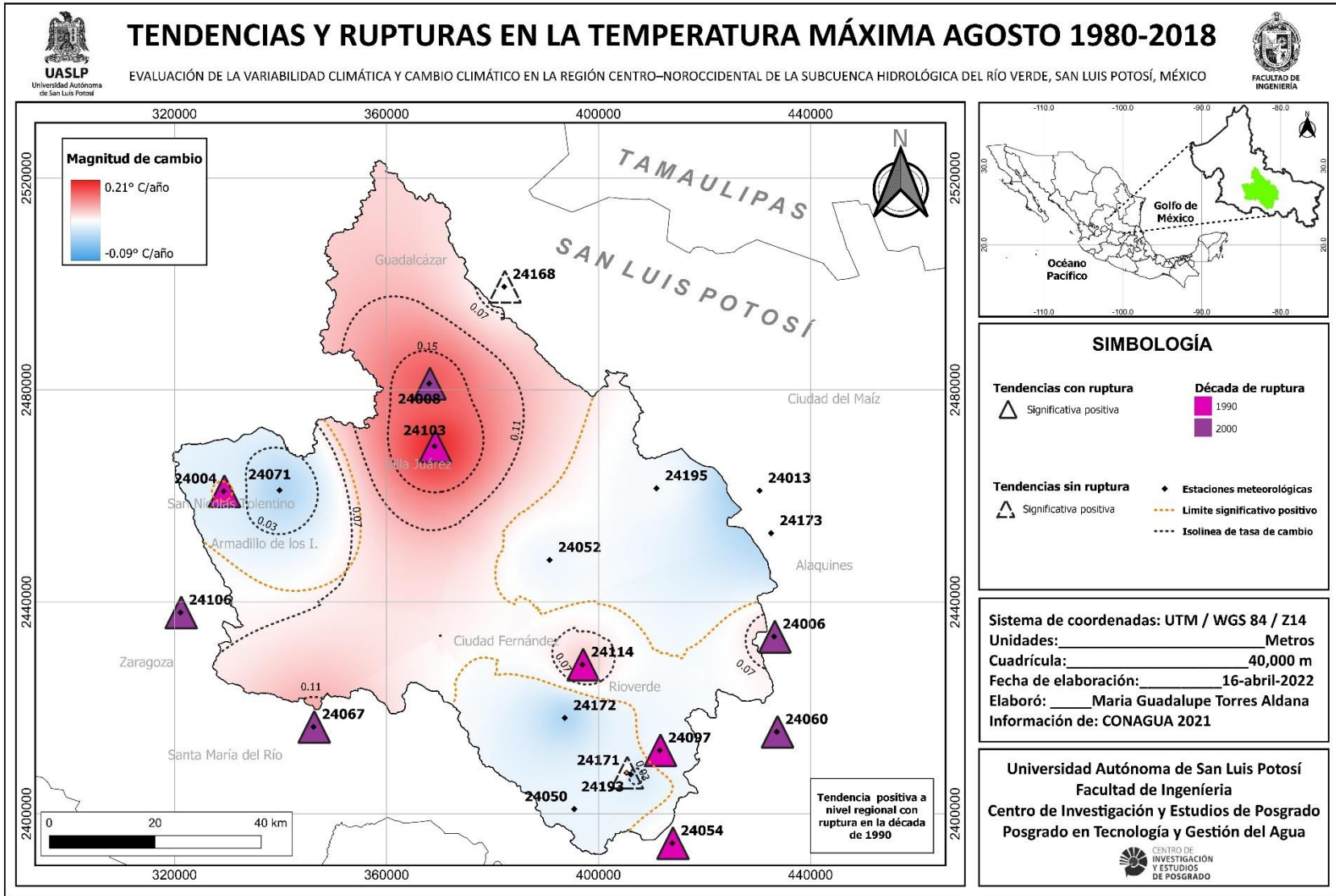


Figura 26. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima agosto 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Los resultados correspondientes al mes de septiembre (1980-2018), registraron tendencias significativas de incremento en el norte y este de la región de estudio (estaciones 24008, 24103 y 24195), al este y oeste de los límites de la región (estaciones 24006 y 24067) con tasas de cambio desde 0.05 a 0.15 °C·año<sup>-1</sup>, no obstante, se registró una tendencia significativa de decremento al este del límite de la zona de estudio (estación 24173) con magnitud de cambio de -0.05 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24103 y 24006) y del 2000 (estaciones 24008 y 24067). A escala de subcuenca, existe una tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de septiembre con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 27).

Por su parte, en el otoño, los resultados correspondientes específicamente a octubre registraron tendencias significativas de incremento en el norte, centro y este de la región de estudio (estaciones 24008, 24103, 24052, 24114 y 24195) de igual manera al este del límite de la región de estudio (estación 24006) con tasas de cambio de 0.05 a 0.11 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24052 y 24006) y del 2000 (estaciones 24008 y 24103). A nivel de subcuenca, se registró una tendencia significativa de incremento en la temperatura máxima del mes de septiembre con tasa de cambio de 0.05 °C·año<sup>-1</sup> con ruptura en la década del 2000 (Figura 28).

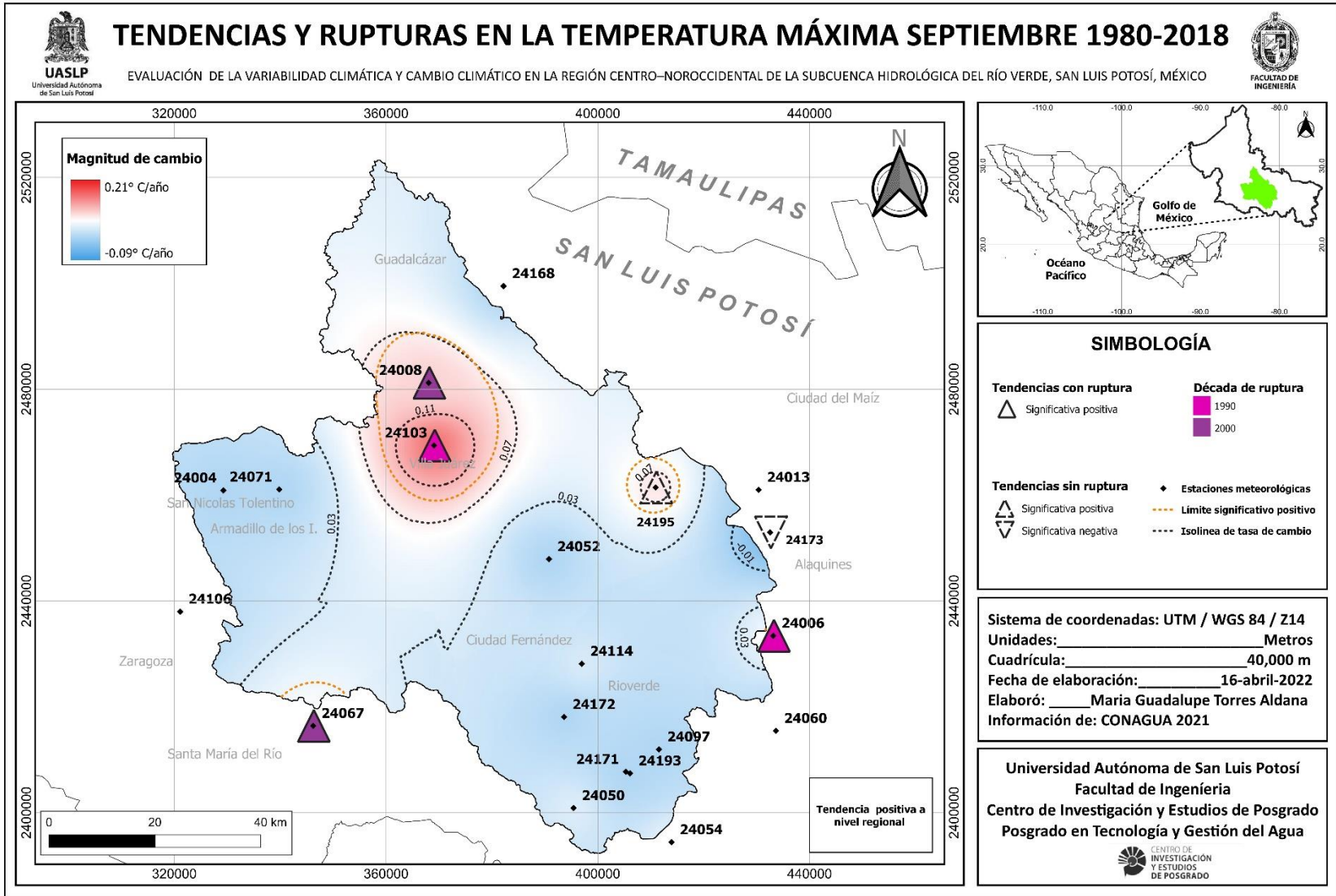


Figura 27. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima septiembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

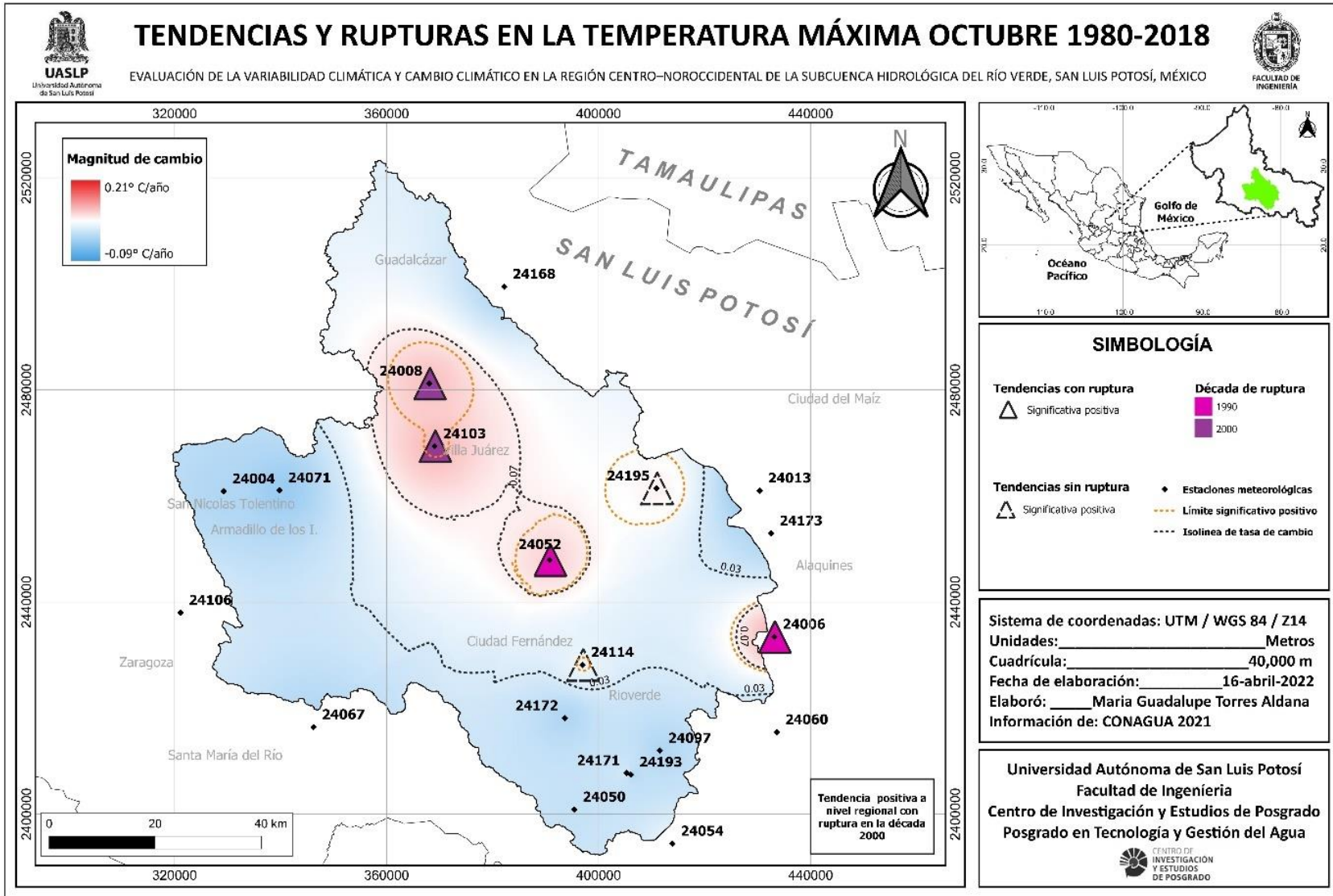


Figura 28. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima octubre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Respecto a los resultados de diciembre (periodo 1980-2018), se presentaron tendencias significativas de incremento en el centro y este de la subcuenca (estaciones 24052, 24114 y 24195), así como al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24006 y 24067), con tasas de cambio de 0.04 a 0.13 °C·año<sup>-1</sup>; sin embargo, en la zona sur de la zona de estudio, se registró una tendencia significativa de decremento (estación 24172). Las rupturas se registraron en la década de 1990 (estaciones 24052 y 24172) y del 2000 (estación 24114), a nivel regional no se ha registrado una tendencia significativa (Figura 29).

La temperatura máxima anual presentó una tendencia significativa de incremento en las distintas zonas topográficas de la región de estudio es decir en la zona montañosa y en el valle de la subcuenca; Durante los meses de enero, febrero, marzo y agosto el comportamiento es similar al antes mencionado, mientras que durante abril, julio, septiembre, octubre y diciembre las tendencias de incremento se concentran en el valle tanto en lo zona más baja como en la zona cercana a la región montañosa.

Por otro lado, el análisis de tendencias y rupturas de los datos de temperatura media anual correspondientes al periodo 1980-2018, registró tendencias significativas de incremento en el norte, centro, oeste y sur de la región de estudio (estaciones 24008, 24052, 24114, 24071, 24193) de igual forma, al oeste, este y sur de los límites de la región de estudio (24106, 24067, 24006 y 24054) con tasas de cambio de 0.01 a 0.09 °C·año<sup>-1</sup>, sin embargo, en la zona sur de la subcuenca y al noreste del límite esta, se registraron tendencias significativas de decremento (estaciones 24172 y 24013), ambas estaciones con tasa de cambio de -0.04 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron principalmente en la década de 1990 (estaciones 24008, 24052, 24114, 24106 y 24054) y del 2000 (estaciones 24067, 24172 y 24006). A escala regional se registró una tendencia significativa de incremento en la temperatura media con tasa de cambio de 0.03 °C·año<sup>-1</sup>, con ruptura en la década de 1990 (Figura 30).

Respecto a los resultados de la estación de invierno, durante febrero se registraron tendencias significativas de incremento en el norte y centro de la subcuenca (estaciones 24008, 24052, 24114), así como al este y oeste de los límites de la zona de estudio (estaciones 24006, 24106 y 24067), con tasas de cambio de 0.05 a 0.10 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas únicamente se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24008, 24052, 24067 y 24106). En términos regionales se presentó una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 31). Los resultados de la primavera, específicamente en el mes de abril mostraron tendencias significativas de incremento en el norte y centro de la subcuenca (estaciones 24008, 24052, 24114), así como al este y oeste de los límites de la zona de estudio (estaciones 24006, 24106 y 24067), con tasas de cambio de 0.04 a 0.13 °C·año<sup>-1</sup>; sin embargo, se registró una tendencia significativa de decremento en este del límite de la subcuenca (estación 24013) con magnitud de cambio de -0.07 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24008, 24052, 24114, 24006 y 24106), y en menor medida en la década de los 2000 (estaciones 24013 y 24067). A nivel regional se presentó una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 32).

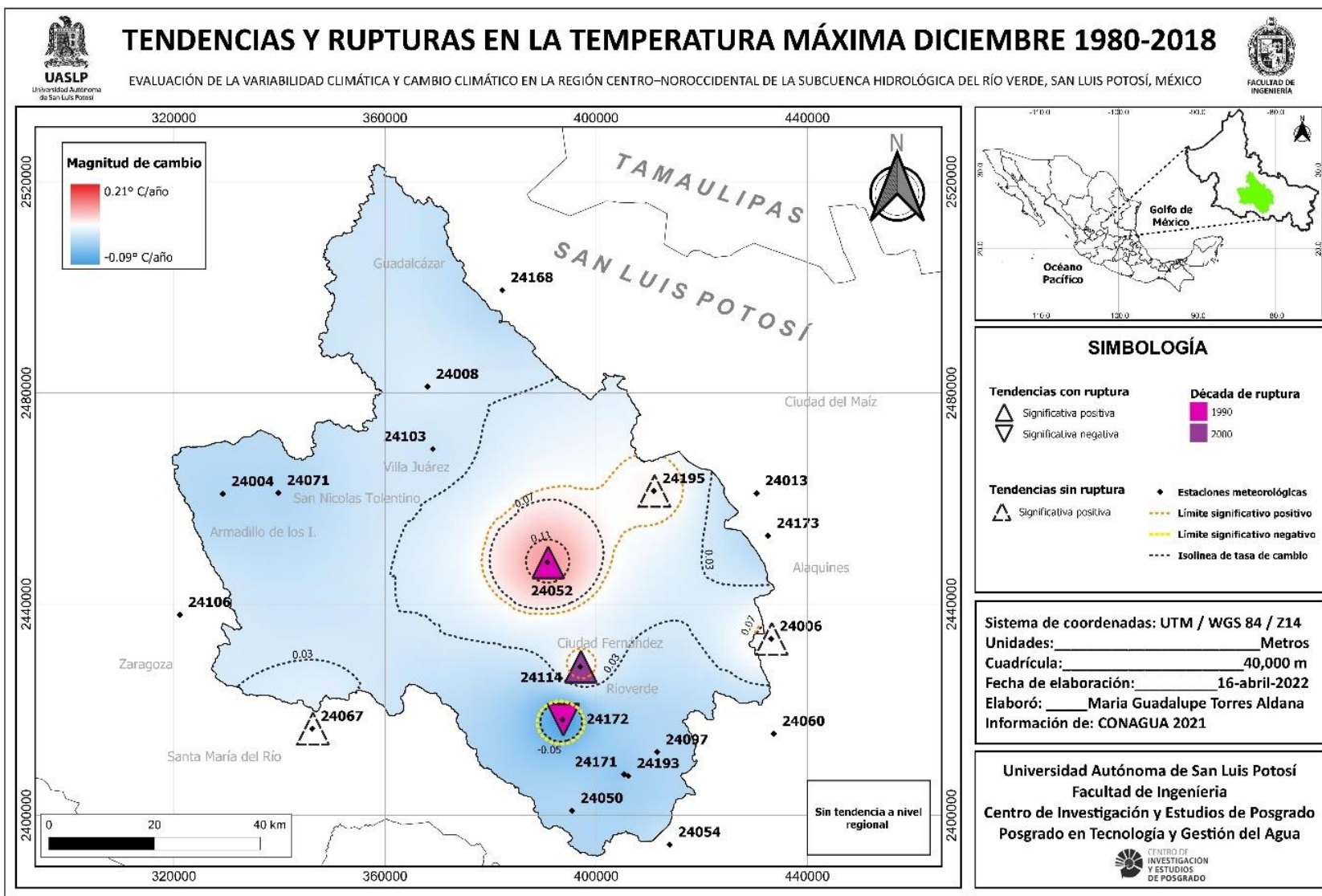


Figura 29. Tendencias y rupturas en la temperatura máxima diciembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).



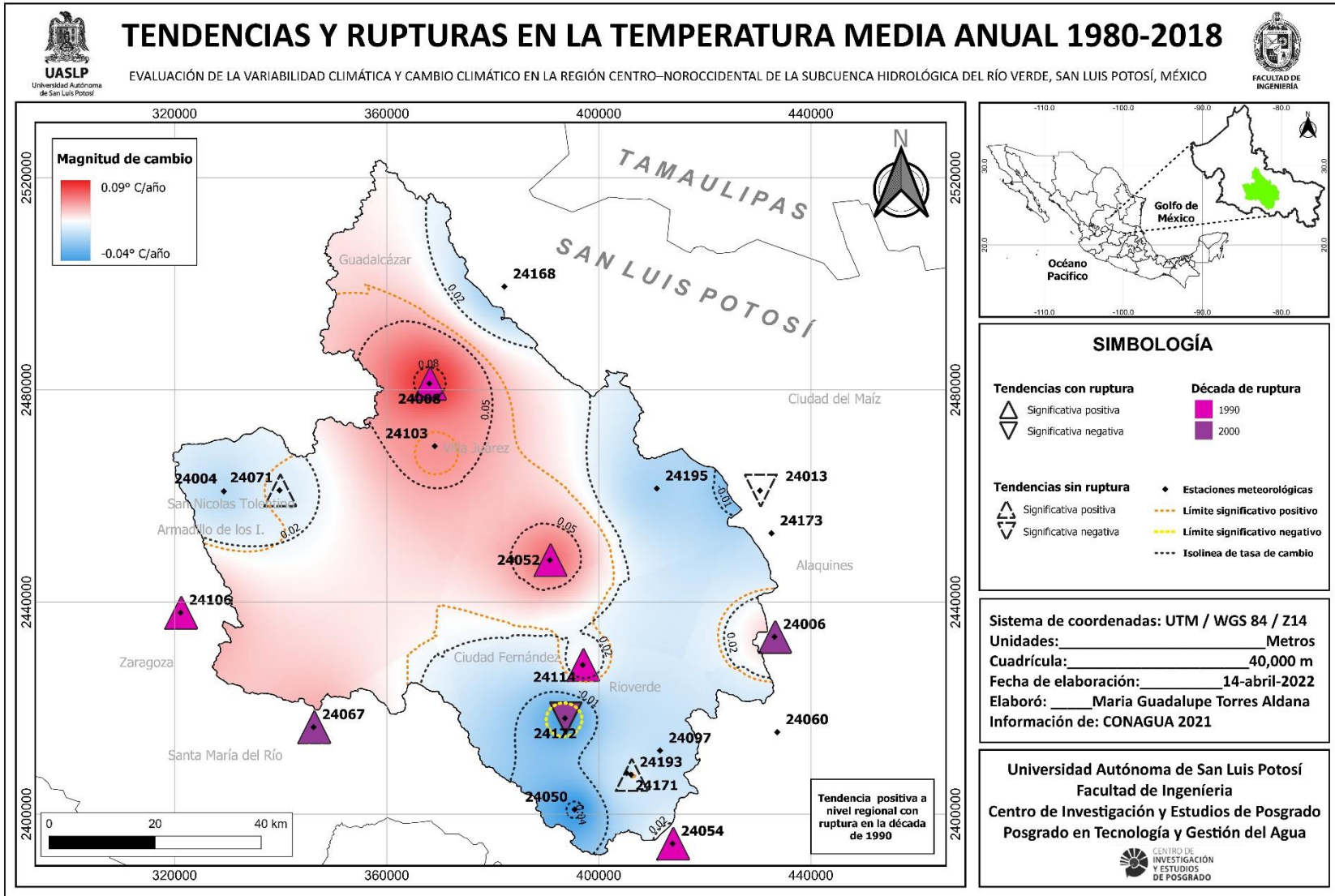


Figura 30. Tendencias y rupturas en la temperatura media anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

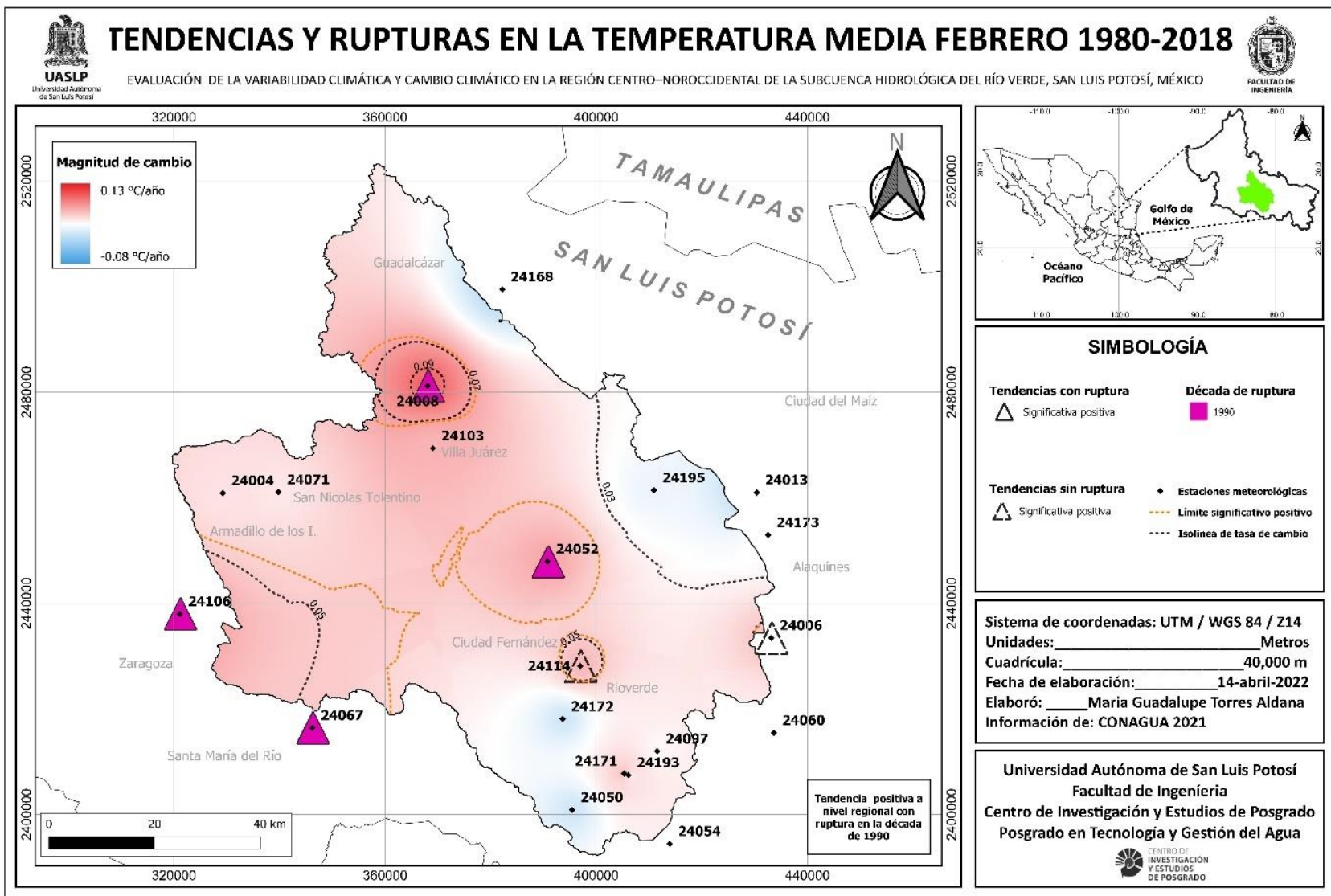


Figura 31. Tendencias y rupturas en la temperatura media febrero 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

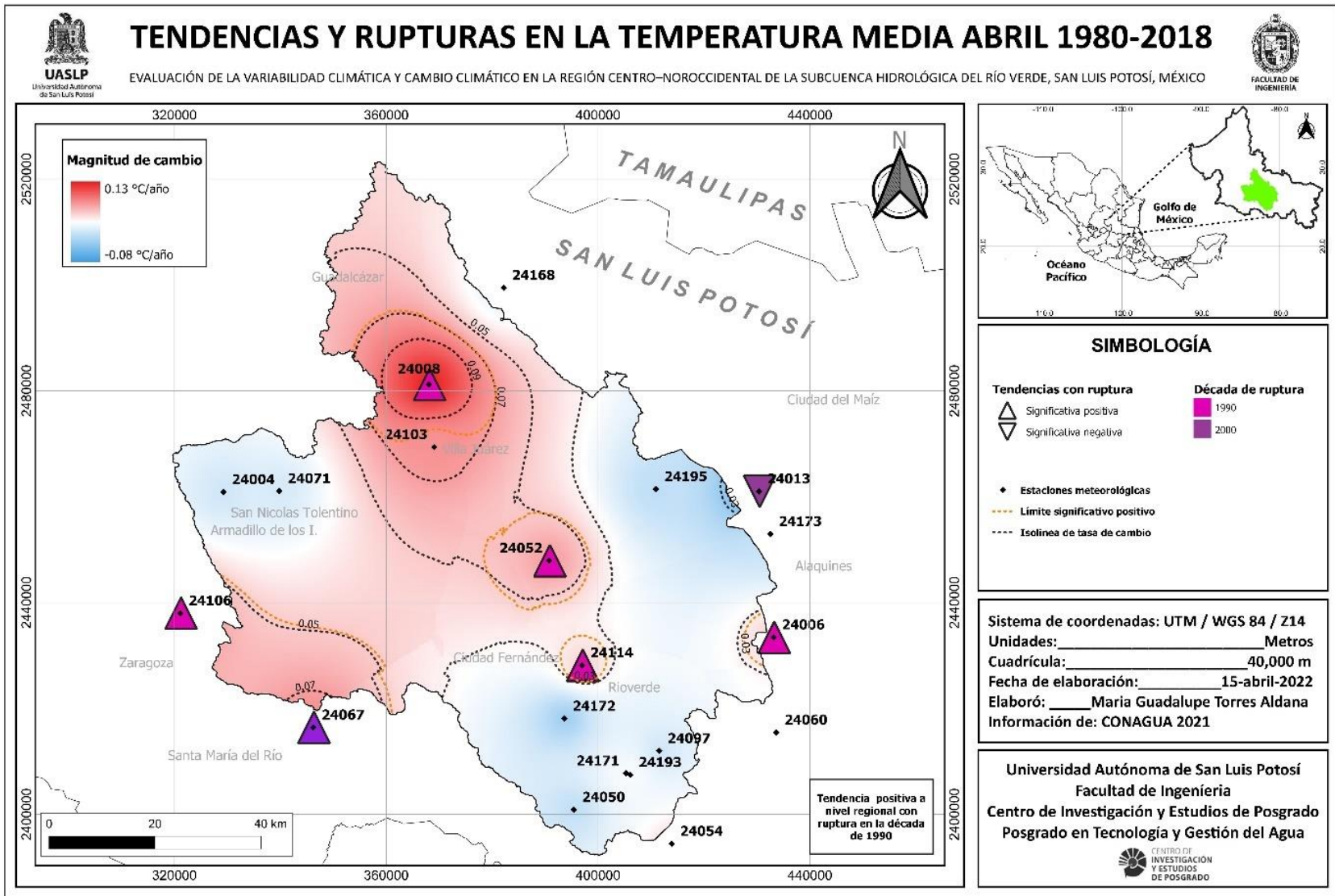


Figura 32. Tendencias y rupturas en la temperatura media abril 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Durante el verano, en el mes de julio, existen tendencias significativas de incremento en el norte, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24052, 24114, 24193) así como al este y oeste de los límites de la zona de estudio (estaciones 24006, 24106 y 24067), con tasas de cambio de 0.03 a 0.10 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24008, 24052 y 24114) y en la década del 2000 (estaciones 24006, 24106 y 24067). A nivel regional se presentó una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.03 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 33).

En el análisis de agosto, se registraron tendencias significativas de incremento en el norte, centro, oeste y sureste de la subcuenca (estaciones 24008, 24052, 24114, 24071 y 24193) así como al este, oeste y sur de los límites de la zona de estudio (estaciones 24006, 24106, 24067 y 24054), con tasas de cambio de 0.03 a 0.10 °C·año<sup>-1</sup>. Sin embargo, se presentaron tendencias significativas de decremento en el sur de la subcuenca (estación 24172) y al este del límite de esta (estación 24013), con tasas de cambio de -0.03 y -0.05 °C·año<sup>-1</sup>, respectivamente. Las rupturas se registraron en las décadas de 1990 (estaciones 24008, 24052, 24114, 24013 y 24054) y del 2000 (estaciones 24006, 24193, 24172, 24106 y 24067). Puesto que las tendencias que predominan son las positivas, a nivel regional se registró una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 34).

Respecto a los resultados del mes de septiembre, se denota la existencia de tendencias significativas de incremento en el norte, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24052, 24114 y 24193), así como al este, oeste y sur de los límites de la región de estudio (estaciones 24006, 24173, 24106, 24067 y 24054), con tasas de cambio de 0.03 a 0.09 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron únicamente en la década de 1990 en la mayoría de las estaciones con tendencias significativas, a excepción de las 24173, 24114 y 24193. En términos regionales se registró una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.04 °C·año<sup>-1</sup> y ruptura en la década de 1990 (Figura 35).

Durante el otoño, específicamente en el mes de octubre se registraron tendencias significativas de incremento en el norte y centro de la subcuenca (estaciones 24008, 24052 y 24114), asimismo en el este y oeste de los límites de la región de estudio (estaciones 24006, 24106 y 24067), con tasas de cambio de 0.03 a 0.09 °C·año<sup>-1</sup>; además, se registró una tendencia significativa de decremento en la zona sur (estación 24172) con tasa de cambio de -0.03 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estaciones 24008, 24052 y 24106) y en la década del 2000 (estaciones 24067 y 24006). En la región de estudio se registró una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.03 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 36).

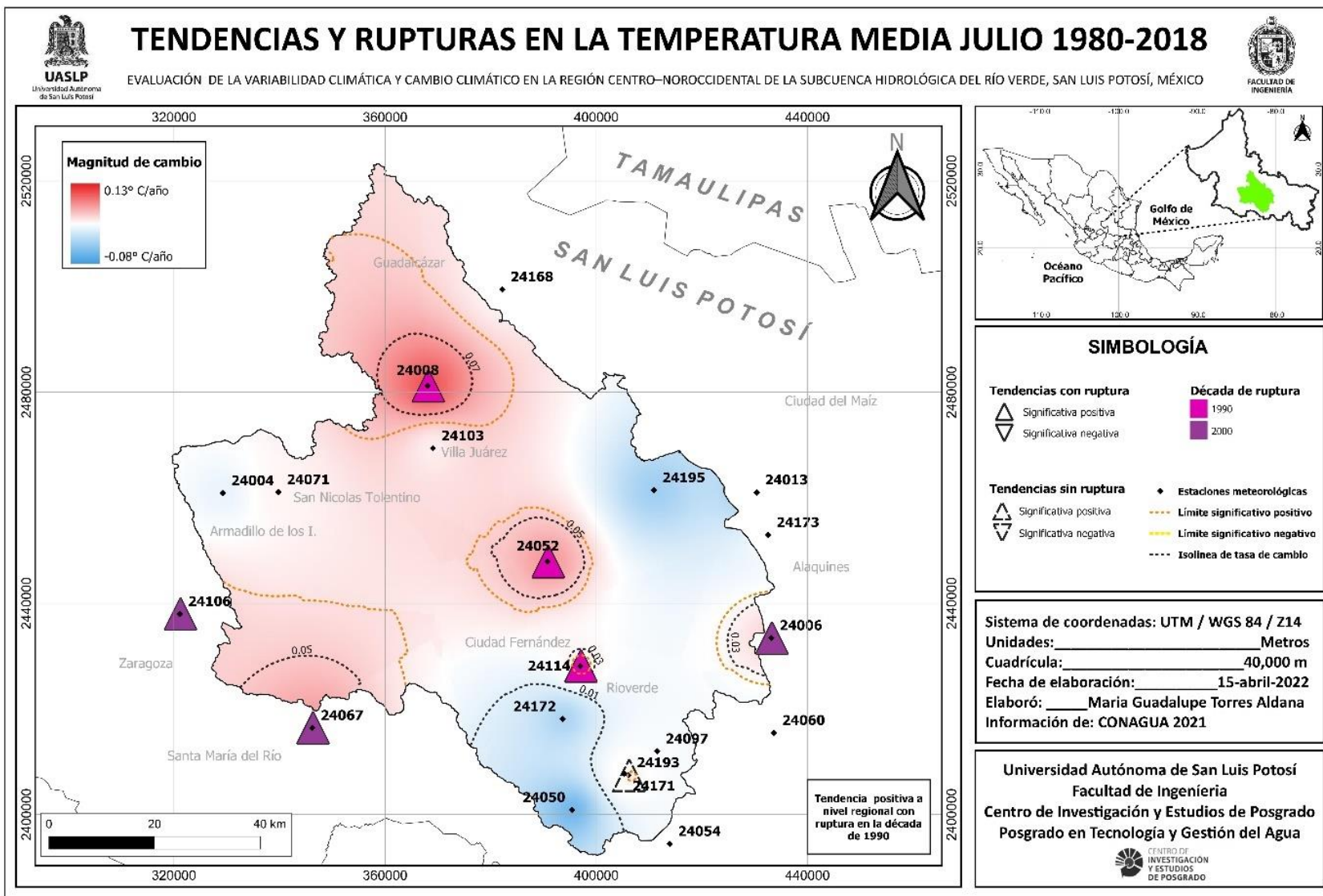


Figura 33. Tendencias y rupturas en la temperatura media julio 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

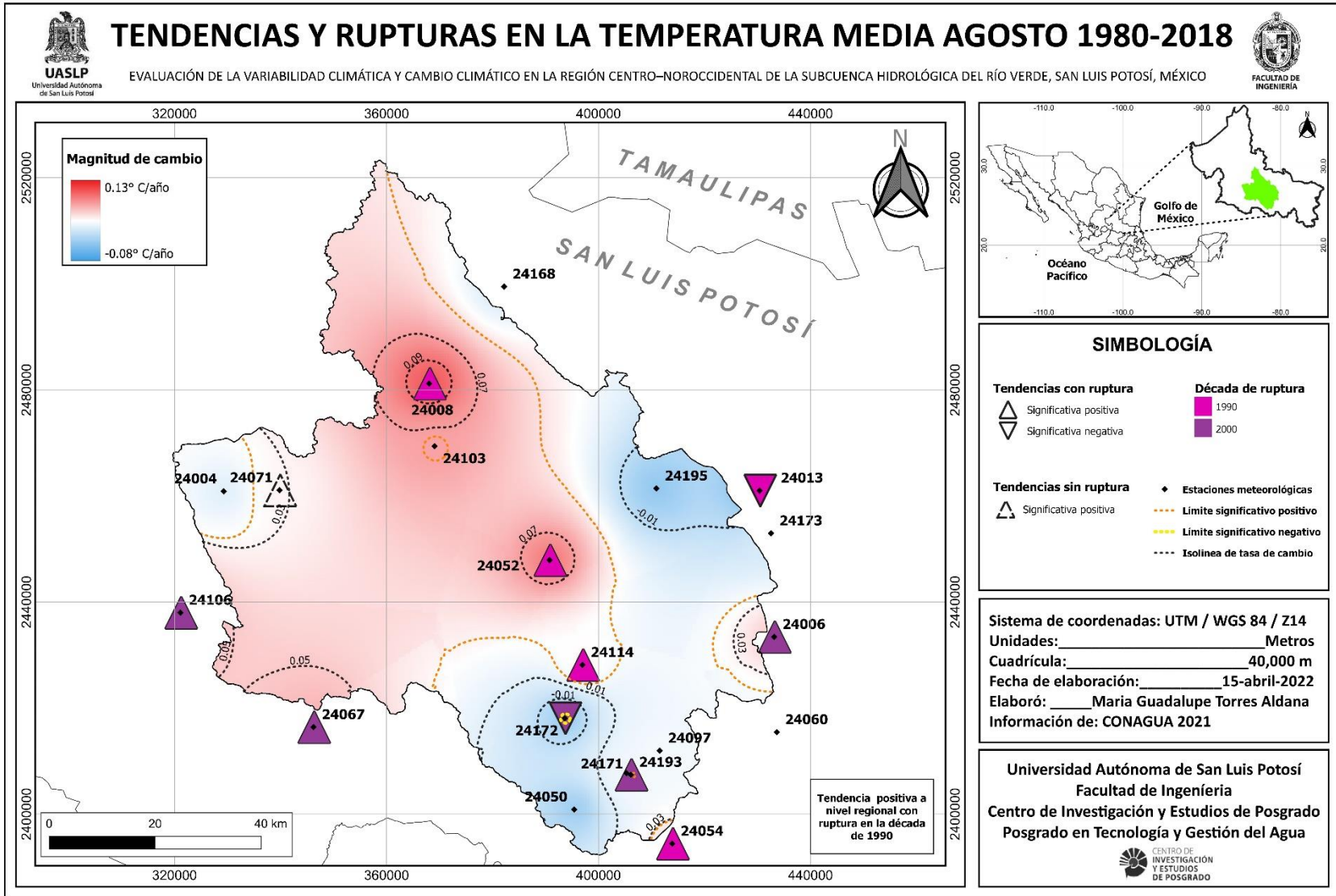


Figura 34. Tendencias y rupturas en la temperatura media agosto 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

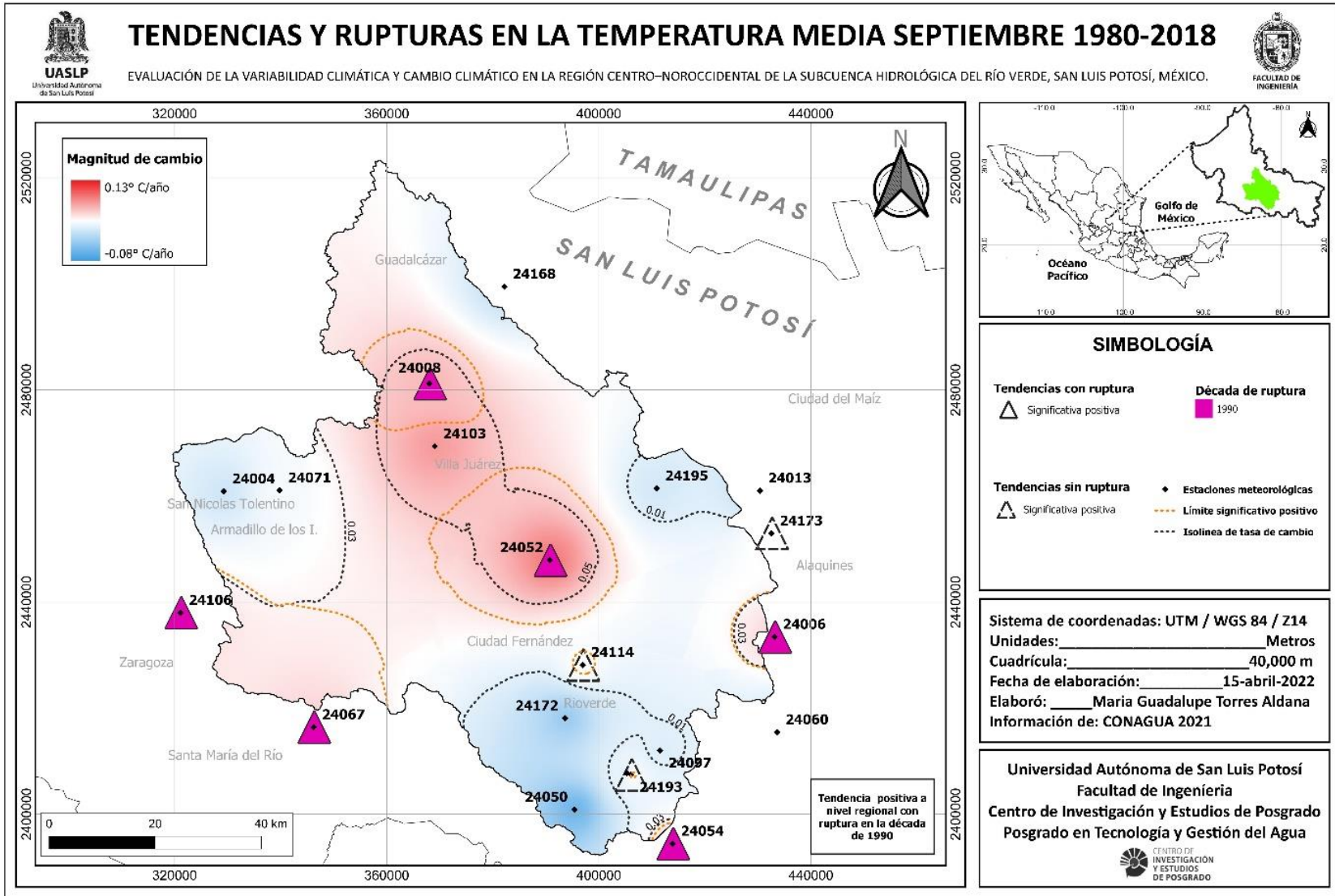


Figura 35. Tendencias y rupturas en la temperatura media septiembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

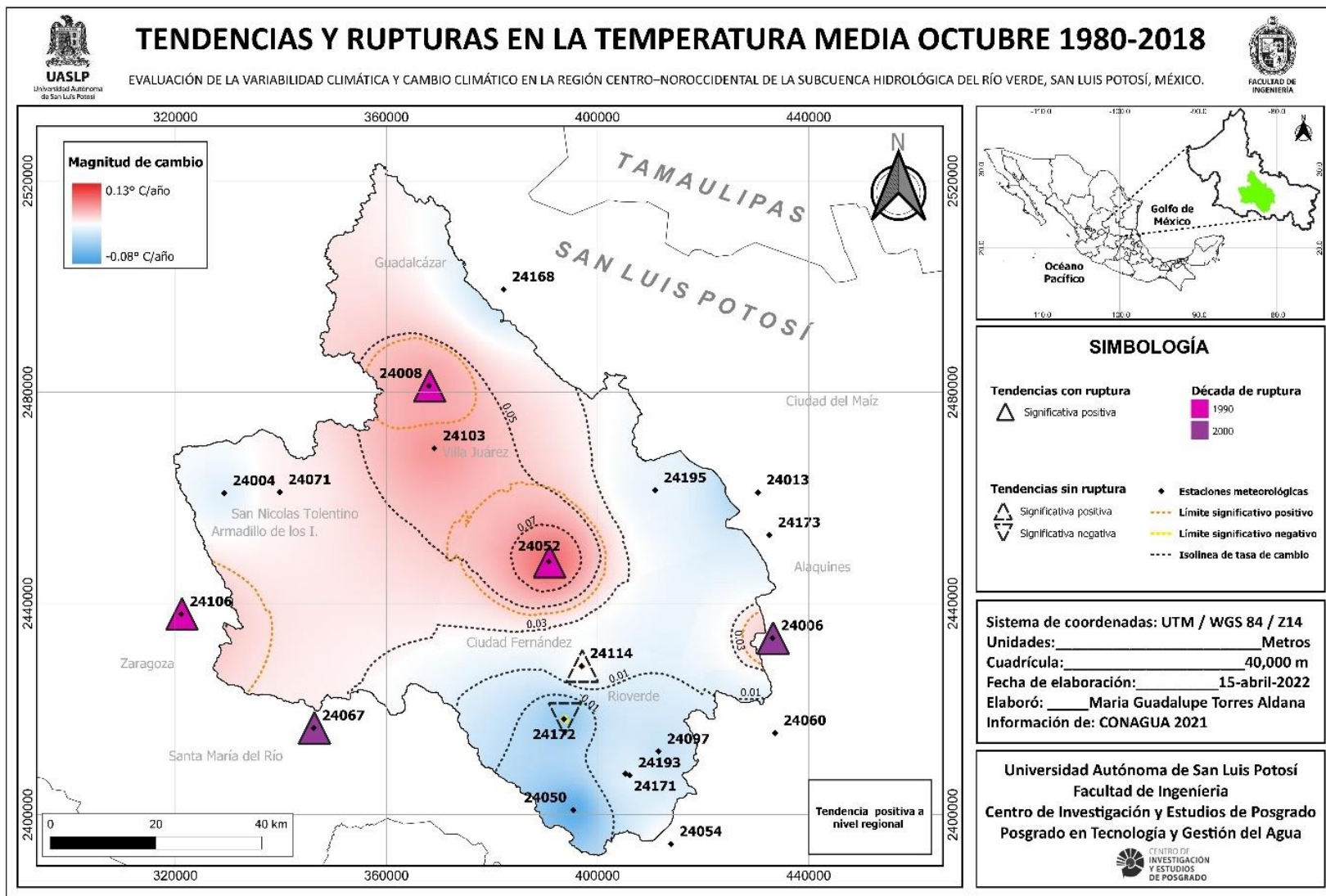


Figura 36. Tendencias y rupturas en la temperatura media octubre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).



Por su parte, el análisis del mes de noviembre registró tendencias significativas de decremento especialmente en el sur de la subcuenca (estaciones 24172, 24050 y 24097), asimismo, al norte y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24168 y 24013), con tasas de cambio de  $-0.05$  a  $-0.08$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ ; además, se registró una tendencia significativa de incremento en la zona oeste (estación 24106) con tasa de cambio de  $0.04$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ . Las rupturas se presentaron en la década de 1990 (estación 24013) y en la década del 2000 (estación 24172). Actualmente no se ha registrado ninguna tendencia significativa a nivel subcuenca (Figura 37).

El análisis del mes de diciembre registró tendencias significativas de incremento en el centro y norte de la subcuenca (estaciones 24008 y 24052), asimismo al oeste y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24168 y 24013), con tasas de cambio de  $0.05$  a  $0.07$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ ; además, se registró una tendencia significativa de decremento en la zona sur de la subcuenca (estación 24172) y al norte de límite de la subcuenca (estación 24168), ambas estaciones con tasa de cambio de  $-0.07$   $^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ . Las rupturas se registraron en las décadas de 1990 (estación 24168) y del 2000 (estación 24172). No se registró una tendencia significativa a nivel regional (Figura 38).

En los resultados correspondientes a la temperatura media anual y a escala mensual predomina la tendencia de incremento en la mayor parte de la región de estudio incluyendo las diversas zonas topográficas de la subcuenca hidrológica del Rio Verde (región montañosa y zona de valle), sin embargo, en noviembre presentó un comportamiento de decremento principalmente en el valle en el interior y zonas contiguas al límite de la subcuenca en diciembre los incrementos de temperaturas se concentran en el valle tanto en la región más baja como la cercana a la zona montañosa.

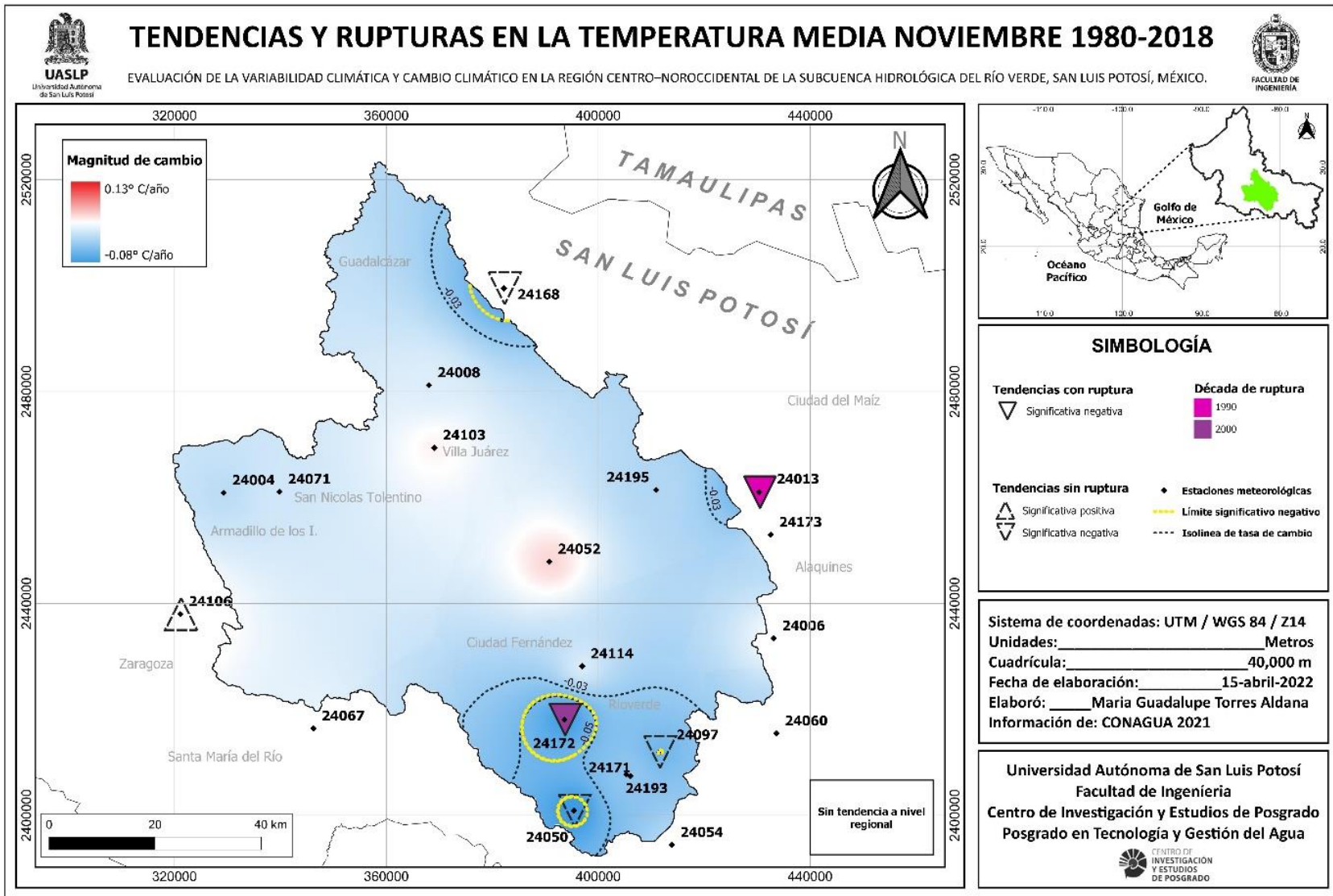


Figura 37. Tendencias y rupturas en la temperatura media noviembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

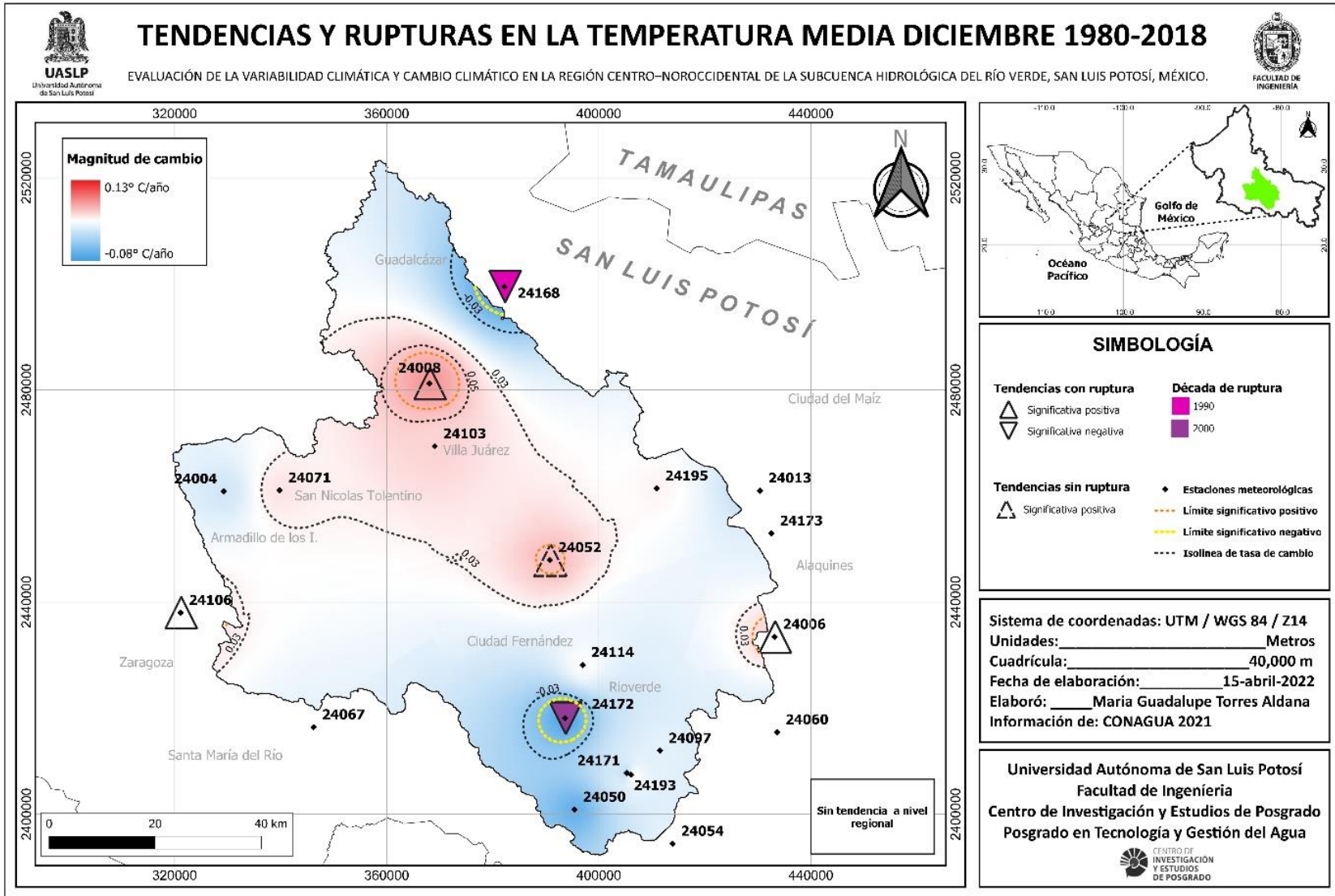


Figura 38. Tendencias y rupturas en la temperatura media diciembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Por otro lado, los resultados del análisis de los registros anuales de la temperatura mínima anual (1980-2018), denotaron tendencias significativas de incremento en el oeste, centro y sur de la región de estudio (estaciones 24071, 24114 y 24193), así como al oeste y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24106, 24173 y 24006), con tasas de cambio de 0.03 a 0.09 °C·año<sup>-1</sup>; asimismo, existen tendencias significativas de disminución en el este y sur de la región de estudio (estaciones 24195, 24172 y 24050) y de igual manera al norte del límite de la subcuenca (estación 24168), con magnitudes de cambio de -0.04 a -0.08 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en las décadas de 1980 (estación 24071), 1990 (estaciones 24114, 24193 y 24173) y del 2000 (estaciones 24195, 24172, 24050, 24106, 24006 y 24168). En términos regionales aún no se registró alguna tendencia significativa (Figura 39).

Durante la primavera, específicamente los resultados del mes de mayo presentaron tendencias significativas de decremento en el este y sur de la subcuenca (estaciones 24195, 24172, 24097 y 24050), así como al este del límite de la región de estudio (estación 24013), con tasas de cambio de -0.07 a -0.14 °C·año<sup>-1</sup>; no obstante, se registró una tendencia significativa de incremento en la zona oeste del límite de la subcuenca (estación 24106) con tasa de cambio de 0.09 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en las décadas de 1990 (estación 24106), 2000 (estaciones 24195 y 24172) y 2010 (estaciones 24097 y 24050). A nivel regional no se registró tendencia significativa (Figura 40).

Los resultados correspondientes a junio (1980-2018), indicaron que existen tendencias significativas de incremento en el oeste, centro y sureste de la subcuenca (estaciones 24071, 24052 y 24193) así como al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24106 y 24006), con tasas de cambio de 0.04 a 0.16 °C·año<sup>-1</sup>; por otra parte, se registró una tendencia significativa de decremento en la zona sur de la subcuenca (estación 24172 y 24050) con tasas de cambio de -0.06 y -0.10 °C·año<sup>-1</sup>, respectivamente. Las rupturas se presentaron en las décadas de 1990 (estaciones 24071, 24052, 24193 y 24106) y del 2000 (estaciones 24006 y 24172); En términos regionales no se registró tendencia significativa (Figura 41).

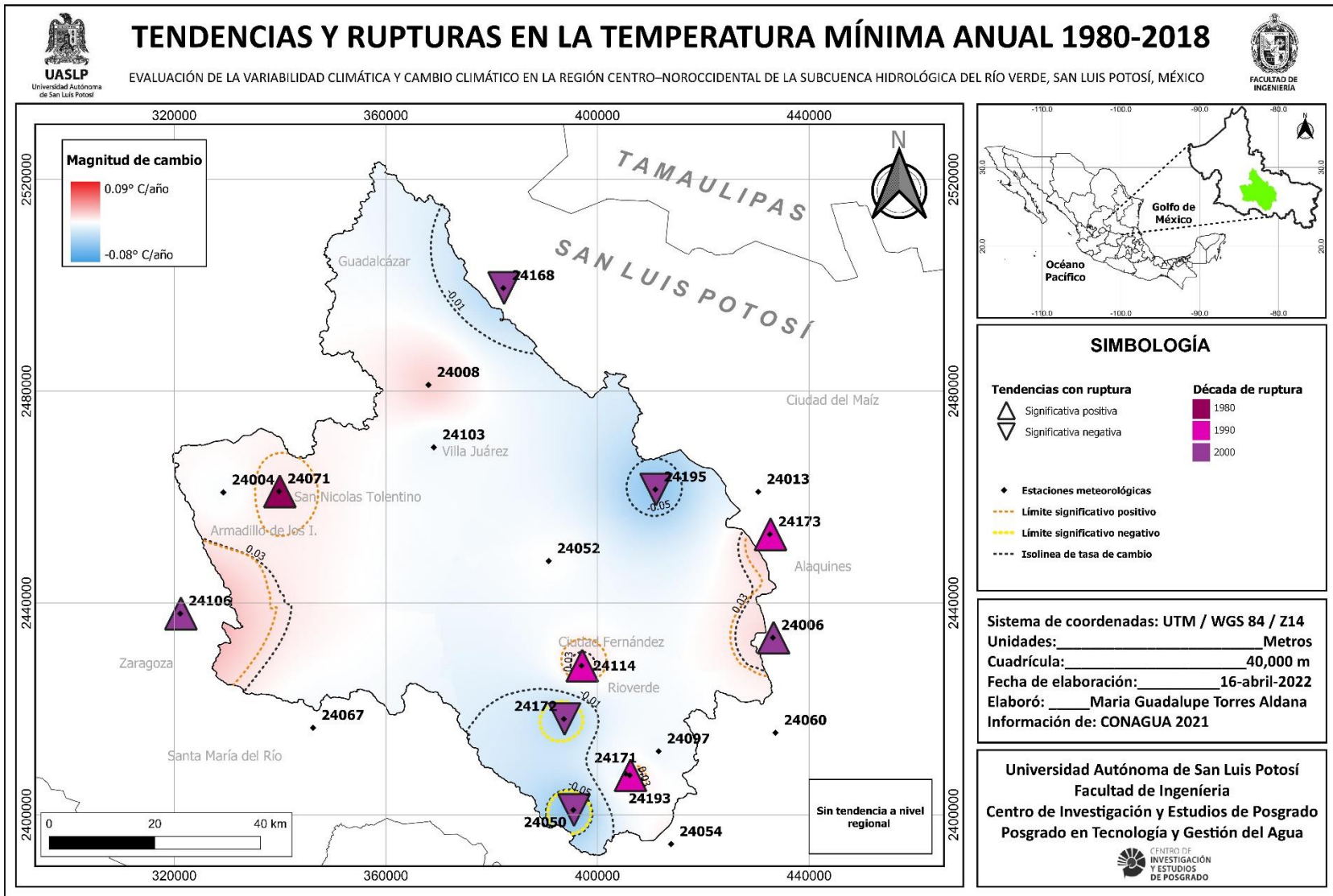


Figura 39. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

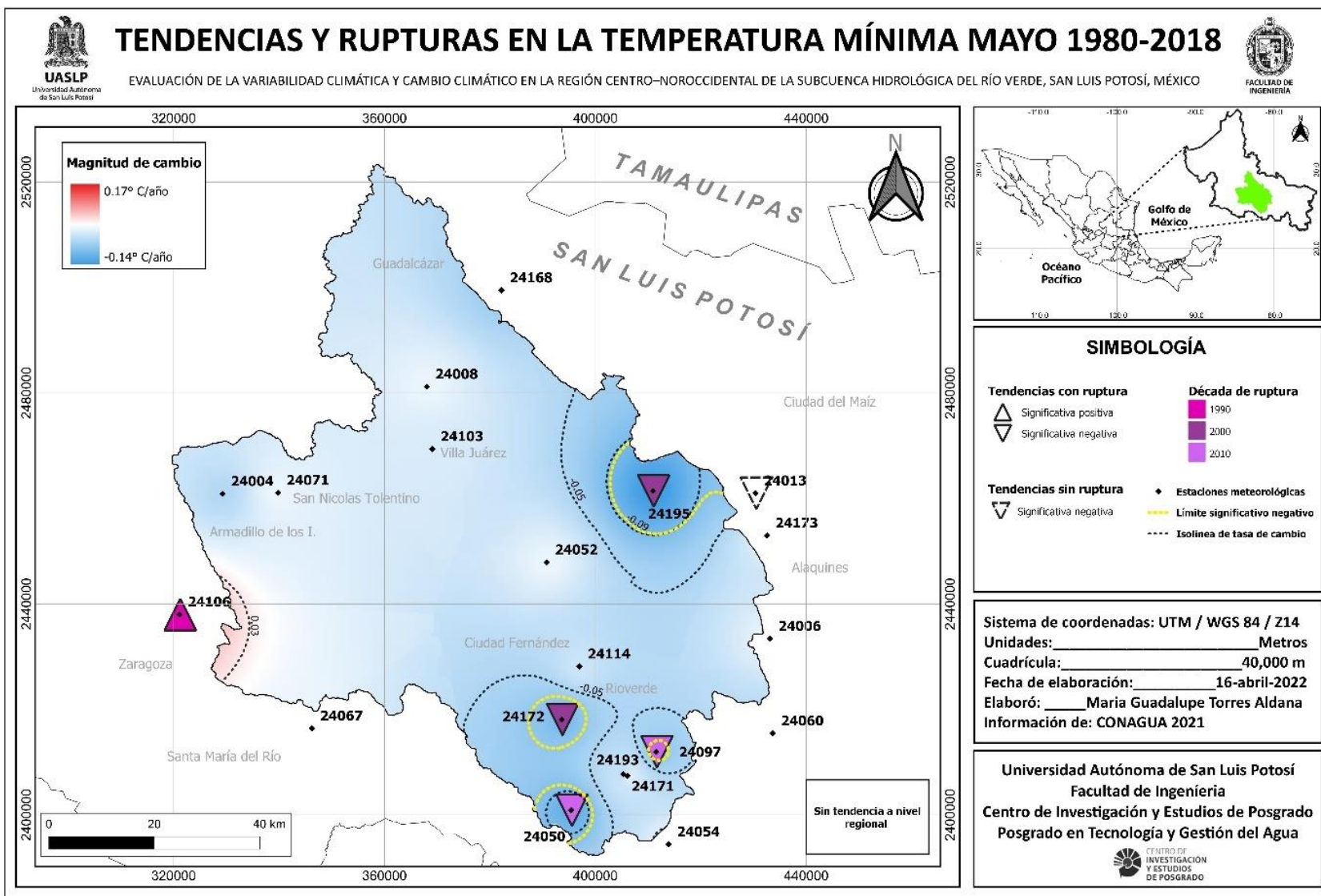


Figura 40. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima mayo 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

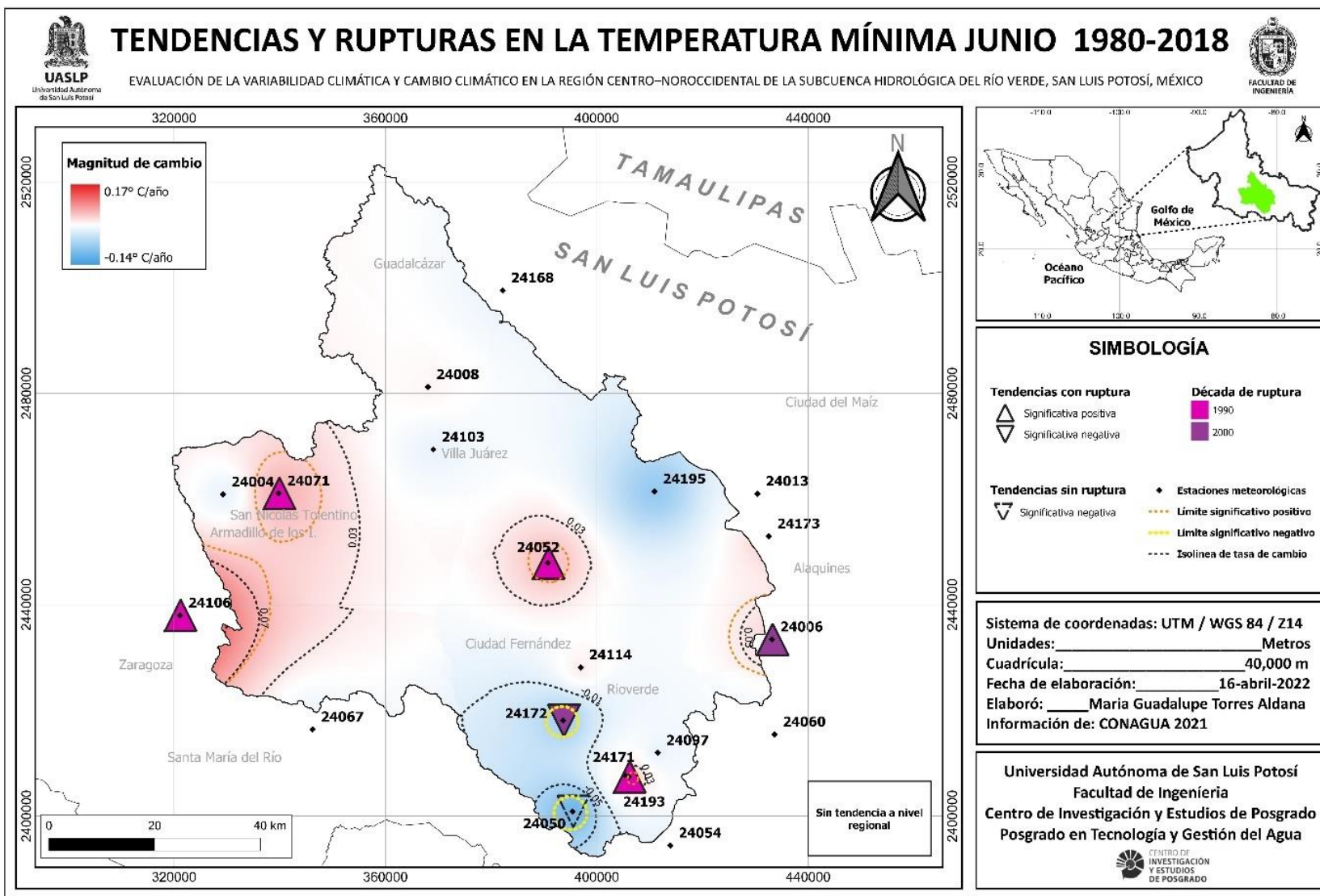


Figura 41. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima junio 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

En el verano, el análisis de los datos de temperatura mínima del mes de julio (1980-2018), registró tendencias significativas de incremento en el oeste, norte, centro, y sur de la subcuenca (estaciones 24071, 24008, 24052 y 24193) así como al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24106, 24006 y 24173), con tasas de cambio de 0.05 a 0.14 °C·año<sup>-1</sup>; por otra parte, se registraron tendencias significativas de decremento en la zona noreste (estación 24195) y sur de la subcuenca (estación 24172 y 24050) con tasa de cambio de -0.07 a -0.11 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en las décadas de 1980 (estación 24193), 1990 (estación 24195 y 24008) y 2000 (estaciones 24071, 24172, 24106, 24173 y 24006). No se registró tendencia significativa a escala regional (Figura 42).

Por su parte, el mes de agosto, registró tendencias significativas de incremento en el oeste, norte, centro y sureste de la región de estudio (estaciones 24071, 24008, 24052, 24114 y 24193) así como al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24106 y 24173), con tasas de cambio de 0.05 a 0.11 °C·año<sup>-1</sup>. Sin embargo, se registraron tendencias significativas de decremento en la zona noreste (estación 24195) y sur de la subcuenca (estación 24172 y 24050) con tasa de cambio de -0.05 a -0.11 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en las décadas de 1990 (estación 24071, 24008, 24195, 24172 y 24106) y del 2000 (estaciones 24052, 24114, 24193 y 24173). A nivel regional existe una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.02 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 43).

El mes de septiembre, registró tendencias significativas de incremento en el oeste, centro y sureste de la región de estudio (estaciones 24071, 24052 y 24193) así como al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24106, 24173 y 24006), con tasas de cambio de 0.09 a 0.14 °C·año<sup>-1</sup>. Las rupturas se presentaron en la década del 2000 en todas las estaciones con tendencia significativa a excepción de la zona sureste (estación 24193). A nivel regional se registró una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio de 0.06 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 44).

El comportamiento de las temperaturas mínimas extremas a escala anual no posee un comportamiento espacial definido, respecto a los resultados de la escala mensual, durante el mes de mayo, se presentó un decremento en el valle; durante junio, julio y agosto se presentó un incremento en la zona montañosa y en el valle las tendencias son contrastantes, finalmente, en septiembre se presentó un incremento en ambas zonas topográficas (elevadas y bajas).



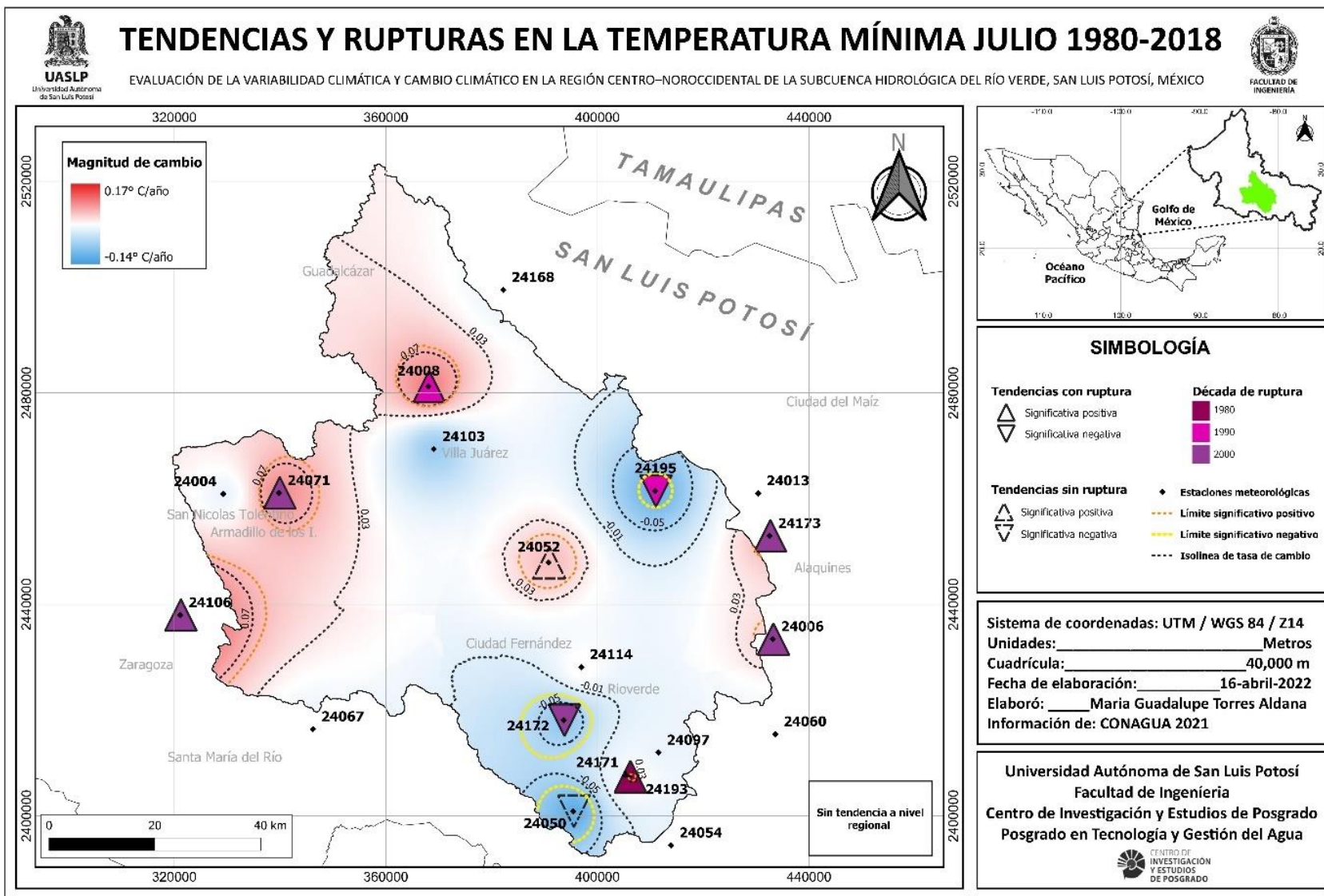


Figura 42. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima julio 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

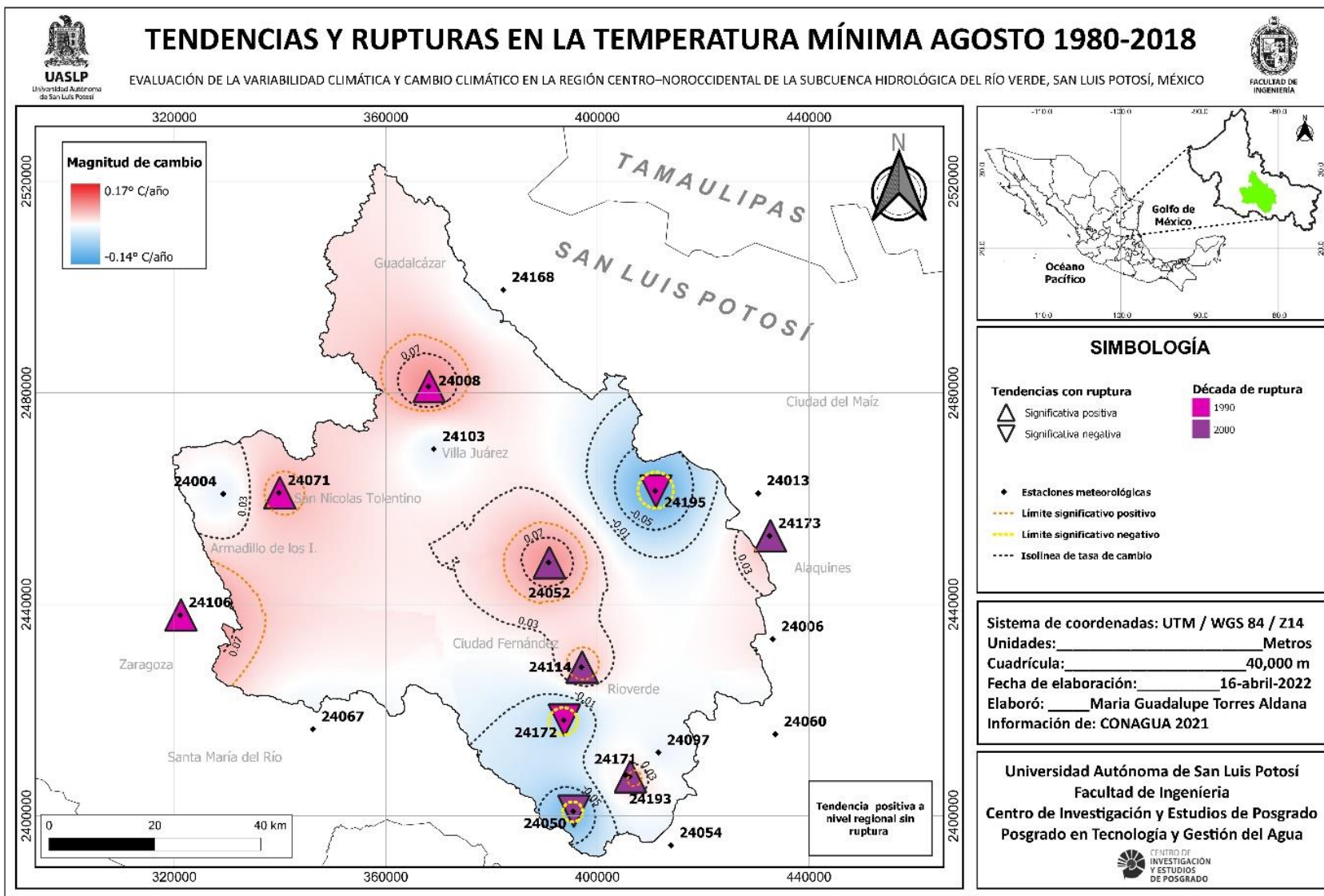


Figura 43. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima agosto 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

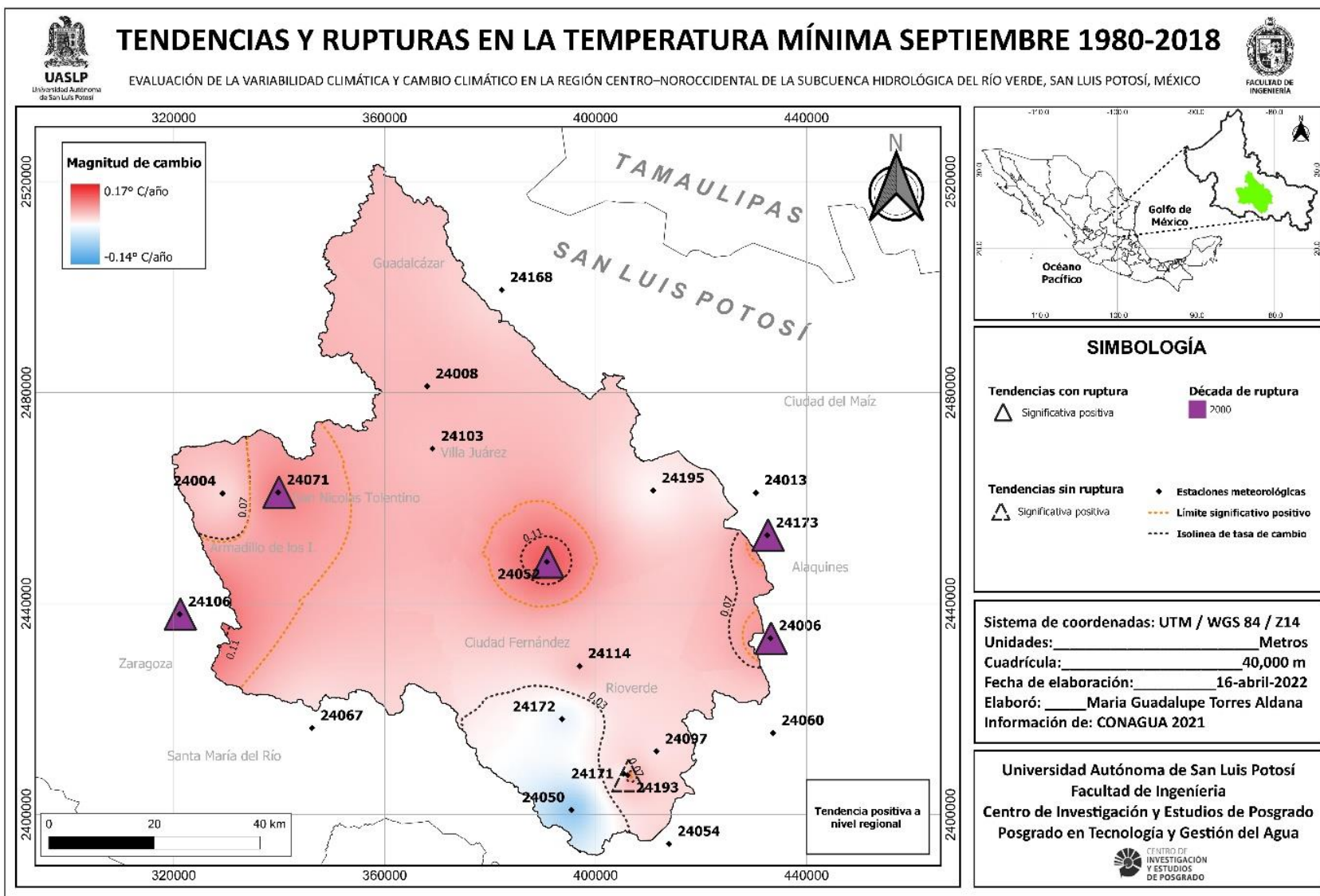


Figura 44. Tendencias y rupturas en la temperatura mínima septiembre 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

## 2.11 Análisis del índice de precipitación estandarizado (SPI)

El índice de precipitación estandarizado (SPI), representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico, que por lo tanto representa el valor cero; un aspecto positivo a resaltar del SPI es que cuantifica el déficit (valores negativos) y los excesos significativos (valores positivos) de precipitación respecto a las condiciones normales (Martínez-Austria & Irula-Luztow, 2016).

En el cálculo del SPI se considera una distribución Gamma para el histograma de precipitación, la función de densidad de probabilidades se transforma (mediante una transformación equiprobable) en la de una distribución normal. El SPI, se calcula como la diferencia entre la precipitación estacional estandarizada respecto de la media, entre la desviación estándar como se muestra a continuación (Martínez-Austria & Irula-Luztow, 2016):

$$SPI = \frac{X_{ij} - X_{im}}{\sigma}$$

Donde  $X_{ij}$  es la precipitación estacional en la  $i$ -ésima estación y en la  $j$ -ésima observación y  $x_{im}$  es la media estacional y  $\sigma$  la desviación estándar.

Los valores del SPI se caracterizan desde condiciones extremadamente húmedas (Valor  $\leq 2$ ) hasta extremadamente secas (Valor  $\geq 2$ ); la clasificación de los rangos es establecido por la CONAGUA como se presenta a continuación (Tabla 19):

Tabla 19. Valores del Índice de Precipitación Estandarizado y su clasificación de rangos (CONAGUA, 2022)

Valor de SPI	Condición
$\geq 2.0$	Excepcionalmente Húmedo
1.60 a 1.99	Extremadamente Húmedo
1.30 a 1.59	Muy Húmedo
0.80 a 1.29	Moderadamente Húmedo
0.51 a 0.79	Ligeramente Húmedo
-0.50 a 0.50	Cercano a lo Normal
-0.79 a -0.51	Ligeramente Seco
-1.29 a -0.80	Moderadamente Seco
-1.59 a -1.30	Muy Seco
-1.99 a -1.60	Extremadamente Seco
$\leq -2.0$	Excepcionalmente Seco

El SPI, se calculó a dos escalas temporales: trimestral (SPI-3) y anual (SPI-12), para cada una de las 23 estaciones meteorológicas, con el objetivo de analizar los eventos de sequía meteorológica (escala trimestral) e hidrológica (escala anual) en la región de estudio durante el periodo 1980-2018, dicho proceso se realizó en el programa de cómputo denominado “The Drought Indices Calculator” (DRIN-C), disponible en Tigkas *et al.* (2015).

Los datos correspondientes a la precipitación mensual de cada estación meteorológica se ingresaron en archivos de Microsoft Excel tipo (xlsx), con orden mensual (octubre-septiembre) y secuencia anual (1980-81, 1981-82, ...); posteriormente, en la sección del programa DRIN-C denominada “Data Management-Precipitation data file (mm)”, se ingresó el archivo de cada estación. Asimismo, se estableció el primer año del análisis (1980) y el número de años a analizar (39), posteriormente se seleccionó el apartado “Process-Drought Indices” y se marcó la opción “SPI” (Standardised Precipitation Index), se especificó el Output file, se indicó el tipo de distribución “Gamma”, se definió el “Reference Period” (3 y 12 months), se especificó el “Time Step” (Monthly) y finalmente se calculó el SPI en la opción “Calculate”.

A partir de los valores del SPI-3 y SPI-12, se aplicó la prueba de Mann-Kendall a escala mensual, con el objetivo de identificar tendencias significativas en los eventos de sequías meteorológicas e hidrológicas. Las tendencias a escala mensual se presentan puntualmente es decir de manera local, respecto al SPI-3, las tendencias que se registraron son de incremento en el SPI, principalmente en la temporada de otoño (octubre, noviembre y diciembre) y se concentran en pocas estaciones localizadas al sureste de la subcuenca, mientras que el resto en los alrededores de la región de estudio (Tabla 20). Respecto a los resultados del SPI-12, las tendencias son de incremento y se concentran principalmente en tres estaciones meteorológicas, las tendencias se presentan en la mayor parte de los meses a excepción de la estación localiza al este del límite de la subcuenca (Tabla 21).

Por otro lado, se analizaron las tendencias del SPI-3 y SPI-12 clasificando los valores por estación húmeda (junio-octubre) y estación seca (noviembre-mayo) finalmente, se consideraron todos los valores del SPI en orden cronológico y se analizaron las tendencias a escala anual.

En términos generales, los resultados de las tendencias significativas SPI-3 en las tres escalas mencionadas son positivas (condiciones más húmedas), sin embargo, se localizan principalmente en estaciones meteorológicas cercanas a los límites de la región de estudio, mientras que al interior de la subcuenca, las tendencias son mayormente negativas, no obstante, la gran mayoría no son significativas (Tabla 22); respecto a los resultados del SPI-12, son similares al SPI-3, únicamente que en las tendencias negativas del interior de la subcuenca, existe mayor cantidad de tendencias significativas (Tabla 23).

Tabla 20. Tendencias a nivel mensual en el SPI-3 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIONES METEREOLÓGICAS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Las Tablas	-1.5	-1.7	-1.2	-1.1	-1.2	-0.6	-1.4	-1.2	-1.3	-0.5	-0.6	0.3
Vigas	0.3	-0.5	0.3	-0.3	<b>-2.1</b>	-0.6	-0.4	0.8	0.2	1.2	1.0	2.0
Paredes	0.3	0.4	1.1	0.8	-0.4	0.9	0.9	1.3	1.5	<b>2.8</b>	<b>2.6</b>	<b>2.1</b>
San José Del Tapanco	0.8	-0.4	0.8	-0.5	-1.2	-0.1	0.3	0.7	0.6	<b>2.3</b>	<b>2.3</b>	<b>2.6</b>
Manantial Media Luna	-0.9	-1.5	-0.3	-0.4	-1.6	-0.9	-0.5	0.2	0.7	1.9	1.7	1.6
Huizachal	-1.5	-1.4	-0.5	-1.1	-1.7	-0.7	0.0	0.3	0.4	1.4	1.3	1.1
Rioverde DGE	0.3	-0.3	0.7	-0.7	-1.3	-0.7	0.2	0.5	0.8	1.7	<b>2.1</b>	1.9
Pastora	-1.1	-1.7	0.0	-0.8	-0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.4	0.6	0.2	-0.4
San Nicolás Tolentino	0.1	-0.4	0.7	0.0	-1.0	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	1.2	1.1	0.8
Presa Álvaro Obregón	-0.4	-1.3	1.1	-0.1	-1.6	-0.7	-0.5	0.3	-0.4	0.5	0.3	1.0
Cerritos	-0.9	-1.1	-0.2	-1.0	-1.7	-0.9	-0.3	0.4	1.3	1.4	1.9	0.0
Cárdenas	-0.4	-1.3	-0.1	-0.6	<b>-2.3</b>	-0.6	-0.5	0.6	-0.1	0.9	0.9	0.8
Pedro Montoya	-0.2	-0.2	1.1	0.2	-0.4	0.9	0.4	0.7	0.5	2.0	1.9	<b>2.6</b>
Rayón	-0.7	-1.5	-0.3	0.2	-1.2	-0.7	-0.6	-0.1	-0.2	0.3	0.4	1.1
Buenavista	0.5	0.2	1.1	-0.4	0.1	1.9	1.8	<b>2.7</b>	<b>2.9</b>	<b>3.3</b>	<b>2.2</b>	1.4
Villa Juárez	-0.1	-0.5	-0.1	-0.7	-1.1	-0.6	-1.0	-0.9	0.3	0.5	0.6	-0.1
San José Albuquerque	-1.3	-1.4	0.1	-0.2	-0.7	-0.5	-0.6	1.1	<b>2.3</b>	<b>2.6</b>	1.5	0.1
Colonia Álvaro Obregón	0.3	0.2	1.7	-0.2	-0.3	0.9	1.6	1.7	1.5	1.9	<b>2.7</b>	1.5
Armadillo De Los Infante	-0.9	-0.8	0.5	0.7	-0.5	-1.2	-0.6	-0.2	0.5	1.3	1.1	0.2
Zaragoza	-0.6	-0.4	0.2	-0.6	-0.7	0.2	0.7	1.2	1.6	2.0	1.6	0.1
Xoconostle	0.6	1.2	1.7	0.1	-0.9	0.1	0.4	0.1	0.9	<b>2.2</b>	1.8	0.9
San Francisco	-0.6	-1.2	-0.6	-0.3	-1.3	-0.2	0.0	0.1	-0.5	-1.5	-0.9	-0.2
La Morita	1.2	0.2	1.1	0.5	0.3	0.8	1.0	1.4	0.9	1.5	1.8	<b>2.1</b>
Región De Estudio	-0.5	-1.0	-0.2	-0.6	-1.2	-0.2	-0.2	0.3	0.1	1.9	1.3	0.8

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Tabla 21. Tendencias a nivel mensual en el SPI-12 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIONES METEREOLÓGICAS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Las Tablas	-0.30	-0.20	-0.30	-0.50	-0.55	-0.68	-0.93	-1.16	-1.16	-0.91	-0.75	-0.68
Vigas	0.80	0.78	0.58	0.68	0.65	0.63	0.60	0.18	0.13	0.08	0.18	0.48
Paredes	<b>2.74</b>	<b>2.92</b>	<b>2.51</b>	<b>2.49</b>	<b>2.34</b>	<b>2.36</b>	1.91	1.94	<b>2.06</b>	<b>2.09</b>	<b>2.01</b>	<b>2.44</b>
San José Del Tapanco	1.81	1.71	1.56	1.79	1.76	1.73	1.31	1.51	1.13	1.31	1.16	1.50
Manantial Media Luna	1.31	1.46	1.56	1.13	0.96	0.91	0.45	0.03	0.25	0.13	0.38	1.04
Huizachal	-0.25	0.05	0.00	0.00	0.35	0.36	0.18	0.03	-0.18	-0.38	-0.31	-0.19
Rioverde DGE	1.28	1.41	1.18	1.31	1.01	1.08	0.50	0.03	0.38	0.40	0.35	0.85
Pastora	-0.23	-0.15	-0.33	-0.63	-0.55	-0.10	-0.60	-1.26	-0.94	-0.50	-0.47	-0.05
SAN Nicolás Tolentino	-0.53	-0.47	-0.33	-0.21	-0.10	-0.18	-0.53	-0.57	-0.50	-0.62	-0.73	-0.12
Presa Álvaro Obregón	0.60	0.55	0.48	0.38	0.53	0.28	0.00	-0.03	-0.53	-0.38	-0.28	0.07
Cerritos	-0.19	-0.03	-0.10	-0.09	-0.03	-0.28	-0.65	-0.60	-0.33	-0.53	-0.55	0.15
Cárdenas	1.03	0.80	0.73	0.80	0.85	0.50	0.23	-0.08	0.18	0.30	0.36	0.29
Pedro Montoya	1.58	1.71	1.47	1.28	1.36	1.41	1.46	1.21	0.85	0.88	1.06	1.13
Rayón	0.60	0.83	0.75	0.80	0.70	0.31	0.03	-0.18	0.15	0.00	0.08	0.07
Buenavista	<b>2.40</b>	<b>2.31</b>	<b>2.34</b>	<b>2.01</b>	<b>2.06</b>	<b>2.14</b>	<b>2.01</b>	<b>2.04</b>	<b>3.07</b>	<b>3.02</b>	<b>2.82</b>	<b>2.66</b>
Villa Juárez	-0.60	-0.60	-0.69	-0.70	-0.97	-0.78	-1.03	-1.38	-1.11	-1.28	-0.98	-0.63
San José Albuquerque	1.01	1.01	0.98	0.84	0.78	1.04	0.53	0.15	0.45	0.65	0.72	0.94
Colonia Álvaro Obregón	<b>2.69</b>	<b>2.68</b>	<b>2.79</b>	<b>2.93</b>	<b>2.82</b>	<b>2.19</b>	1.91	1.68	1.89	1.95	<b>2.06</b>	<b>2.56</b>
Armadillo De Los Infante	0.35	0.52	0.64	0.68	0.80	0.28	-0.13	-0.21	-0.33	-0.55	-0.08	0.46
Zaragoza	1.11	1.09	1.18	1.01	0.83	0.77	0.45	0.38	0.83	0.83	1.06	1.55
Xoconostle	1.42	1.55	1.73	1.68	1.63	1.68	1.21	0.73	1.02	1.16	1.11	1.45
San Francisco	-0.58	-0.40	-0.58	-0.55	-0.57	-0.58	-0.63	-0.88	-0.91	-1.02	-0.78	-0.63
La Morita	<b>1.99</b>	1.94	1.84	<b>2.04</b>	1.89	1.81	1.48	1.26	1.04	1.56	1.68	1.74
Región De Estudio	0.55	0.98	0.98	0.80	0.38	0.43	-0.15	-0.08	-0.25	-0.20	-0.20	0.44

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Tabla 22. Tendencias a escala anual, estación seca y húmeda en el SPI-3 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEREOLÓGICA	CLAVE	ANUAL	ESTACIÓN SECA	ESTACIÓN HÚMEDA
Las Tablas	24195	<b>-3.33</b>	<b>-2.59</b>	<b>-2.34</b>
Vigas	24097	0.71	0.42	0.56
Paredes	24050	<b>4.39</b>	<b>2.94</b>	<b>3.25</b>
San José Del Tapanco	24193	<b>2.80</b>	1.90	1.87
Manantial Media Luna	24172	0.50	-0.13	0.79
Huizachal	24171	-0.39	-1.19	0.69
Rioverde DGE	24114	1.53	0.86	1.25
Pastora	24052	-1.17	-1.72	0.03
SAN Nicolás TOLENTINO	24071	0.52	0.63	-0.18
Presa Álvaro Obregón	24173	-0.49	-0.36	-0.34
Cerritos	24008	-0.25	-0.95	0.78
Cárdenas	24006	-0.66	-0.84	0.07
Pedro Montoya	24054	<b>2.76</b>	<b>2.01</b>	1.88
Rayón	24060	-0.68	-0.44	-0.51
Buenavista	24168	<b>5.23</b>	1.76	<b>5.65</b>
Villa Juárez	24103	-1.16	-0.81	-0.67
San José Albuquerque	24067	0.93	-0.80	<b>2.26</b>
Colonia Álvaro Obregón	24013	<b>4.17</b>	<b>2.32</b>	<b>3.51</b>
Armadillo De Los Infante	24004	0.62	0.56	0.07
Zaragoza	24106	1.90	-0.02	<b>2.66</b>
Xoconostle	24179	<b>2.96</b>	<b>2.22</b>	1.67
San Francisco	24066	-1.86	-1.74	-0.90
La Morita	24159	<b>3.96</b>	<b>2.85</b>	<b>2.63</b>
Región De Estudio	---	0.46	-0.39	0.92

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Enseguida, se presentan los resultados de las tendencias del SPI-3 de manera espacial (Figuras 45, 46 y 47); en las tres escalas temporales del SPI-3, las tendencias significativas son principalmente positivas (condiciones más húmedas) y se concentran en las zonas topográficas altas (norte, oeste y sur), a excepción de la estación húmeda la cual presentó tendencias negativas en la zona oeste; por su parte, la zona de valle (al límite de la región alta), existen tendencias negativas y en la zona baja del valle las tendencias registradas son contrastantes, predominando las de decremento, sin embargo, solo una estación (24195) es significativa.



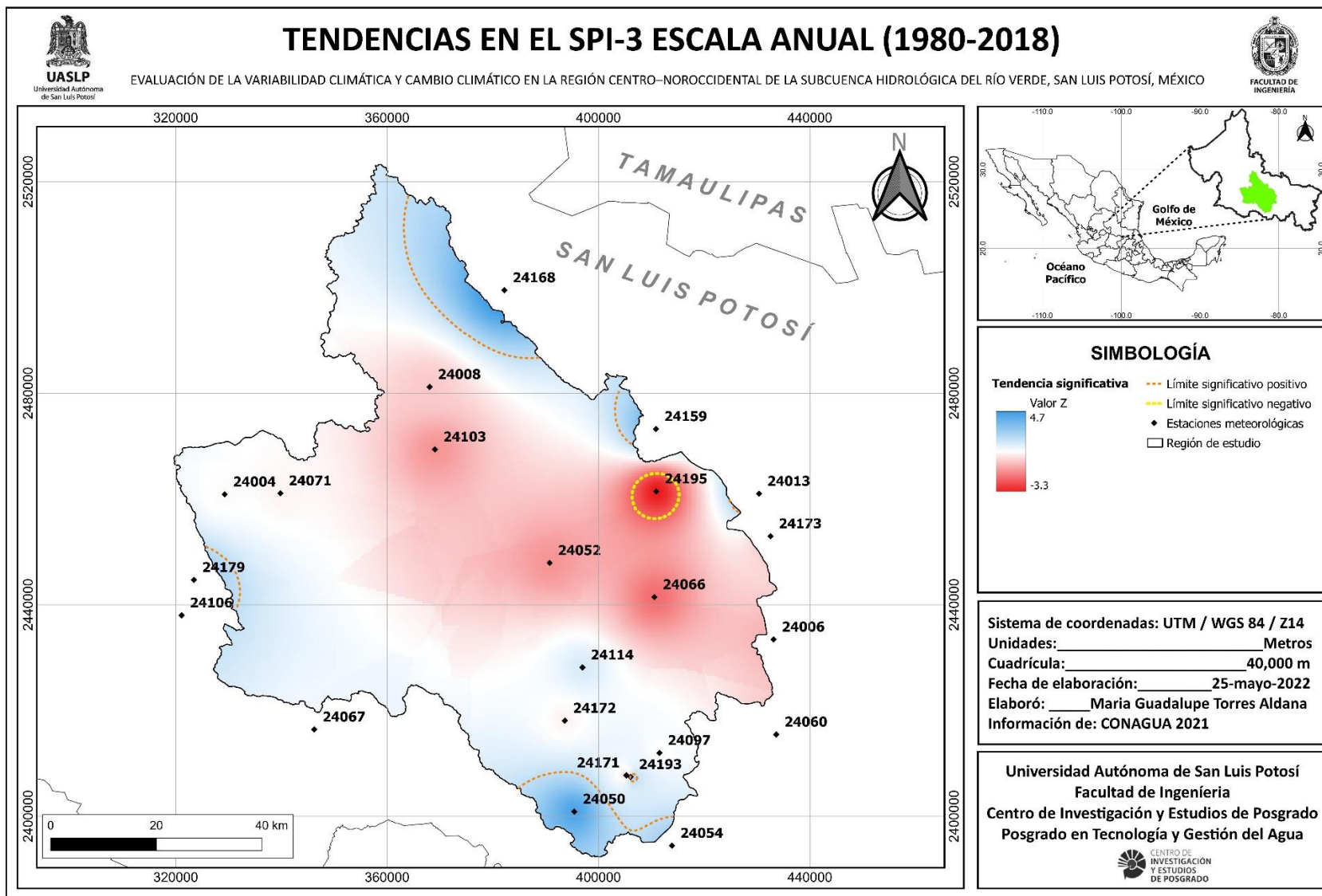


Figura 45. Tendencias en el SPI-3 escala anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

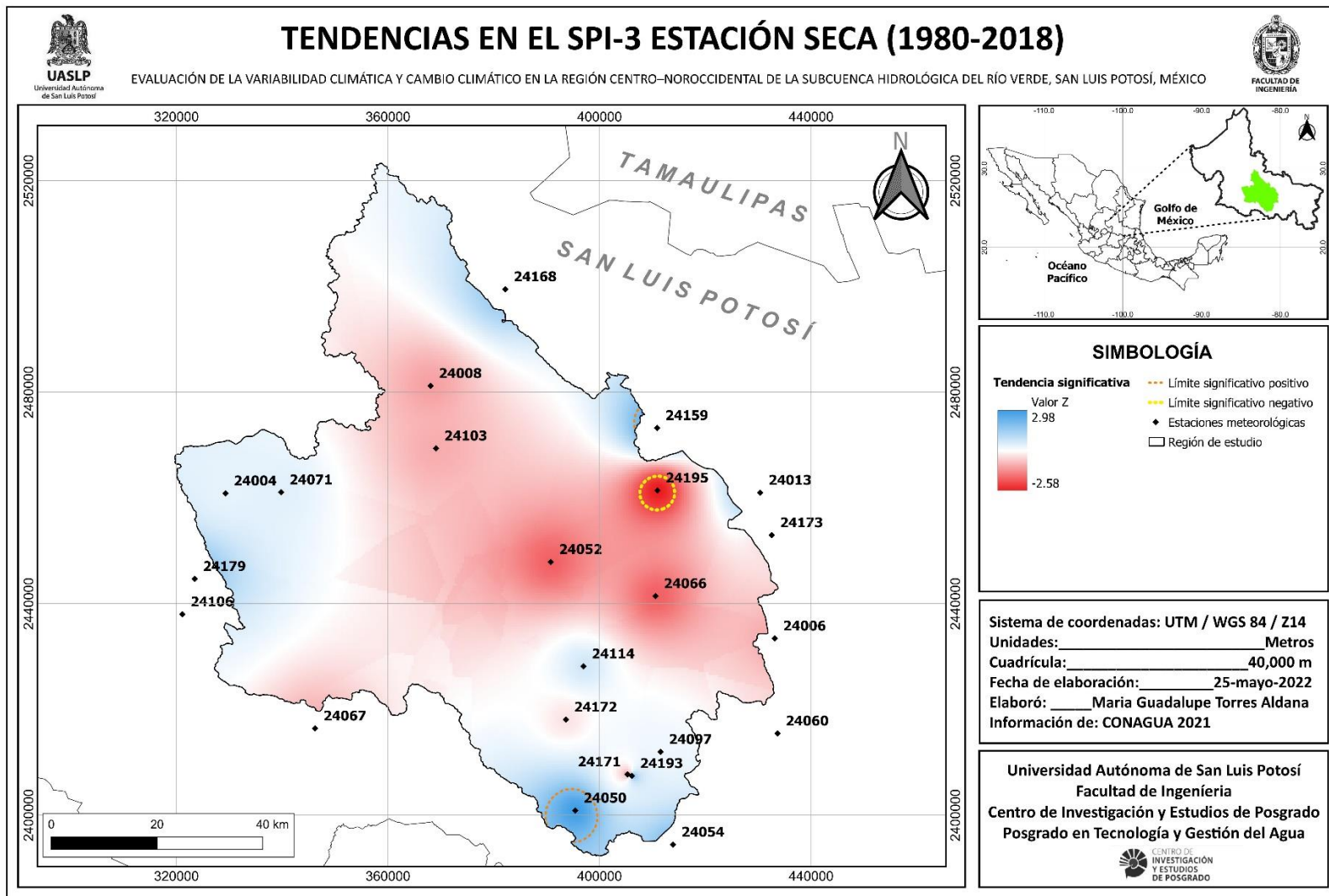


Figura 46. Tendencias en el SPI-3 escala seca 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

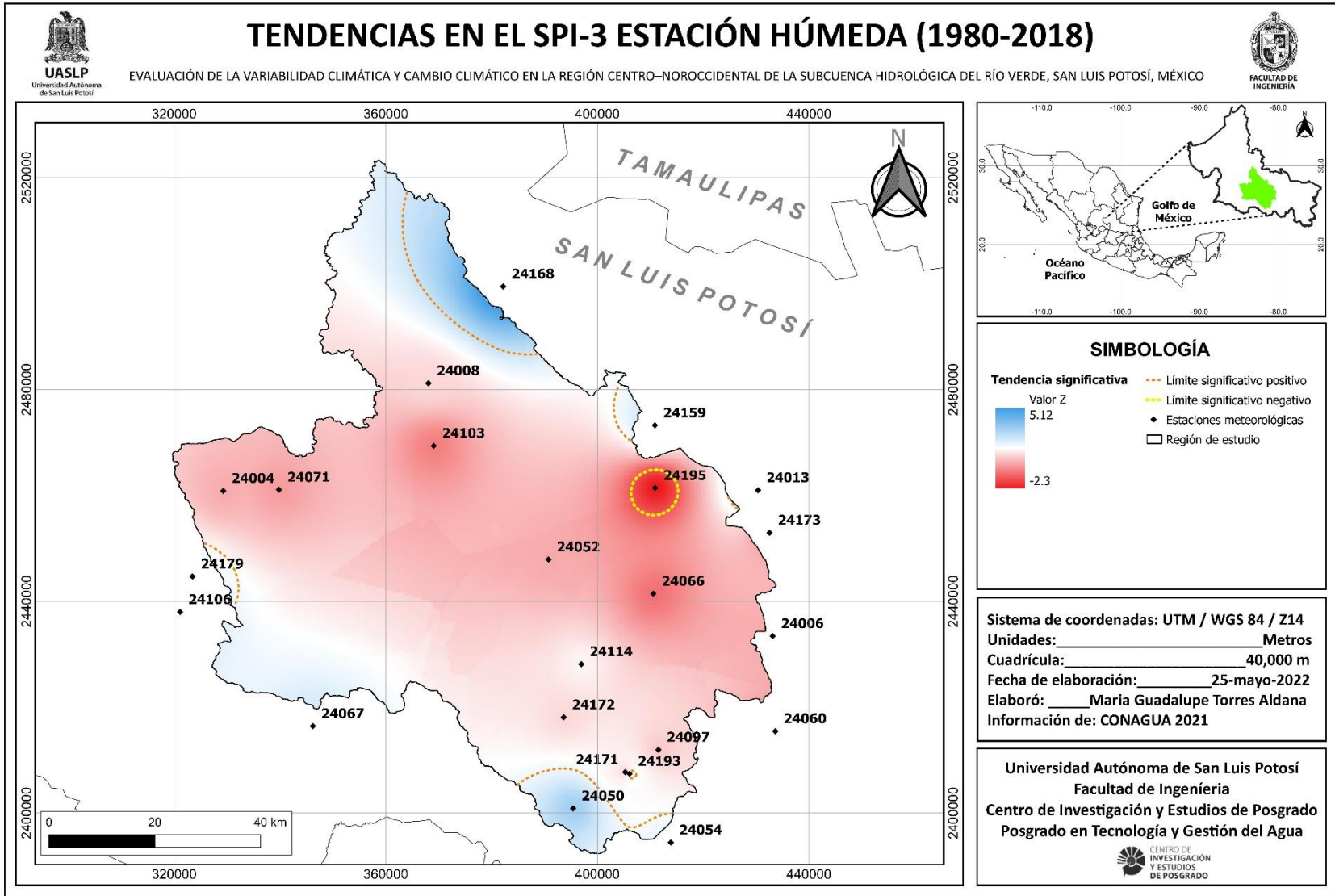


Figura 47. Tendencias en el SPI-3 escala húmeda 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Tabla 23. Tendencias a escala anual, estación seca y húmeda en el SPI-12 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	CLAVE	ANUAL	ESTACIÓN SECA	ESTACIÓN HÚMEDA
Las Tablas	24195	<b>-2.70</b>	-1.55	<b>-2.24</b>
Vigas	24097	1.60	1.54	0.76
Paredes	24050	<b>8.24</b>	<b>6.70</b>	<b>4.85</b>
San José Del Tapanco	24193	<b>5.22</b>	<b>4.30</b>	<b>3.00</b>
Manantial Media Luna	24172	<b>2.83</b>	<b>2.99</b>	0.82
Huizachal	24171	-0.12	-0.20	0.02
Rioverde DGE	24114	<b>2.94</b>	<b>2.95</b>	1.09
Pastora	24052	-1.70	-0.86	-1.60
SAN Nicolás TOLENTINO	24071	-1.35	-0.83	-1.08
Presa Álvaro Obregón	24173	0.31	0.77	-0.44
Cerritos	24008	-0.98	-0.32	-1.11
Cárdenas	24006	1.69	1.82	0.46
Pedro Montoya	24054	<b>4.53</b>	<b>3.75</b>	<b>2.50</b>
Rayón	24060	1.04	1.35	0.25
Buenavista	24168	<b>8.77</b>	<b>6.64</b>	<b>5.68</b>
Villa Juárez	24103	<b>-3.03</b>	<b>-2.02</b>	<b>-2.38</b>
San José Albuquerque	24067	<b>2.81</b>	<b>2.63</b>	1.23
Colonia Álvaro Obregón	24013	<b>8.20</b>	<b>7.15</b>	<b>4.31</b>
Armadillo De Los Infante	24004	0.54	1.21	-0.37
Zaragoza	24106	<b>3.24</b>	<b>3.04</b>	1.50
Xoconostle	24179	<b>4.96</b>	<b>4.12</b>	<b>2.71</b>
San Francisco	24066	<b>-2.32</b>	-1.60	-1.80
La Morita	24159	<b>6.05</b>	<b>5.04</b>	<b>3.36</b>
Región De Estudio	---	0.99	1.53	-0.11

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Los resultados de las tendencias del SPI-12 de manera espacial (Figuras 48, 49 y 50); en las tres escalas temporales del SPI-12, las tendencias significativas son principalmente de incremento y se concentran principalmente en los límites de la subcuenca y en la zona sur de la región montañosa. Si bien, al interior de la región de estudio, las tendencias que predominan son de decremento y se localizan en las zonas topográficamente altas y de valle, pocas son significativas.

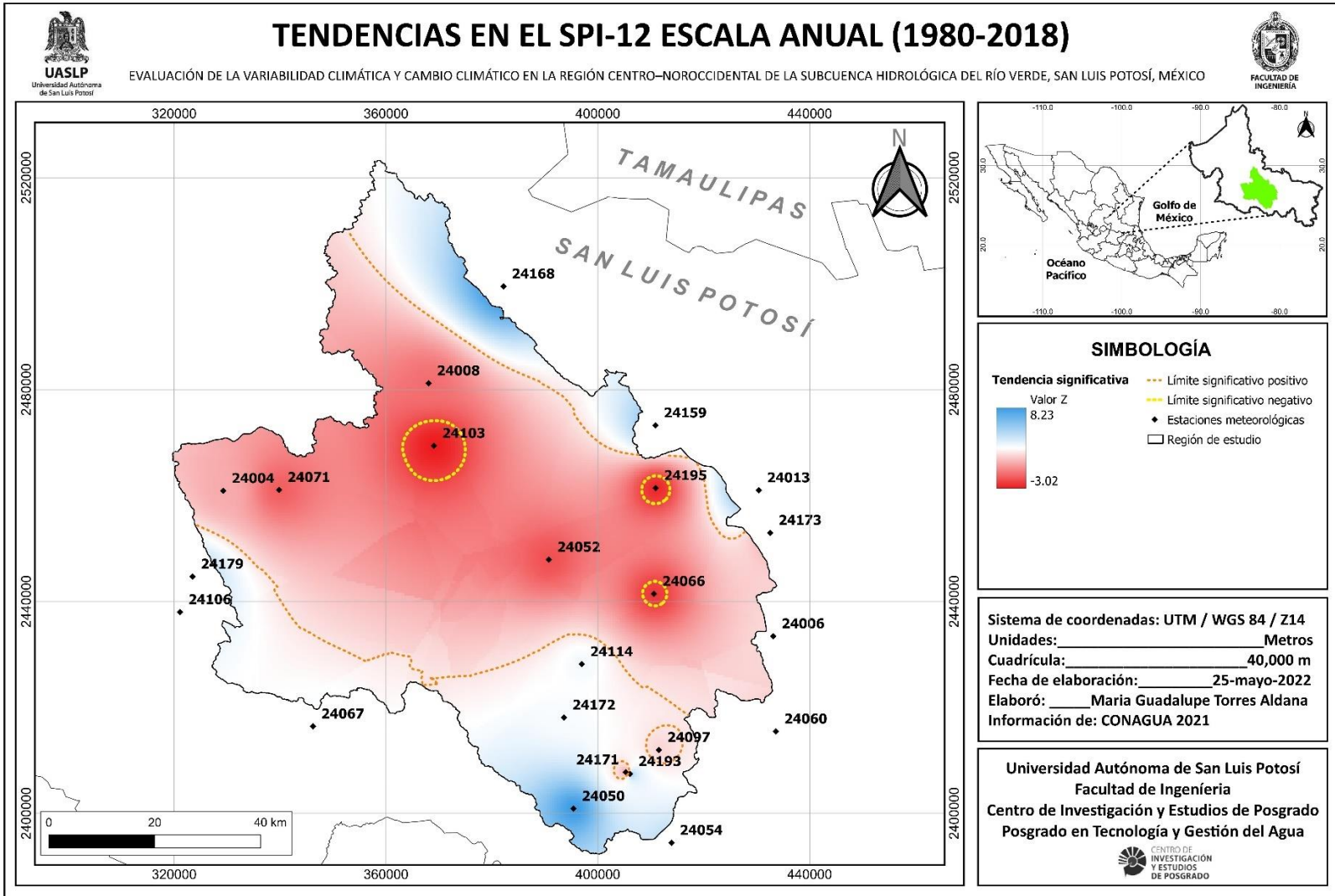


Figura 48. Tendencias en el SPI-12 escala anual 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

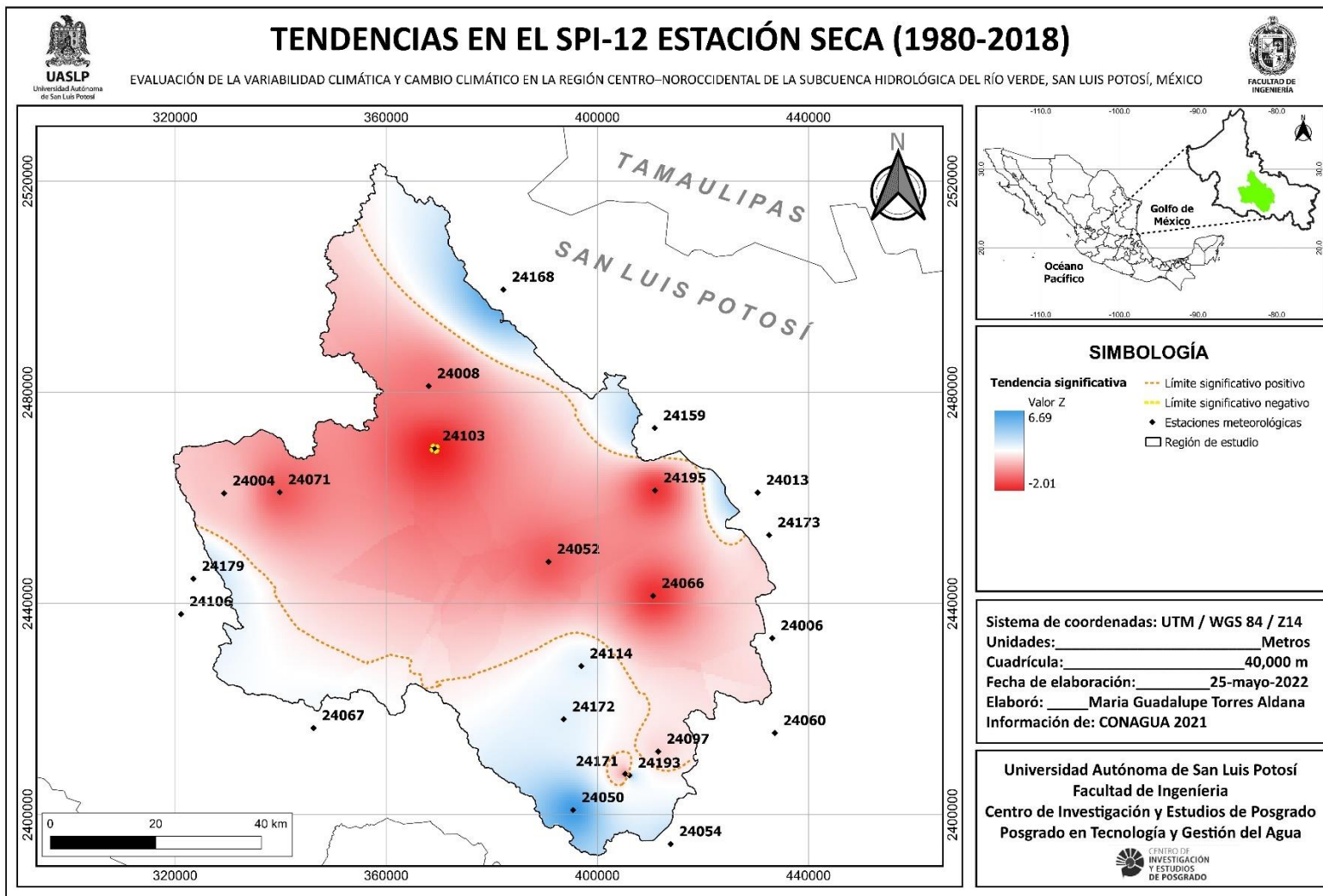


Figura 49. Tendencias en el SPI-12 estación seca 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

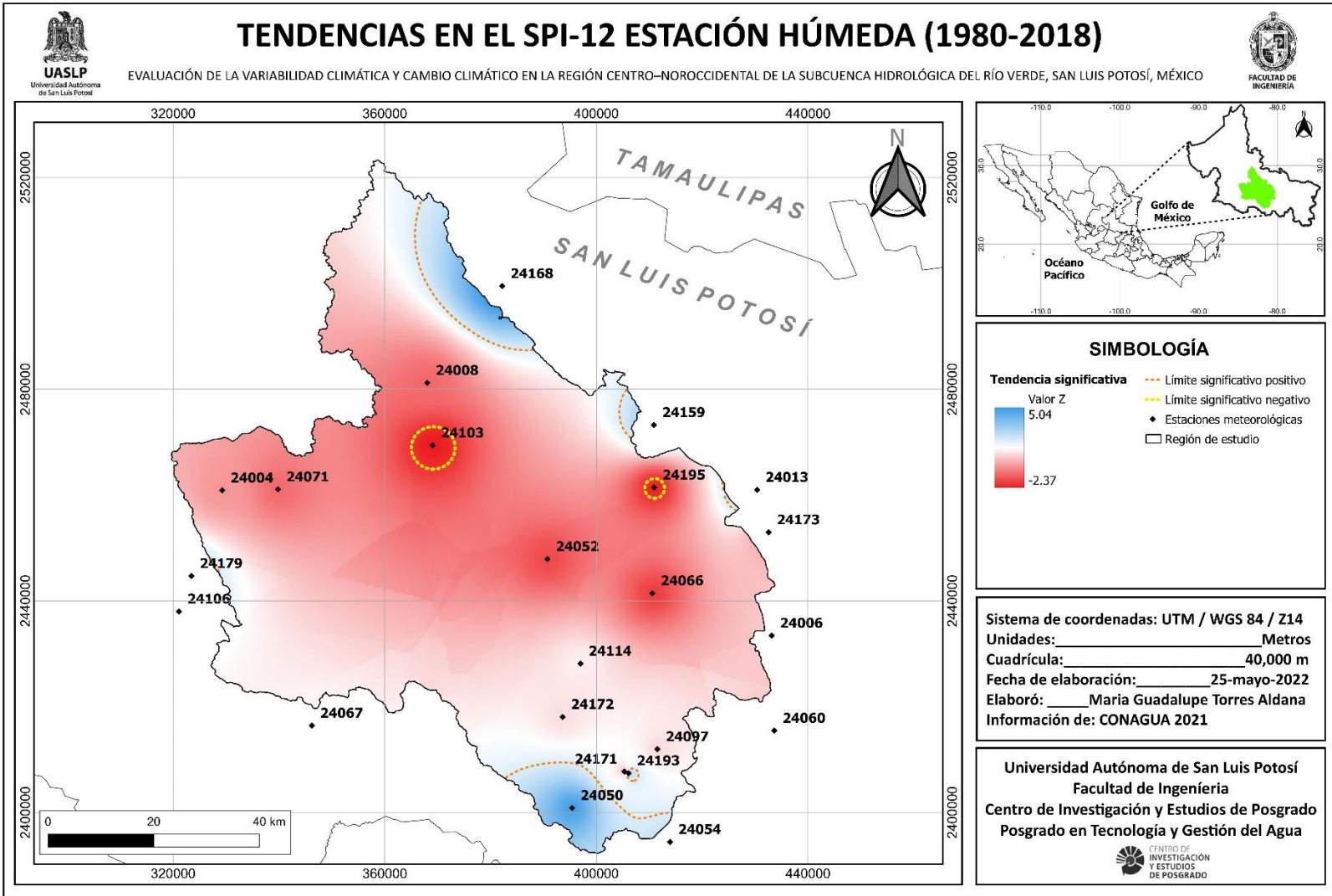


Figura 50. Tendencias en el SPI-12 estación seca 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).





### **3. Evaluación del forzamiento del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en variables hidrometeorológicas.**

#### **3. 1 Introducción**

En el presente capítulo se presenta la evaluación de la influencia del ENOS en distintas variables hidrometeorológicas. Dicha evaluación se realizó a partir de un análisis multivariado, además de la estimación de coeficientes de correlación de Pearson a partir de cinco índices climáticos que caracterizan al fenómeno del ENOS con respecto a los SPI a 3 y 12 meses (SPI-3 y SPI-12, respectivamente), regímenes de temperatura media, máxima, mínima y volúmenes de escorrentía. En este capítulo se presenta la descripción de los métodos aplicados y los resultados que se obtuvieron.

#### **3. 2 Análisis multivariado**

De acuerdo con Olivares & Zingaretti (2019), un análisis multivariado consiste en determinar si existen formas más simples de representar un conjunto de datos complejo, al mismo tiempo de explorar si las observaciones se concentran en grupos y si hay una interdependencia entre los elementos. Esta clase de técnicas se han aplicado ampliamente para analizar datos climatológicos.

##### **3. 2. 1 Análisis cluster**

Según, Maldonado *et al.*, (2020) para la identificación de regiones en donde la precipitación se comporta estadísticamente similar, se aplica el análisis de agrupamientos o también conocido como análisis de conglomerados (Cluster Analysis, en inglés). El análisis cluster (AC) es un método multivariado de clasificación que no requiere de supuestos previos (normalidad, estacionariedad, etc.) y es especialmente exploratorio. Dado que los grupos se integran por similitud entre los elementos que componen el mismo, se podría asumir que aquellos elementos que se agrupan solos representan diferencias significativas con el resto. El AC puede utilizarse para clasificar las estaciones meteorológicas y suponer que aquellas que se agrupan solas representan una condición atípica con respecto a las estaciones aledañas o presentan deficiencias en sus registros (Castro-Heredia *et al.*, 2012).

El proceso del AC se llevó a cabo en el programa de cómputo “STATISTICA”, considerando exclusivamente los datos del régimen de precipitación para cada una de las veintitrés estaciones. El primer paso, fue generar un “New document” de tipo “Spreadsheet”, donde se añadieron los valores correspondientes a la precipitación media mensual (1980-2018), de cada estación meteorológica, posteriormente, se siguió la ruta “Statistics-Multivariate Exploratory Techniques-Cluster Analysis-

Advanced”, se definió el “Almagamation Linkage Rule: Complete Linkage” y “Distance measure: Euclidean distances”, enseguida se seleccionaron a las veintitrés estaciones, posteriormente se definió el “Clustering method: Joining” (Tree clustering) y finalmente en la sección de “Joining results” se seleccionó “Vertical icicle plot” donde se representan los dos grupos estadísticamente homogéneos con base en la similitud del comportamiento de la precipitación en la subcuenca de estudio: el grupo I se concentra en al norte, oeste y sureste de la región de estudio, mientras que el grupo II, se distribuye en el centro-este de la subcuenca y en los límites específicamente al norte, este y oeste. Cabe mencionar, que los dos grupos homogéneos se distribuyen sin un patrón topográfico definido, es decir, ambos se encuentran dispersos en regiones altas y en el valle de la región de estudio (Figura 51).

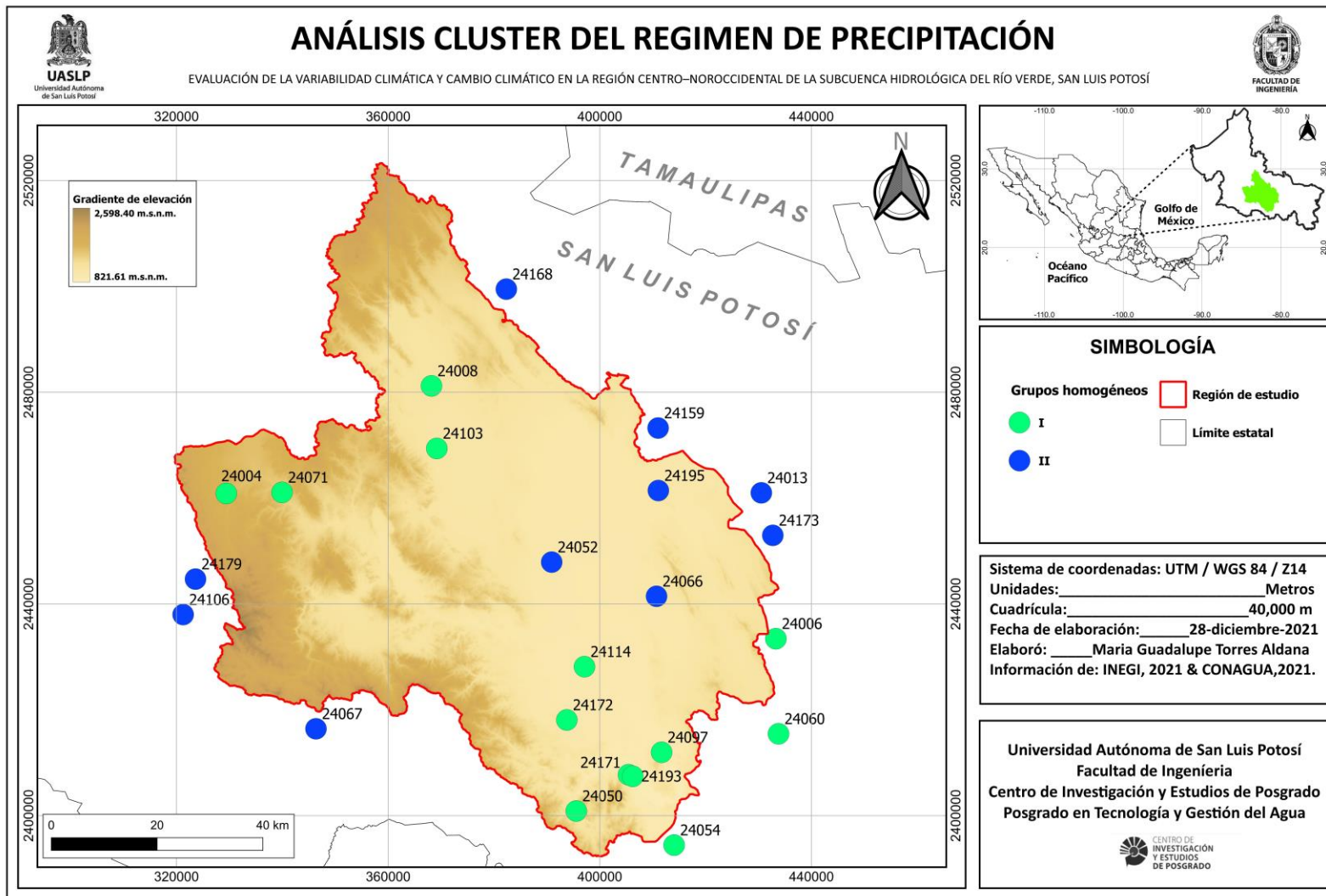


Figura 51. Análisis cluster en el régimen de precipitación (Elaboración propia con base en INEGI, 2021 & CONAGUA, 2021).

Posteriormente, se realizó la caracterización del régimen de precipitación (1980-2018) para cada uno de los dos grupos homogéneos a través de hietogramas; el grupo homogéneo I, presentó un régimen de  $564.60 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ , mientras que el grupo II  $376.70 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ , existiendo una diferencia de aproximadamente  $200 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$  en dichas regiones (Figura 52 y 53).

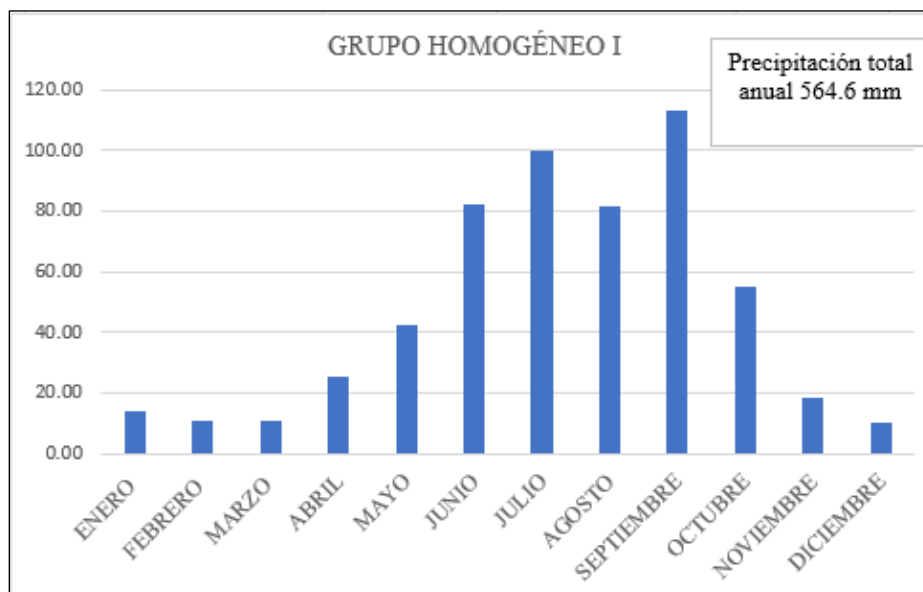


Figura 52. Régimen de precipitación grupo homogéneo I 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

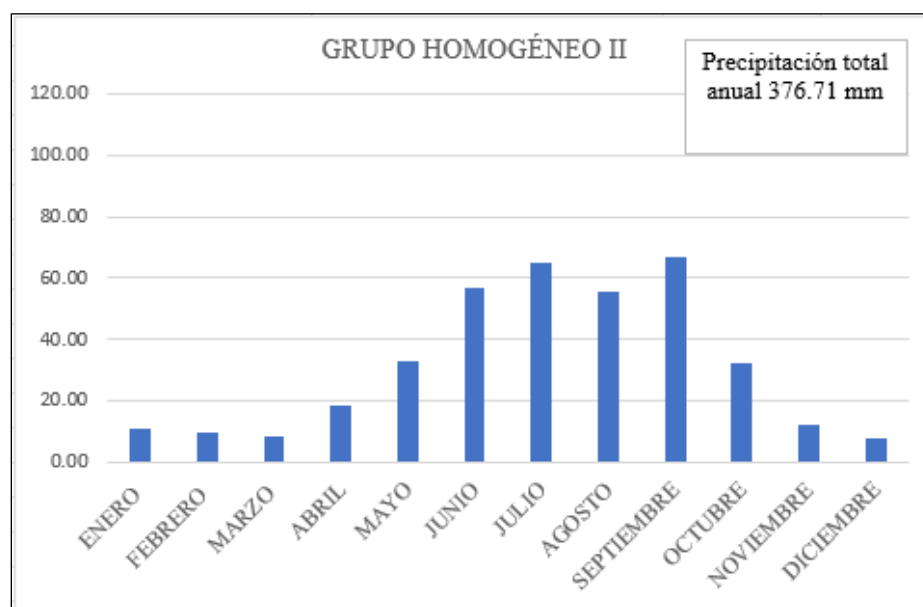


Figura 53. Régimen de precipitación grupo homogéneo II 1980-2018 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

### 3. 2. 2 Análisis por componentes principales

Con el objetivo de simplificar los valores del SPI-3 y SPI-12 de las veintitrés estaciones, se realizó un análisis por componentes principales (ACP). El objetivo principal del ACP, es reducir el tamaño de la serie temporal hacia algunos componentes principales ortogonales que explican la mayoría de la variabilidad de las variables originales con mínima pérdida de información (Cerano-Paredes, 2020). Los componentes resultantes se suelen denominar funciones ortogonales empíricas y desde el enfoque físico, pueden ser considerados como los patrones dominantes (Dommenget & Latif, 2002). El ACP logra sintetizar la información procedente de un conjunto importante de datos generados en una investigación en particular, crear indicadores o índices, representados por los componentes principales (CP), utilizar el ACP como método previo a otras técnicas y eliminar variables que no aportan información (Rodríguez & Giménez-Legal, 2017).

Los CP se calcularon, a través del programa de cómputo estadístico “STATISTICA”. El primer paso fue crear un “New document” de tipo “Spreadsheet”, donde se añadieron los valores correspondientes al SPI-3 y SPI-12 respectivamente, para el periodo 1980-2018; posteriormente, se seleccionó la ruta “Statistics-Multivariate Exploratory Techniques-Factor Analysis”, en la sección denominada “Variables”, se seleccionaron las veintitrés estaciones y el valor correspondiente a la región de estudio. Posteriormente, se oprimió “Ok”, para continuar en la sección denominada “Define Method of Factor Extration-Advanced-Extration Method-Principal Components”, nuevamente se seleccionó “Ok” y, finalmente, se abrió la sección denominada “Factor Analysis Results” y se definió el “Factor rotation: Varimax normalized” donde se presentaron los resultados del análisis en subgrupos tales como: Eigenvalue que explica el % total de la varianza por cada CP; “Plot of loadings”, gráfico en 2D que representó la correlación de cada estación con los diferentes CP y “Factor score” que son las series de tiempo correspondientes a los valores del SPI-3 y SPI-12.

El primer análisis se llevó a cabo con los valores de SPI-3 y se identificaron dos componentes principales, que en conjunto explican el 67.3% de la varianza acumulada. El patrón dominante corresponde al CP I, con más del 61.5% de la varianza total (Tabla 24). El CP I, se distribuye principalmente en la zona del valle de la subcuenca, por su parte, el CP II se distribuye en la zona del valle cercana a la región montañosa, así como en la zona topográficamente alta (Figura 54).

Tabla 24. Componentes principales del SPI-3 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

SPI-3	COMPONENTE PRINCIPAL	VARIANZA TOTAL %	VARIANZA ACUMULADA %
	I	61.59	61.59
	II	5.75	67.34

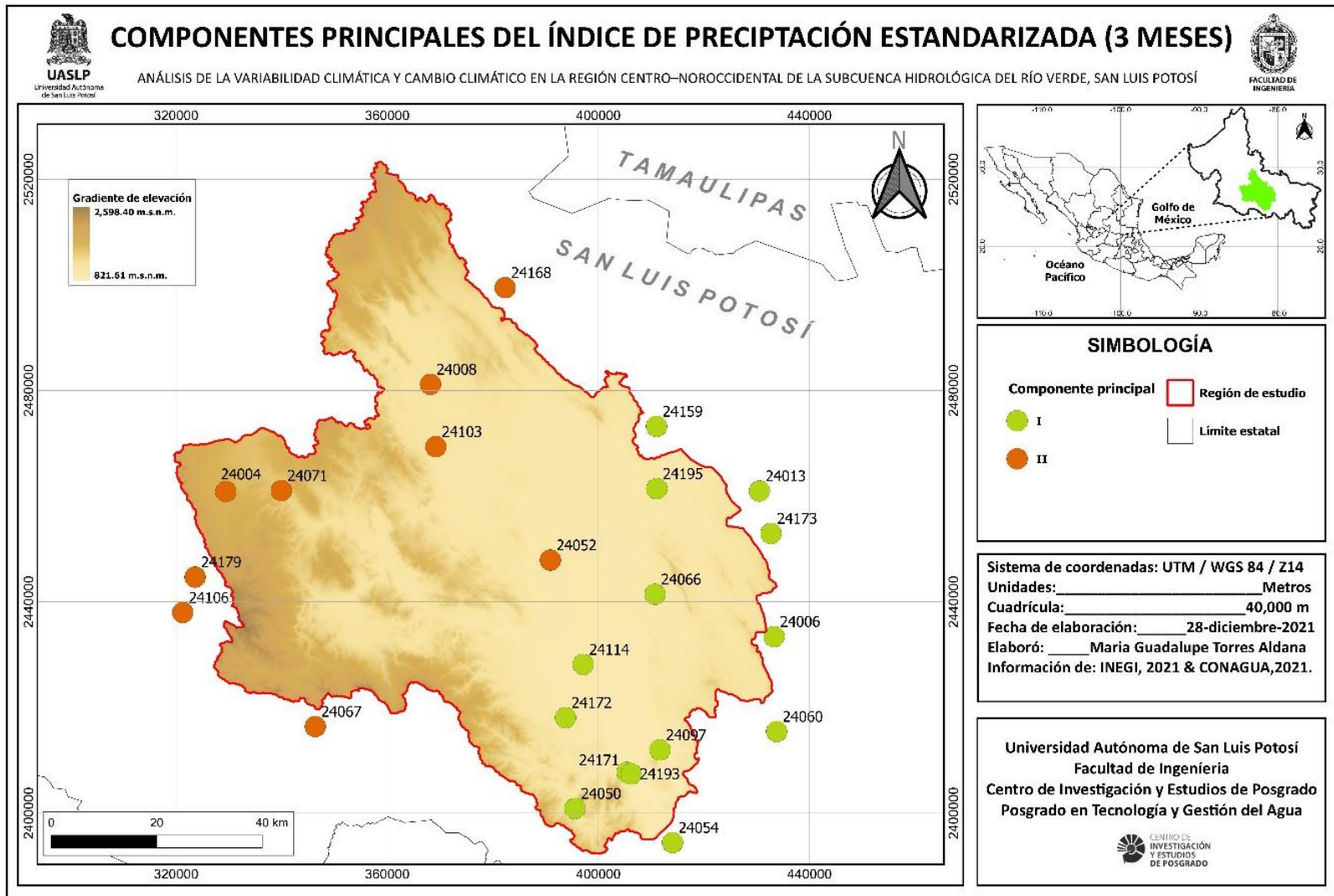


Figura 54. Componentes principales del SPI-3 en la región de estudio (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).

Los resultados del ACP correspondientes al SPI-12, registraron cinco CP, que en conjunto explican el 75.6% de la varianza acumulada; el patrón dominante corresponde al CP I, con más del 50.33% de la varianza total (Tabla 25) se distribuye principalmente en la zona de valle de la región de estudio, mientras que el resto de los CP, se distribuyen de manera dispersa en la región de estudio (Figura 55).

Tabla 25. Componentes principales del SPI-12  
(Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021)

	<b>COMPONENTE PRINCIPAL</b>	<b>VARIANZA TOTAL %</b>	<b>VARIANZA ACUMULADA %</b>
<b>SPI-12</b>	I	50.33	50.33
	II	7.27	57.60
	III	6.62	64.21
	IV	6.57	70.78
	V	4.90	75.68

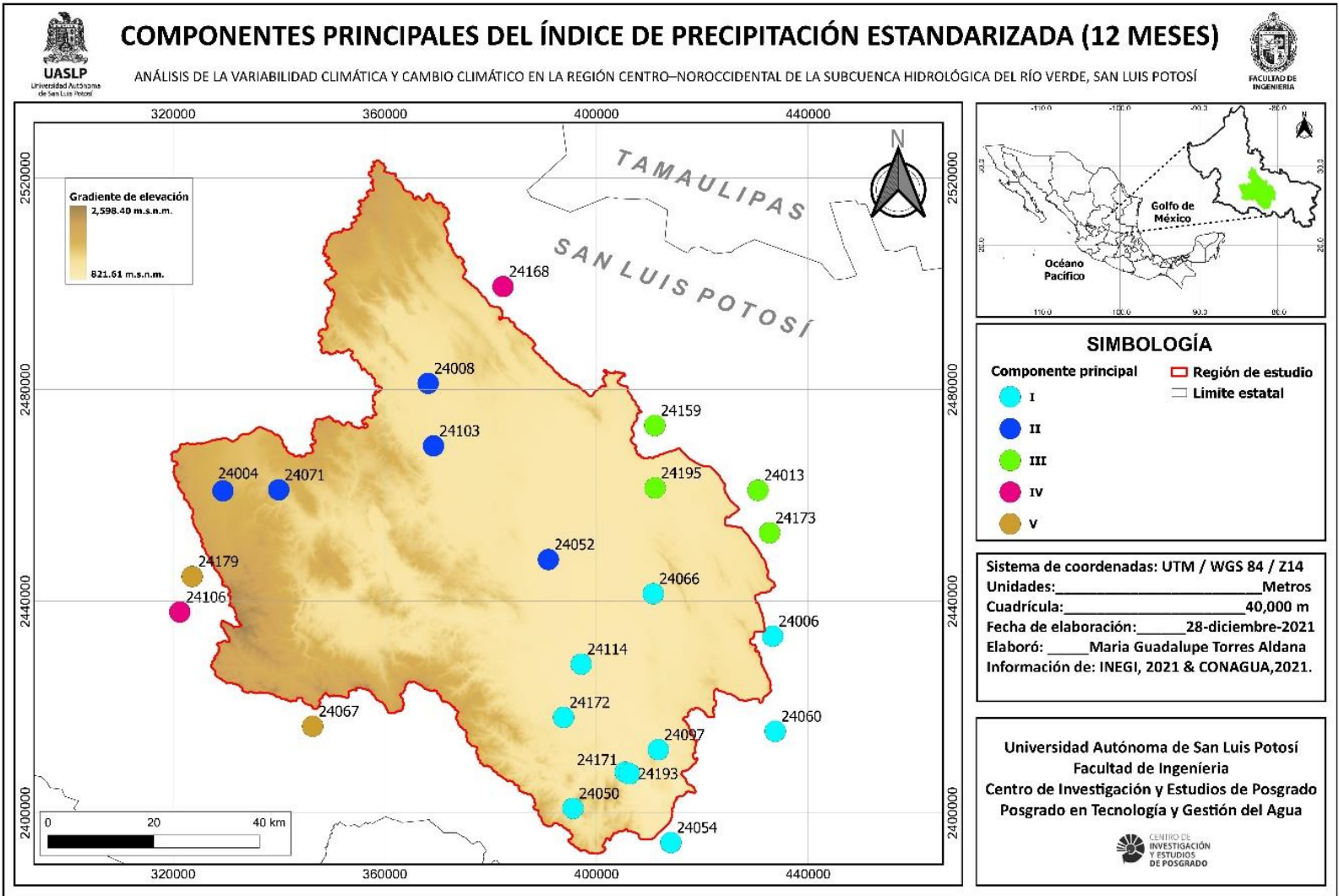


Figura 55. Componentes principales del SPI-12 en la región de estudio (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021).



### 3. 3 Influencia del ENOS en: SPI, temperaturas y escorrentía superficial

La influencia del patrón de variabilidad climática de baja frecuencia del fenómeno ENOS se evaluó en los eventos de sequía meteorológica e hidrológica a través de los CP del SPI-3 y SPI-12, así como en los regímenes de temperatura media, temperatura máxima y mínima extrema, asimismo en los volúmenes de escorrentía superficial de la subcuenca del Río Verde, a través de la estimación del coeficiente de correlación de Pearson.

#### 3. 3. 1 Prueba de Pearson

El método paramétrico de Pearson es una prueba de medida de dependencia lineal entre dos variables. No obstante, para su uso en el análisis de tendencias en las series de tiempo, la prueba es llevado a cabo empleando el tiempo como variable explicativa (Hirsch *et al.*, 1992).

La estimación del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), se lleva a cabo mediante la división de la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables (Hirsch *et al.*, 1992).

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

Siendo  $\sigma_{xy}$  la covarianza entre  $x$  e  $y$ , y  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  las desviaciones típicas de cada una de las variables aleatorias, con el coeficiente de correlación  $r$  se puede formar la base de una prueba estadística de tendencia temporal. La hipótesis nula  $H_0$  es que los eventos  $y_i$  son independientes y variables aleatorias distribuidas normalmente, y no dependen de la serie de tiempo  $x_i$ .

La prueba estadística  $Tc$  es definida:

$$Tc = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

Donde  $r$  es el coeficiente de correlación de Pearson, entre las series  $x$  e  $y$  y  $n$  es el número de pares. La hipótesis nula  $H_0$  es rechazada si  $|Tc| > T_{1-\alpha/2}$ , donde  $T_{1-\alpha/2}$  es el cuantil de la distribución  $t$  Student con  $n - 2$  grados de libertad y una probabilidad de excedencia de  $\alpha/2$ .

### 3. 3. 2 Análisis de dependencia a través de la estimación de la correlación

En este apartado se aborda el forzamiento que el fenómeno del ENOS, que es el patrón de variabilidad climática de baja frecuencia más global en la hidrometeorología de la subcuenca del Río Verde. El análisis se basó en evaluar el grado de dependencia de las variables hidrometeorológicas con respecto a los índices que caracterizan el comportamiento del ENOS, implementado la prueba de correlación de Pearson. A continuación, se describe en forma breve el proceso seguido:

El proceso consistió en descargar cinco índices climáticos que caracterizan al ENOS mismos que son publicados en el sitio oficial de la NOAA, los índices utilizados son los siguientes (NOAA, 2021):

- Oceanic Niño Index (ONI)
- Extreme Eastern Tropical Pacific SST (NIÑO 1+2)
- Central Tropical Pacific SST (NIÑO 4)
- East Central Tropical Pacific SST (NIÑO 3.4)
- Multivariate ENSO Index (MEI V2)

Dicho proceso se realizó a través del programa “STATISTICA”, con el siguiente procedimiento: se generaron “Spreadsheet” con las variables analizadas (SPI-3, SPI-12, temperaturas medias, máximas y mínimas, volúmenes de escorrentía) y la serie de cada índice climático, posteriormente, se estableció la ruta “Statistics-Basic Statistics Tables-Correlation matrices-Ok”, y se seleccionaron las variables a correlacionar a través de la sección denominada Two List y se eligieron las variables analizadas e índices climáticos; finalmente, se seleccionó el apartado “Summary:correlations” para obtener el coeficiente de correlación de Pearson. En dicho análisis, se aplicó un nivel de significancia estadística de  $\alpha = 0.05$ .

### 3. 3. 3 ENOS vs. SPI

A través de las CP correspondientes al SPI, permiten analizar eventos de sequía meteorológica e hidrología (SPI-3 y SPI-12, respectivamente), la sequía meteorológica se define como una anomalía natural recurrente y regional, que ocasiona falta de precipitación, lo cual origina escasez en los recursos hídricos, generando las sequías hidrológicas en (Campos-Aranda, 2017). La sequía hidrológica ocurre cuando los caudales circulantes y los volúmenes embalsados se sitúan por debajo de lo normal (Gómez-Limón & Guerrero-Baena, 2019).

A partir de los valores del SPI, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson *versus* los cinco índices climáticos periodo 1980-2018; sin embargo, el patrón dominante (CP I) del SPI-3, no se ve influenciado por el fenómeno del ENOS (Tabla 26).

Tabla 26. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. SPI-3 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021; NOAA, 2021).

ÍNDICE CLIMÁTICO	CP I	CP II
ONI	-0.06	<b>0.22</b>
NIÑO 1+2	-0.02	0.06
NIÑO 4	-0.03	<b>0.26</b>
NIÑO ANOM 3.4	-0.06	<b>0.24</b>
MEI V2	-0.06	<b>0.16</b>

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Por otro lado, los resultados de las correlaciones de los CP del SPI-12 con respecto al ENOS periodo 1980-2018, denotan que el CP I denominado como el patrón dominante, presentó correlaciones negativas en los cinco índices climáticos (Tabla 27).

Tabla 27. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. SPI-12 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021; NOAA, 2021)

ÍNDICE CLIMÁTICO	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V
ONI	<b>-0.32</b>	0.06	0.02	<b>0.17</b>	<b>0.23</b>
NIÑO 1+2	<b>-0.15</b>	<b>0.10</b>	0.04	0.05	<b>0.18</b>
NIÑO 4	<b>-0.29</b>	-0.02	0.02	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>
NIÑO ANOM 3.4	<b>-0.29</b>	0.05	0.01	<b>0.19</b>	<b>0.24</b>
MEI V2	<b>-0.33</b>	0.08	-0.03	<b>0.11</b>	<b>0.21</b>

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Lo anterior permite inferir que existe una correlación inversamente proporcional. Es decir, solo algunos eventos de sequía hidrológica en la región de estudio se ven influenciados por fases positivas del fenómeno del ENOS, es decir, “El Niño”; mientras que, es probable que se presenten condiciones húmedas en la subcuenca hidrológica cuando se presenta fase negativa “La Niña” (Figura 56); sin embargo, los coeficientes de correlación no son tan elevados debido a que la naturaleza del fenómeno macroclimático ENOS, solo influye en algunos episodios de sequía, ya que las dos fases tienen diversos periodos de frecuencia, además cabe mencionar que en los fenómenos extremos de sequía influyen diversos factores entre ellos el ENOS.

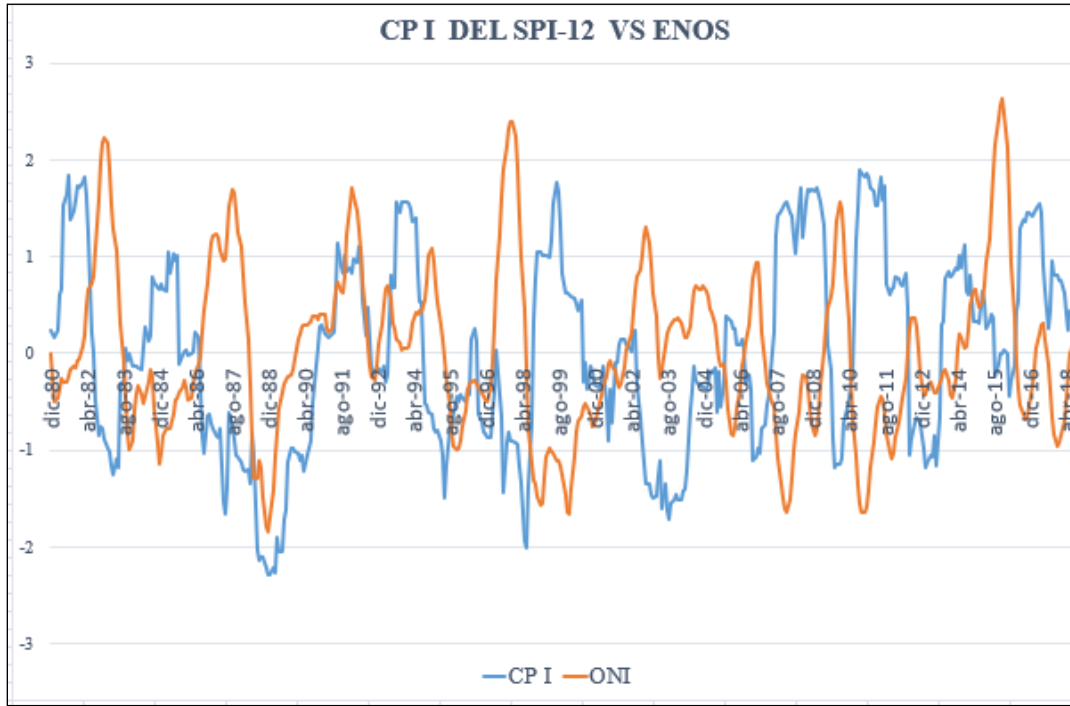


Figura 56. Componente Principal I SPI-12 vs. ENOS (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021; NOAA, 2021).

### 3.3.4 ENOS vs. temperaturas

Con respecto a la evaluación de la influencia del ENOS en los regímenes de temperaturas: media, máxima y mínima correspondientes al periodo 1980-2018, se seleccionaron cuatro estaciones meteorológicas distribuidas en el interior de la región de estudio y se estimó el coeficiente de correlación de Pearson con respecto a los cinco índices climáticos del ENOS; los resultados indican que no se presentó una correlación entre dichas variables (Tabla 28).

Tabla 28. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. regímenes de temperatura (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2021; NOAA, 2021)

TEMPERATURA MEDIA VS. ENOS					
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ÍNDICE CLIMÁTICO				
	ONI	NIÑO ANOM 3.4	NIÑO 1+2	NIÑO 4	MEI V2
Cerritos	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.07
San Nicolás Tolentino	-0.03	-0.05	-0.03	-0.03	-0.04
Rioverde	-0.02	-0.04	-0.02	-0.03	-0.03
Paredes	-0.01	-0.03	-0.08	-0.02	0.00
TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA VS. ENOS					
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ÍNDICE CLIMÁTICO				
	ONI	NIÑO ANOM 3.4	NIÑO 1+2	NIÑO 4	MEI V2
Cerritos	-0.01	-0.01	0.06	0.00	-0.06
San Nicolás Tolentino	-0.04	-0.07	-0.04	-0.07	-0.01
Rioverde	-0.01	-0.03	0.02	-0.02	-0.03
Paredes	0.03	0.03	-0.07	0.08	0.02
TEMPERATURA MÍNIMA EXTREMA VS. ENOS					
ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ÍNDICE CLIMÁTICO				
	ONI	NIÑO ANOM 3.4	NIÑO 1+2	NIÑO 4	MEI V2
Cerritos	0.04	0.03	-0.03	0.05	-0.01
San Nicolás Tolentino	0.07	0.06	0.01	0.06	0.03
Rioverde	0.03	0.00	0.00	0.01	-0.01
Paredes	-0.01	-0.04	-0.07	-0.04	-0.01

### 3.3.5 ENOS vs. escorrentía superficial

Respecto al cálculo del coeficiente de correlación del ENOS *versus* los volúmenes mensuales disponibles de escorrentía, en el periodo 1980-2014, de dos estaciones hidrométricas localizadas al interior de la subcuenca de estudio denominadas Nogal Obscuro “26337” y Vigas “26389”, los resultados denotan una correlación negativa entre el fenómeno del ENOS con respecto a la escorrentía de la estación Nogal Obscuro (Tabla 29).

Tabla 29. Coeficientes de correlación de Pearson ENOS vs. volúmenes de escorrentía (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2016; NOAA, 2021)

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA	ONI	NIÑO ANOM 3.4	NIÑO 1+2	NIÑO 4	MEI V2
<b>NOGAL OBSCURO</b>	<b>-0.17</b>	<b>-0.15</b>	-0.01	<b>-0.18</b>	<b>-0.24</b>
<b>VIGAS</b>	-0.01	0.01	0.03	-0.02	-0.02

Nota: Los valores en negritas representan tendencias significativas al 95% de confianza.

Como se logra apreciar, la correlación negativa concuerda con la correlación de dicho fenómeno con respecto al SPI-12, en este caso, la estación hidrométrica “Nogal Oscuro”, presentó mayor coeficiente de correlación con respecto al índice MEI V2; ahora bien, puesto que una gran cantidad de registros de volúmenes mensuales de escorrentía se presentaron en fase negativa (La Niña), debido a que comúnmente favorece las condiciones de humedad en la región de estudio (Figura 57). En el caso de los registros hidrométricos en la estación “Vigas”, no se identificó ningún grado de dependencia a través del análisis de correlación. Un aspecto importante es que la correlación entre el fenómeno macroclimático y los volúmenes de escurrimiento se esperaban bajas, ya que existen procesos complejos en el ciclo hidrológico que generan no linealidades entre la entrada y la respuesta de la subcuenca. Los resultados ayudan a identificar que solo en una porción de la variabilidad del régimen de volúmenes de escurrimiento mensual pueden ser explicados por la variabilidad climática.

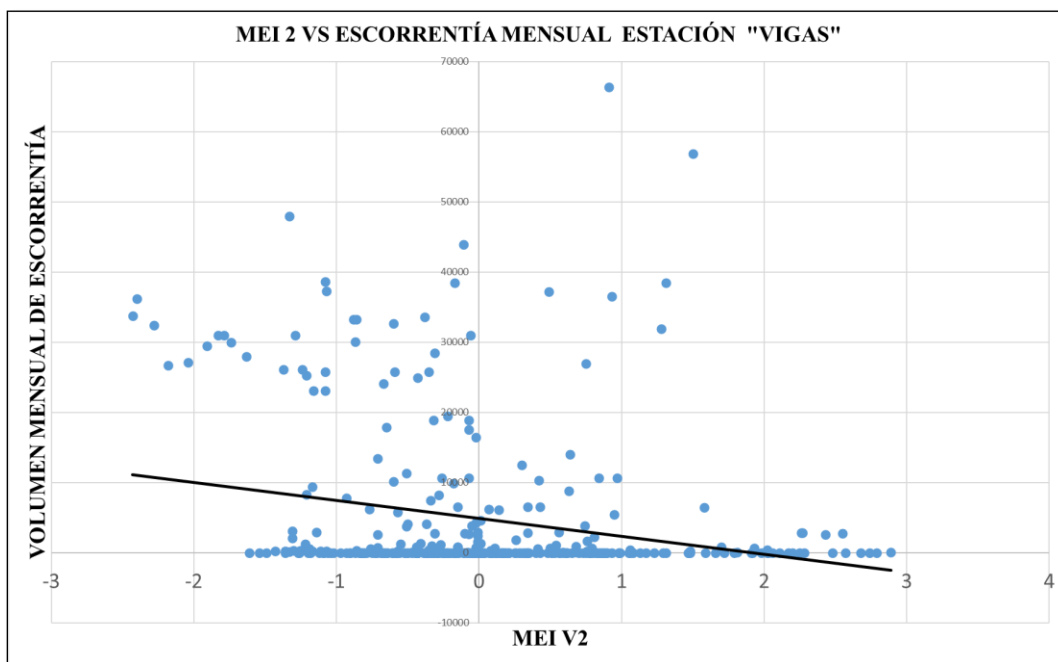


Figura 57. Volumen mensual de escorrentía vs. MEI V2 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2016; NOAA, 2021).

## **4. Evaluación de los índices de cambio climático en la región de estudio.**

### **4.1 Introducción**

Los índices climáticos propuestos por el ETCCDI son calculados a partir de registros observados de precipitación y temperatura. Dichos índices proveen una base teórica común de modo que se logran calcular consistentemente en diversas regiones del planeta para posteriormente comparar o integrar los resultados de regiones distintas (Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta, 2017).

En el presente estudio se emplearon datos de precipitación total, temperatura máxima y temperatura mínima a escala diaria. En la variable de precipitación total, se utilizaron registros de 23 estaciones meteorológicas mientras que en la temperatura máxima y mínima se emplearon datos correspondientes a 20 estaciones, debido a que se consideraron las mismas estaciones meteorológicas que se analizaron en la evaluación de la variabilidad climática (Capítulo II); sin embargo, en el presente capítulo, el análisis se aplicó puntualmente es decir, a través de datos de estaciones meteorológicas, además de que el periodo de estudio es de 1980-2016, debido a la disponibilidad de datos.

En términos generales, se realizó la descarga de datos diarios de las tres variables, en el portal de CONAGUA; se identificaron los días con datos faltantes en cada estación meteorológica; posteriormente, se realizó el cotejo de datos extremos con estaciones adyacentes y enseguida se realizó el relleno de datos faltantes y homogeneización a través del paquete Climatology 3.1.1 en el programa R-Studio. Enseguida, se realizó la estimación de los 27 índices climáticos propuestos por el ETCCDI, mediante el programa “RClimDex 1.0” en el lenguaje de programación R. Finalmente, se realizó el análisis de tendencias de los índices climáticos a partir de la prueba estadística de Mann-Kendall y se describieron los índices de interés para la región de estudio con base en los resultados de las tendencias y de revisión bibliográfica.

### **4. 2 Cálculo de los índices climáticos del ETCCDI**

#### **4. 2. 1 Descarga y verificación de datos diarios**

En primer lugar, se realizó la descarga de los registros diarios correspondientes a las tres variables de estudio; para cada una de las estaciones meteorológicas a través del portal de información estadística climatológica de la CONAGUA (2022), se descargaron los datos de cada estación y se guardó como archivo (TXT). Enseguida, se identificaron los días que no contenían algún registro durante el periodo

de estudio 1980-2016 a través del programa de cómputo Microsoft Excel, en dicho registro faltante se colocó la fecha del día correspondiente y en las columnas de los registros la palabra “NA”. Finalmente se sustituyeron los datos denominados Nulos por “NA” en las tres variables de estudio.

#### 4. 2. 2 Estimación de datos faltantes y análisis de homogeneidad

Previamente, a la estimación de datos faltantes y análisis de homogeneidad, se realizó el cotejo de registros extremos de las tres variables de estudio, es decir, si se identificaba algún dato de precipitación diaria muy elevado se revisaban los registros de las estaciones cercanas (mismo día y año), si coincidía el dato se conservaba; sin embargo, si no concordaba con los registros adyacentes, el dato era sustituido por la palabra “NA”, para posteriormente ser estimado a través de lo descrito a continuación. La estimación de los datos faltantes y el análisis de homogeneidad en las series de tiempo se realizó a través del paquete Climatol 3.1.1 por medio del programa R-Studio (Guijarro, 2019). El relleno de datos se rige por el método de Paulhus & Kohler (Guijarro, 2019), mismo que se adoptó para estimar datos de precipitaciones diarias mediante promedios de valores de alrededor, normalizados mediante división por sus respectivas precipitaciones medias, el método es simple y permite el uso de series próximas. La homogeneización hace referencia a la eliminación de cambios no climáticos que podrían ser causa de reubicaciones o cambios en la instrumentación (Montero-Martínez *et al.*, 2018). El paquete “Climatol 3.1.1” aplica la prueba: Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), para detectar heterogeneidades en los registros de las series (Alexandersson, 1986). Dicho proceso, se realizó a través de Climatol 3.1.1, siguiendo lo descrito a continuación: se prepararon 3 archivos de entrada, uno por cada variable de estudio (Tipo CSV) con los datos diarios de las 23 estaciones meteorológicas a analizar y 5 estaciones adyacentes, el archivo no contiene títulos y fechas, únicamente los datos diarios en orden cronológico (cada columna es una estación) se muestra ejemplo (Tabla 30).

Tabla 30. Archivo de entrada de Climatol precipitación total diaria (Elaboración propia con base en información de CONAGUA, 2022)

	A	B	C	D	E	F
1	0	0	NA	0	NA	0
2	0	0	NA	0	NA	0
3	2.8	5	NA	3	NA	1.4
4	0	0	NA	0	NA	0
5	0	0	NA	0	NA	0
6	0	0	NA	0	NA	0
7	0	5	NA	0	NA	0
8	0	0	NA	0	NA	0
9	0	0	NA	0	NA	0



	A	B	C	D	E	F
10	0	0	NA	0	NA	0
11	0	0	NA	0	NA	0
12	0	0	NA	0	NA	0

Asimismo, se generó un archivo (TXT) con la longitud, latitud, altitud, código y nombre de cada estación meteorológica, respetando el orden del archivo de entrada, es decir, la fila 1 de la Tabla 31, hace referencia a la columna “A” de la Tabla 30, empleando el mismo orden en las estaciones subsecuentes.

Tabla 31. Estaciones meteorológicas utilizadas en Climatol (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022)

X	Y	Z	CODE	NAME
-99.86	22.26	1030	SLP24195	Las Tablas
-99.85	21.81	995	SLP24097	Vigas
-100.01	21.71	1059	SLP24050	Paredes
-99.91	21.77	907	SLP24193	San José Del Tapanco
-100.03	21.86	1006	SLP24172	Manantial Media Luna
-99.92	21.77	951	SLP24171	Huizachal
-100.00	21.96	991	SLP24114	Rioverde
-100.06	22.13	1018	SLP24052	Pastora
-100.55	22.25	1460	SLP24071	San Nicolás Tolentino
-99.65	22.18	1170	SLP24173	Presa Álvaro Obregón
-100.28	22.43	1149	SLP24008	Cerritos
-99.65	22.00	1215	SLP24006	Cárdenas
-99.83	21.65	920	SLP24054	Pedro Montoya
-99.64	21.84	972	SLP24060	Rayón
-100.15	22.6	1210	SLP24168	Buenavista
-100.27	22.33	1109	SLP24103	Villa Juárez
-100.49	21.85	1860	SLP24067	San José Albuquerque
-99.67	22.25	1146	SLP24013	Colonia Álvaro Obregón
-100.66	22.25	1628	SLP24004	Armadillo De Los Infante
-100.73	22.04	1983	SLP24106	Zaragoza
-100.71	22.1	2068	SLP24179	Xoconoxtle
-99.87	22.08	1013	SLP24066	San Francisco
-99.86	22.36	1046	SLP24159	La Morita
-100.08	21.86	1063	SLP24110	Ojo De Agua Seco
-100.15	22.86	1200	SLP24057	Presa De Guadalupe
-100.74	21.8	1722	SLP24075	Santa María Del Rio
-100.94	22.18	1850	SLP24081	Soledad De Graciano
-100.98	22.15	1871	SLP24111	San Luis Potosí (SMN)

Enseguida, se ejecutó un código en “Climatol 3.1.1”, por cada variable de estudio; se muestra un ejemplo del código aplicado para la precipitación total (Figura 58); el código se elaboró con base en Guijarro, (2019) y finalmente se obtuvo el archivo de salida denominado: “Ttest\_1980-2016\_series”, correspondiente a las series de tiempo completas y homogeneizadas.

```
1 setwd("C:/PRECIPITACIÓN")
2 dat<-as.matrix(read.table("datos_prec_1980_2016.csv",sep=","))
3 write(dat,"Ttest_1980-2016.dat")
4 Estaciones <- read.delim("C:/PRECIPITACIÓN/Estaciones.txt")
5 write.table(Estaciones,'Ttest_1980-2016.est',row.names = FALSE, col.names = FALSE)
6 homogen('Ttest',1980,2016,expl = TRUE)
7 dahstat('Ttest',1980,2016,stat='series')
```

Figura 58. Código de Climatol 3. 1. 1 para la precipitación total (Elaboración propia con base en Guijarro, 2019).

Posteriormente, una vez generados los archivos de salida de “Climatol 3. 1. 1” con las series de tiempo homogeneizadas y sin datos faltantes, se revisó el informe denominado “Homogenization graphic output of Ttest”; sin embargo, la estación “24175” arrojó valores elevados en la prueba de SNHT en las variables de precipitación y temperatura mínima, lo que indicó que a pesar de que se aplicó el proceso de homogeneización, los datos son heterogéneos. No obstante, la estación “24175” se utilizó en el análisis, puesto que se emplearon las mismas estaciones meteorológicas en las evaluaciones de variabilidad climática y cambio climático. Finalmente, los datos completos y homogeneizados correspondientes a la precipitación total diaria contenían algunos valores negativos, por lo que se sustituyeron dichos registros por “0”, debido a que no existen valores negativos de precipitación.

### 4. 3. Cálculo de los índices climáticos

El cálculo de los índices climáticos se realizó a través de “RClmDex 1.0”, desarrollado en el Servicio Meteorológico de Canadá por Zhang & Yang (2004). “RClmDex 1.0” se implementó en el lenguaje de programación R, el cual es robusto, multiplataforma, acceso libre y con gran capacidad para la generación de gráficos y análisis estadístico según Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta (2017).

#### 4. 3. 1 Aplicación de Rclimdex

Con base en el manual de usuario para “RClmDex 1.0” de Zhang & Yang (2004), en términos generales, se aplicó la siguiente secuencia: En la interfaz de R, denominada “RGui”, se seleccionó “Archivo-Interpretar código fuente R” y se cargó el archivó “rclimdex1.1\_131115.r” mismo que se descargó en el sitio oficial del ETCCDI (2022). Posteriormente, se seleccionó “Load Data and Run QC” y se seleccionó el archivo (TXT) para cada estación meteorológica; cada archivo incluía las tres variables de estudio en orden cronológico; Enseguida, se colocó el nombre de la estación y se conservaron los parámetros predefinidos tales como: number of estándar deviation (3), user defined

upper and lower threshold of daily maximum temperature (25, 0) y minimum temperature (20, 0), daily precipitation threshold (25) entre otros. Una vez finalizado el análisis de calidad, se seleccionó “Indices calculation”, se estableció el primer y último año base del periodo. Sin embargo, se generaba un error por lo que se estableció 1981 como el primer año y 2015 como el último año del periodo, no obstante, en los resultados de los índices climáticos se presentó el periodo completo (1980-2016). Asimismo, se colocó la longitud y latitud de cada estación y se conservaron los parámetros predefinidos en el programa; finalmente en el apartado de “Check desired indices”, se seleccionaron los 27 índices climáticos. Por último, los resultados se generaron en la carpeta denominada “índices” que contiene los resultados de los 27 índices en archivos (CSV) para cada estación meteorológica. La descripción de los resultados de los índices de cambio climático se basa en la Tabla 1, misma que contiene los nombres, códigos y definiciones de los 27 índices climáticos.

#### **4. 4 Análisis de tendencias en los índices climáticos**

Una vez que se calcularon los 27 índices para cada estación, se procedió a estimar las tendencias significativas a través de la prueba estadística de Mann-Kendall, considerando un nivel de significancia de  $\alpha= 0.05$ . Asimismo, se estimaron las magnitudes de cambio. A continuación, se presentan los resultados de las tendencias de los 27 índices propuestos por el ETCCDI, 11 de estos se enfocan a la precipitación (Tabla 32).

Tabla 1. Índices climáticos definidos por el ETCCDI (Vázquez,2010; Figueroa-Gallegos, 2017)

Nombre	Definición	Código
Días de verano	Número de días en un año en que $TX > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	SU25
Días con hielo	Número de días en un año en que $TX < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	ID0
Noches tropicales	Número de días en un año en que $TN > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	TR20
Días con helada	Número de días en un año en que $TN < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	FD0
Duración de la estación de crecimiento	Número de días en un año entre la primera racha de, como mínimo, seis días con $TG > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la primera racha después del 1° de julio con, como mínimo, seis días con $TG < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	GSL
Temperatura máxima extrema	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria	TXx
Temperatura máxima más baja	Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria	TXn
Temperatura mínima más alta	Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria	TNx
Temperatura mínima extrema	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria	TNn
Frecuencia de días frescos	Porcentaje de días en que $TX <$ percentil 10	Tx10p
Frecuencia de días calurosos	Porcentaje de días en que $TX >$ percentil 90	Tx90p
Frecuencia de noches frías	Porcentaje de días en que $TN <$ percentil 10	Tn10p
Frecuencia de noches cálidas	Porcentaje de días en que $TN >$ percentil 90	Tn90p
Duración de los periodos cálidos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TX >$ percentil 90	WSDI
Duración de los periodos fríos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TN <$ percentil 90	CSDI
Rango diurno de temperatura	Media anual de la diferencia entre TX y TN	DTR
Precipitación máxima en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria	Rx1day
Precipitación máxima en cinco días	Máxima anual de la PPT registrada en cinco días consecutivos	Rx5day
Índice simple de intensidad diaria	PPT total anual dividida entre el número de días con $PPT \geq 1\text{ mm}$	SDII
Días con lluvia mayor a 10 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 10\text{ mm}$	R10
Días con lluvia mayor a 20 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 20\text{ mm}$	R20
Días con lluvia mayor a 25 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 25\text{ mm}$	R25
Días secos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT < 1\text{ mm}$	CDD
Días húmedos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT \geq 1\text{ mm}$	CWD
Días muy húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$ ) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95	R95p
Días extremadamente húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$ ) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99	R99p
Precipitación total	PPT total anual en días en que $PPT \geq 1\text{ mm}$	PRCPTOT

Donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PPT la precipitación.

Tabla 32. Tendencias de los índices climáticos de la precipitación 1980-2016 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	CLAVE	Rx1day	Rx5day	SDII	R10	R20	R25	CDD	CWD	R95p	R99p	PRCPTOT
Las Tablas	24195	0.44	-0.61	1.95	-0.32	0.21	0.95	0.14	<b>-2.37</b>	0.94	0.60	-0.54
Vigas	24097	1.29	0.20	1.24	0.55	1.02	0.97	-0.30	0	1.28	1.44	0.88
Paredes	24050	0.97	0.43	-1.05	0.79	0.66	1.07	-0.76	1.55	1.02	0.76	1.53
San José De Tapanco	24193	0.75	0.24	<b>3.04</b>	1.44	1.22	0.92	-0.14	-1.39	1.01	-0.46	1.35
Manantial Media Luna	24172	-0.14	-0.75	1.83	1.16	1.20	<b>2.37</b>	0.22	-0.65	1.22	-0.93	0.95
Huizachal	24171	<b>1.98</b>	0.03	1.52	-0.29	0.66	1.12	1.03	-1.9	1.05	1.23	-0.26
Rioverde DGE	24114	1.22	0.69	1.90	0.93	1.77	1.43	0.50	-1.31	1.94	0.46	1.56
Pastora	24052	0.47	-0.90	<b>3.02</b>	0.57	1.69	1.55	0.47	<b>-2.27</b>	1.64	0.65	-0.2
San Nicolás Tolentino	24071	0.56	-1.78	-1.82	-0.18	-1.36	-1.04	-0.68	-0.66	-0.07	0.13	-0.35
Presa Álvaro Obregón	24173	0.94	-0.12	1.87	0.67	1.78	1.11	0.35	0.4	1.03	1.19	0.35
Cerritos	24008	-0.21	-1.26	<b>2.29</b>	0.67	0.79	0.83	0.76	-0.85	0.20	-0.26	0.3
Cárdenas	24006	<b>2.12</b>	0.09	<b>3.51</b>	<b>2.69</b>	<b>2.93</b>	<b>1.97</b>	1.05	-1.28	<b>2.37</b>	1.73	1.32
Pedro Montoya	24054	1.94	0.63	0.94	1.59	1.70	1.45	<b>-2.49</b>	-0.16	1.64	1.53	1.63
Rayón	24060	0.07	-0.55	1.56	0.00	0.42	-0.12	1.44	<b>-2.95</b>	0.98	-0.03	-0.43
Buenavista	24168	<b>2.73</b>	<b>2.13</b>	1.94	<b>2.11</b>	1.61	<b>3.15</b>	-0.73	1.21	<b>3.08</b>	<b>2.20</b>	<b>2.63</b>
Villa Juárez	24103	-0.30	-1.27	<b>1.96</b>	1.40	-0.25	-0.18	0.20	0.18	0.13	0.12	0.59
San José Albuquerque	24067	0.92	1.06	<b>2.22</b>	1.87	<b>2.23</b>	1.32	1.74	-0.23	1.94	0.12	<b>2.03</b>
Colonia Álvaro Obregón	24013	<b>2.50</b>	1.66	<b>2.76</b>	1.25	<b>2.58</b>	<b>2.17</b>	0.67	-0.11	1.68	1.49	1.92
Armadillo de los Infante	24004	0.24	-0.67	-1.19	-1.29	-0.56	0.65	-0.86	1.74	1.56	1.06	0.61
Zaragoza	24106	<b>2.38</b>	1.57	<b>2.57</b>	1.35	1.45	1.84	1.47	-0.49	<b>2.38</b>	1.92	1.65
Xoconostle	24179	0.42	0.76	<b>-2.28</b>	0.65	1.09	0.65	<b>-2.70</b>	<b>2.45</b>	0.62	0.65	1.69
San Francisco	24066	0.29	-0.93	1.32	0.54	0.59	0.27	1.35	<b>-1.98</b>	-0.34	-0.20	-0.56
La Morita	24159	0.90	1.79	<b>2.21</b>	<b>2.81</b>	<b>2.21</b>	<b>3.20</b>	-0.96	-1.79	<b>3.05</b>	-0.18	<b>3.13</b>

Nota: Los valores en negritas representan las tendencias significativas (valor Z), con un nivel de significancia estadística  $\alpha=0.05$

A continuación, se describirán los resultados de las tendencias significativas en los índices climáticos que son de interés en la región de estudio, con base en las características climáticas y socioeconómicas de la subcuenca hidrológica del Río Verde. En general, se registraron tendencias significativas en  $\geq 20\%$  de las estaciones meteorológicas de 4 índices climáticos denominados: Rx1day, SDII, R25 y CWD.

Por su parte, el índice de precipitación máxima en un día (Rx1day), registró tendencias significativas de incremento que se presentan en la zona sur de la subcuenca (estación 24171) y hacia el norte, este y oeste de los límites de la región de estudio (estaciones 24168, 24013, 24006 y 24106), con un rango en la magnitud de cambio de  $0.58\text{-}0.94 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$  (Figura 59). Mientras el índice Rx5day, no registró tendencias significativas en el interior de la subcuenca, únicamente, una tendencia significativa positiva al norte del límite de la región de estudio (estación 24168) con magnitud de cambio de  $1.07 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ .

El índice simple de intensidad diaria (SDII), presentó tendencias significativas, como se logra apreciar en la Figura 60; la tendencia significativa predominante es de incremento, hacia el norte, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24103, 24052 y 24193), al este y oeste de los límites de la región de estudio (estaciones 24159, 24013, 24006, 24106 y 24067), con magnitud de cambio de  $0.06\text{-}0.11 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ; no obstante, se registró una tendencia significativa negativa localizada al oeste del límite de la región de estudio (estación 24179) con tasa de cambio de  $-0.1 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Respecto al índice: días con lluvia mayor a 10 mm (R10), se detectaron tendencias significativas de incremento al norte y este de los límites de la subcuenca (estaciones 24168, 24159 y 24006) con magnitudes de cambio de  $0.19\text{-}0.24 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ . De igual forma, se presentaron tendencias significativas de incremento correspondientes al índice de días con lluvia mayor a 20 mm (R20), al norte, este y oeste de estaciones cercanas a los límites de la región de estudio (24159, 24006, 24013 y 24067) con tasas de cambio de  $0.10\text{-}0.15 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ . Sin embargo, el índice de días con lluvia mayor a 25 mm (R25) presentó una tendencia significativa positiva (incremento) al interior de la subcuenca, localizada en la zona sur (estación 24172) con magnitud de cambio de  $0.10 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ; asimismo, al norte y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24168, 24159, 24013 y 24006) con tasas de cambio de  $0.04\text{-}0.1 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ .

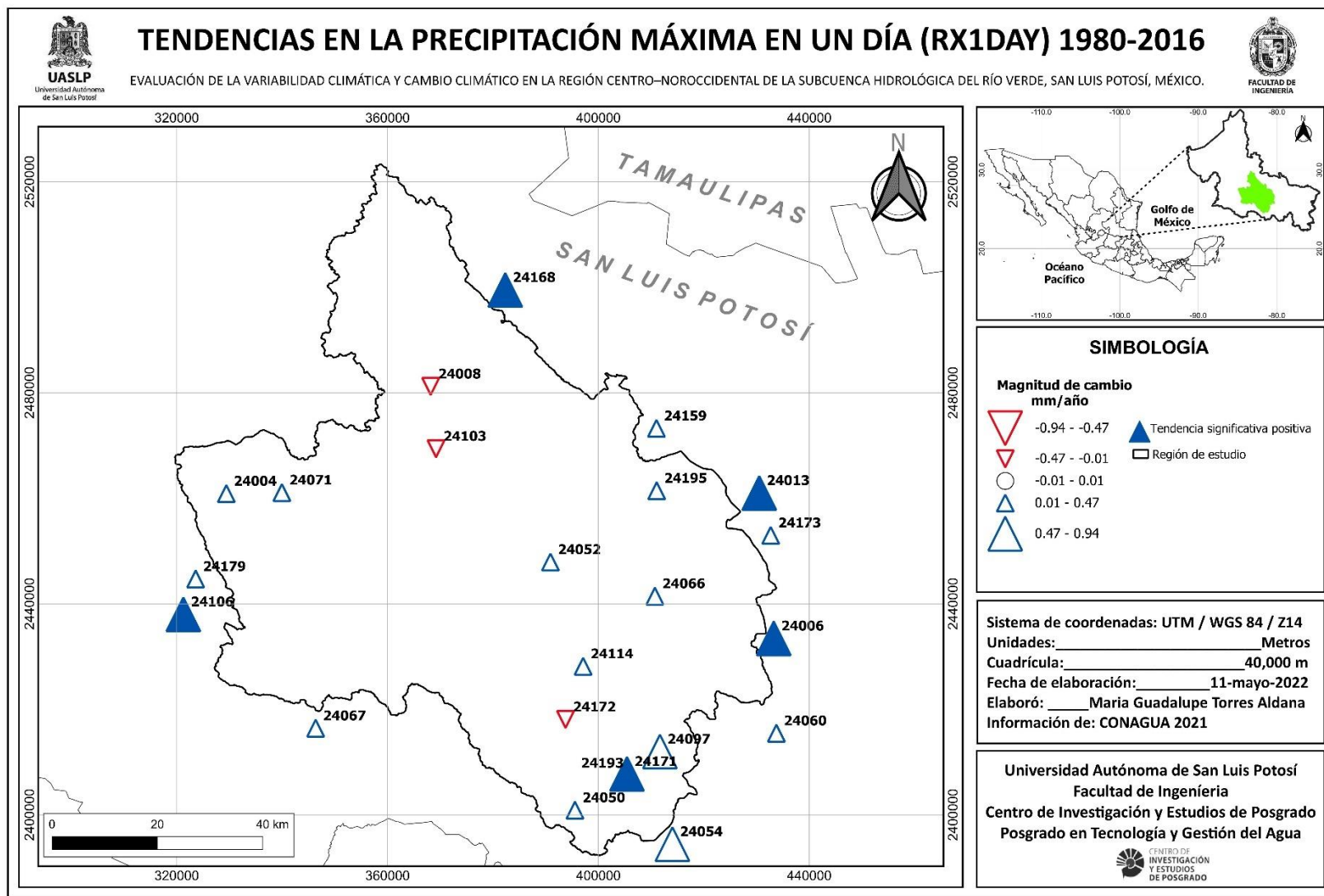


Figura 59. Tendencias en la precipitación máxima en un día (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

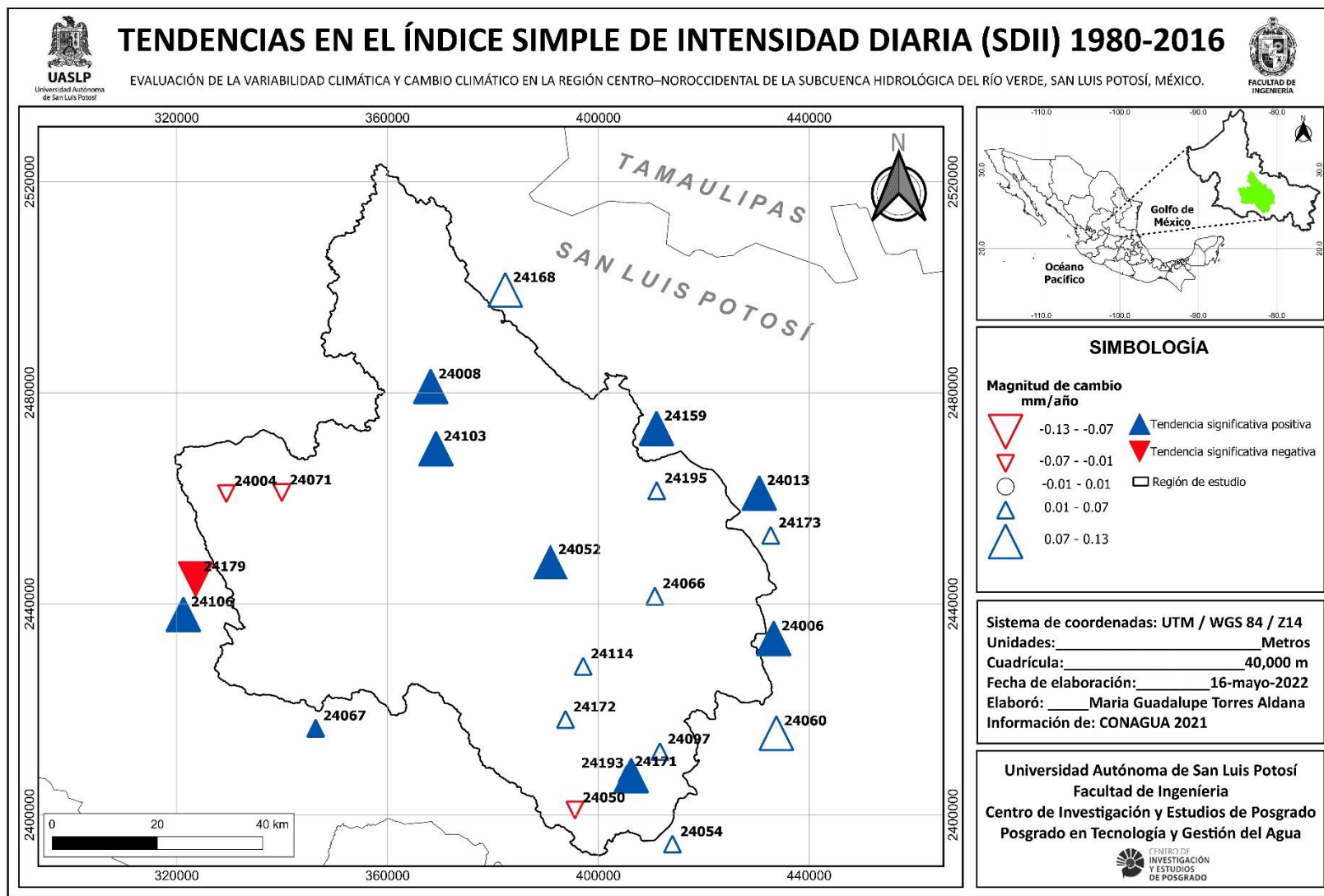


Figura 60. Tendencias en índice simple de intensidad diaria (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).



Por otro lado, el índice días secos consecutivos (CDD), registró únicamente dos tendencias significativas de decremento al oeste y sureste de los límites de la subcuenca (estaciones 24179 y 24054) con tasas de cambio de  $-1.3 \text{ días}\cdot\text{año}^{-1}$ , por lo que en el interior de la región de estudio no se registraron tendencias. No obstante, el índice de días húmedos consecutivos (CWD), difiere en los resultados de índice CDD, registrando tendencias significativas de decremento en centro y este de la subcuenca (estaciones 24052, 24066 y 24195), así como cerca del límite este de la zona de estudio (estación 24060) con tasas de cambio de  $-0.05$  a  $-0.13 \text{ días}\cdot\text{año}^{-1}$ , únicamente al oeste del límite de la subcuenca (estación 24179) se presentó una tendencia significativa positiva con tasa de cambio de  $0.09 \text{ días}\cdot\text{año}^{-1}$  (Figura 61).

Respecto a lo mencionado anteriormente, se detecta que no existe un patrón espacial definido en las tendencias significativas de los índices correspondientes a la precipitación, puesto que algunos se presentan en zonas topográficamente altas y bajas, o a los alrededores de la región de estudio.

A continuación, se presentan los resultados de las tendencias para los 16 índices climáticos enfocados en la variable de temperatura (máxima y mínima), asimismo se describirán los que son de interés en la región de estudio.

Los índices climáticos: SU25, TXx, TXn, TNx, TX10P, TX90P, TN10P, TN90P y DTR registraron tendencias significativas de distinto signo en al menos 20% de las estaciones meteorológicas analizadas (Tabla 33).

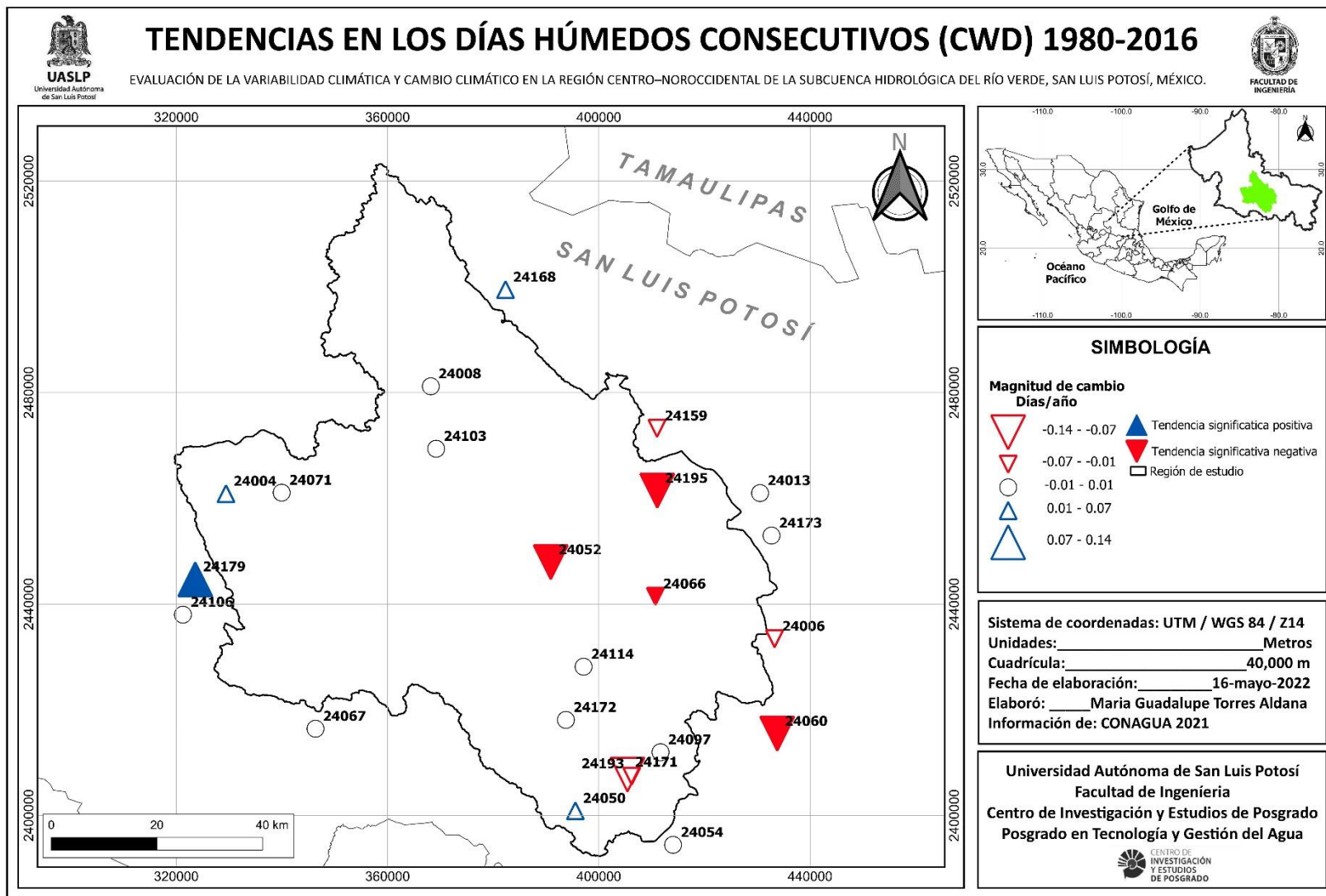


Figura 61. Tendencias en los días húmedos consecutivos (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

Tabla 33. Tendencias de los índices climáticos de la temperatura 1980-2016 (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	CLAVE	SU25	ID0	TR20	FD0	GSL	TXx	TXn	TNx	TNn	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p	WSDI	CSDI	DTR
Las Tablas	24195	<b>3.38</b>	0.00	-2.74	0.92	0.00	-1.23	<b>3.32</b>	<b>-2.68</b>	-1.36	<b>-3.53</b>	1.75	1.36	-1.68	0.68	1.62	<b>3.75</b>
Vigas	24097	1.32	0.00	-3.50	-1.10	0.00	1.34	1.37	-1.85	1.10	<b>-2.55</b>	<b>2.29</b>	1.49	<b>-2.84</b>	0.69	0.89	<b>4.38</b>
Paredes	24050	1.79	0.00	-2.64	-1.65	0.00	0.76	1.54	<b>-3.03</b>	1.25	<b>-2.17</b>	1.49	1.09	<b>-2.39</b>	-0.38	1.14	<b>4.09</b>
San José De Tapanco	24193	-1.81	0.00	2.93	-0.64	0.00	-0.71	1.40	1.02	1.10	-0.60	-0.67	<b>-2.24</b>	<b>2.97</b>	-1.28	0.13	<b>-2.17</b>
Manantial Media Luna	24172	<b>-2.04</b>	0.00	-4.53	-0.21	0.00	1.02	1.30	<b>-4.07</b>	-0.01	-0.38	-0.46	<b>4.70</b>	<b>-4.93</b>	-0.34	1.63	<b>3.73</b>
Huizachal	24171	0.24	0.00	-2.11	-0.33	0.00	0.71	1.55	-1.46	-0.04	-1.41	<b>2.16</b>	0.93	-1.84	1.06	0.33	1.82
Rioverde DGE	24114	1.89	0.00	0.58	-1.57	0.00	<b>2.56</b>	0.21	-0.12	1.78	<b>-2.34</b>	<b>3.62</b>	-0.94	0.39	1.75	0.00	<b>3.00</b>
Pastora	24052	<b>4.58</b>	0.00	0.16	1.61	0.00	0.26	0.04	0.57	-0.51	<b>-4.19</b>	<b>3.66</b>	<b>-2.25</b>	0.61	<b>2.17</b>	0.30	<b>4.51</b>
San Nicolás Tolentino	24071	0.34	0.00	-0.24	0.29	0.25	-1.20	<b>2.12</b>	0.30	0.31	-1.37	<b>-2.16</b>	<b>-2.33</b>	1.37	-1.15	-0.78	-1.66
Presa Álvaro Obregón	24173	-0.63	0.00	1.53	-1.67	0.00	-0.63	1.87	1.62	<b>2.88</b>	-1.03	-1.44	<b>-2.71</b>	<b>2.89</b>	-0.93	-0.41	<b>-2.58</b>
Cerritos	24008	<b>2.93</b>	0.00	0.67	-1.56	0.00	<b>2.65</b>	0.28	1.27	1.40	<b>-2.00</b>	<b>3.59</b>	<b>-2.49</b>	<b>2.06</b>	1.65	-1.50	<b>2.73</b>
Cárdenas	24006	1.34	0.00	<b>1.96</b>	-0.55	0.00	1.69	-1.79	<b>2.53</b>	0.24	-0.90	<b>4.22</b>	-1.24	<b>3.75</b>	0.69	-1.10	0.08
Pedro Montoya	24054	1.49	0.00	0.10	-0.17	0.00	1.96	0.28	-1.19	0.86	-1.14	<b>3.23</b>	0.75	-0.35	0.08	0.72	<b>2.51</b>
Rayón	24060	-0.10	0.00	-0.48	-0.25	0.00	0.34	0.91	0.08	0.58	-1.50	0.37	1.78	-0.85	0.95	0.44	1.71
Buenavista	24168	-0.51	0.00	-0.29	<b>2.26</b>	0.00	0.81	<b>-2.21</b>	-1.52	<b>-2.46</b>	-0.92	0.48	0.93	<b>-2.55</b>	-0.30	0.12	<b>2.85</b>
Villa Juárez	24103	<b>2.09</b>	0.00	-0.22	-1.31	0.00	<b>2.17</b>	<b>2.78</b>	-1.00	1.65	<b>-2.90</b>	<b>2.43</b>	0.44	-1.15	1.70	-0.09	<b>2.41</b>
San José Albuquerque	24067	<b>4.91</b>	0.00	0.09	0.64	0.00	<b>4.09</b>	<b>2.73</b>	<b>-2.31</b>	-0.05	<b>-4.39</b>	<b>3.70</b>	1.79	<b>-2.34</b>	1.88	1.49	<b>5.72</b>
Colonia Álvaro Obregón	24013	<b>-2.15</b>	0.00	<b>-4.53</b>	-1.91	0.00	-1.13	-1.19	<b>-4.37</b>	1.19	1.61	<b>-2.50</b>	1.24	<b>-4.92</b>	-0.20	-0.38	<b>2.22</b>
Armadillo de los Infante	24004	1.60	0.00	0.00	<b>-2.54</b>	-0.44	0.04	<b>2.44</b>	<b>-3.17</b>	<b>2.41</b>	<b>-2.51</b>	0.82	-1.05	<b>-2.42</b>	0.54	0.10	1.53
Zaragoza	24106	1.62	0.00	0.00	<b>-3.20</b>	-0.44	<b>2.09</b>	-0.15	<b>2.85</b>	-0.80	-1.87	<b>2.18</b>	<b>-4.32</b>	<b>3.98</b>	1.12	-0.93	<b>-3.51</b>

Nota: Los valores en negritas representan las tendencias significativas (valor z), con un nivel de significancia estadística  $\alpha=0.05$

Los resultados correspondientes al índice denominado días de verano (SU25), registraron tendencias significativas de incremento en el norte, centro y este de la subcuenca (estaciones 24008, 24103, 24052 y 24195), así como al oeste del límite de la región de estudio (estación 24067) con tasas de cambio de 1.1 – 3.0 días·año<sup>-1</sup>; también, se presentaron tendencias significativas de decremento en el sur del interior de la subcuenca y al este del límite de la misma (estaciones 24172 y 24013) con magnitudes de cambio de -0.6 y -1 días·año<sup>-1</sup> (Figura 62).

Por su parte, en los días con helada (FD0), los resultados indicaron que al norte del límite de la subcuenca (estación 24168), existe una tendencia significativa de incremento con tasa de cambio 0.17 días·año<sup>-1</sup>, mientras que al este del interior de la subcuenca (estación 24004) así como del límite de la región de estudio (estación 24106), se registraron tendencias de decremento con tasas de cambio de -0.09 y -0.50 días·año<sup>-1</sup>.

En términos de la temperatura máxima extrema (TXx), se registraron tendencias significativas al norte y centro de la subcuenca hidrológica (estaciones 24008, 24103 y 24114), asimismo en el oeste de los límites de esta (estaciones 24106 y 24067), con tasas de cambio de 0.06 - 0.17 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 63).

Por otro lado, la temperatura máxima más baja (TXn), presentó tendencias significativas de incremento en el oeste, norte y este al interior de la subcuenca (estaciones 24004, 24071, 24103 y 24195), así como al oeste del límite de esta (estación 24067) con magnitudes de cambio de 0.09-0.17 °C·año<sup>-1</sup>, sin embargo, al norte del límite de la región de estudio (estación 24168), se registró una tendencia de decremento en dicho índice con tasa de cambio de -0.09 °C·año<sup>-1</sup> (Figura 64).

Las tendencias significativas de los índices SU25, TXx y TXn, son principalmente de incremento y se registraron en la zona topográficamente alta y en el valle (zona contigua a la región montañosa), sin embargo, también se presentaron tendencias de incremento en la zona sur del valle, aunque no son significativas estadísticamente.

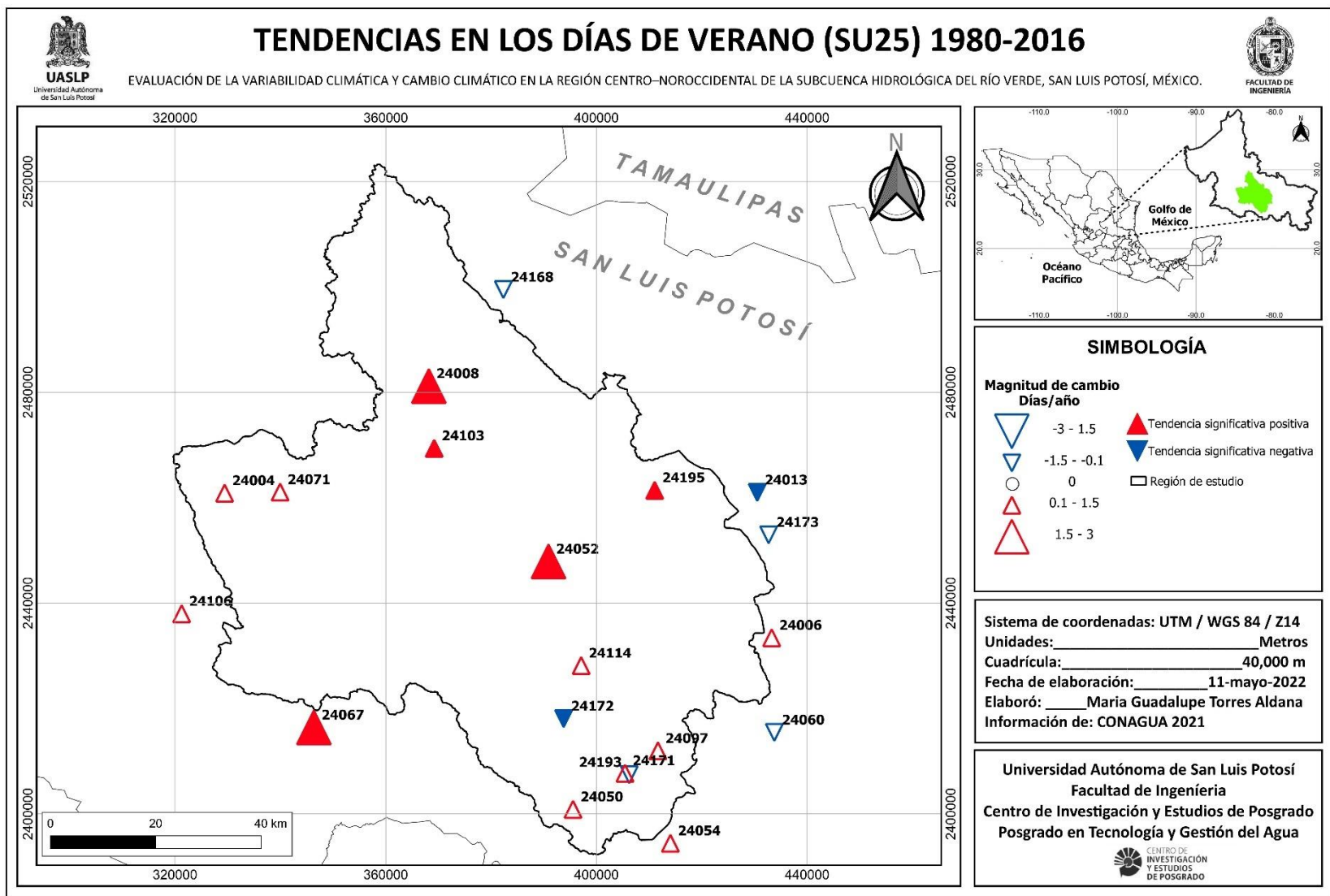


Figura 62. Tendencias en los días de verano (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

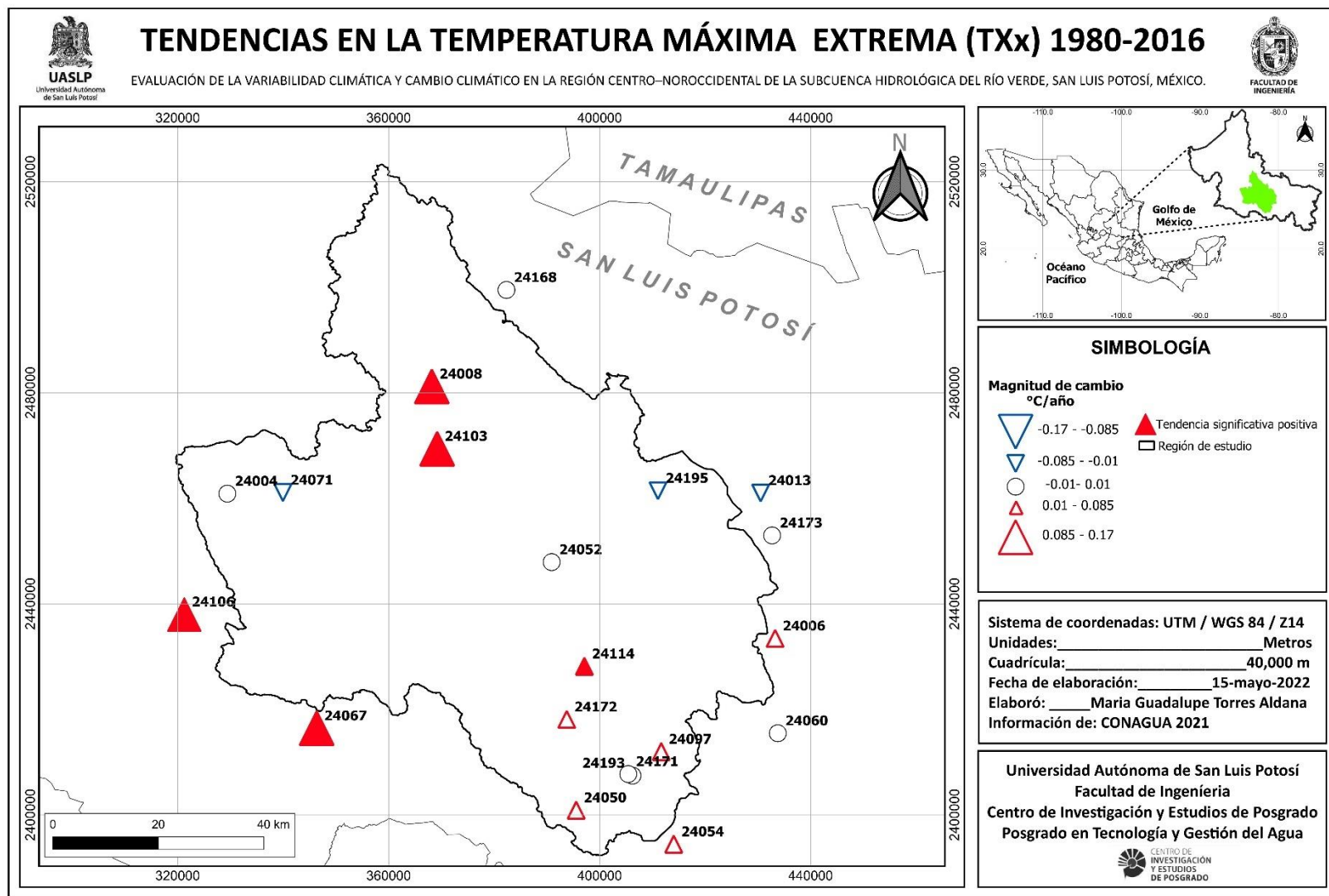


Figura 63. Tendencias en la temperatura máxima extrema (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

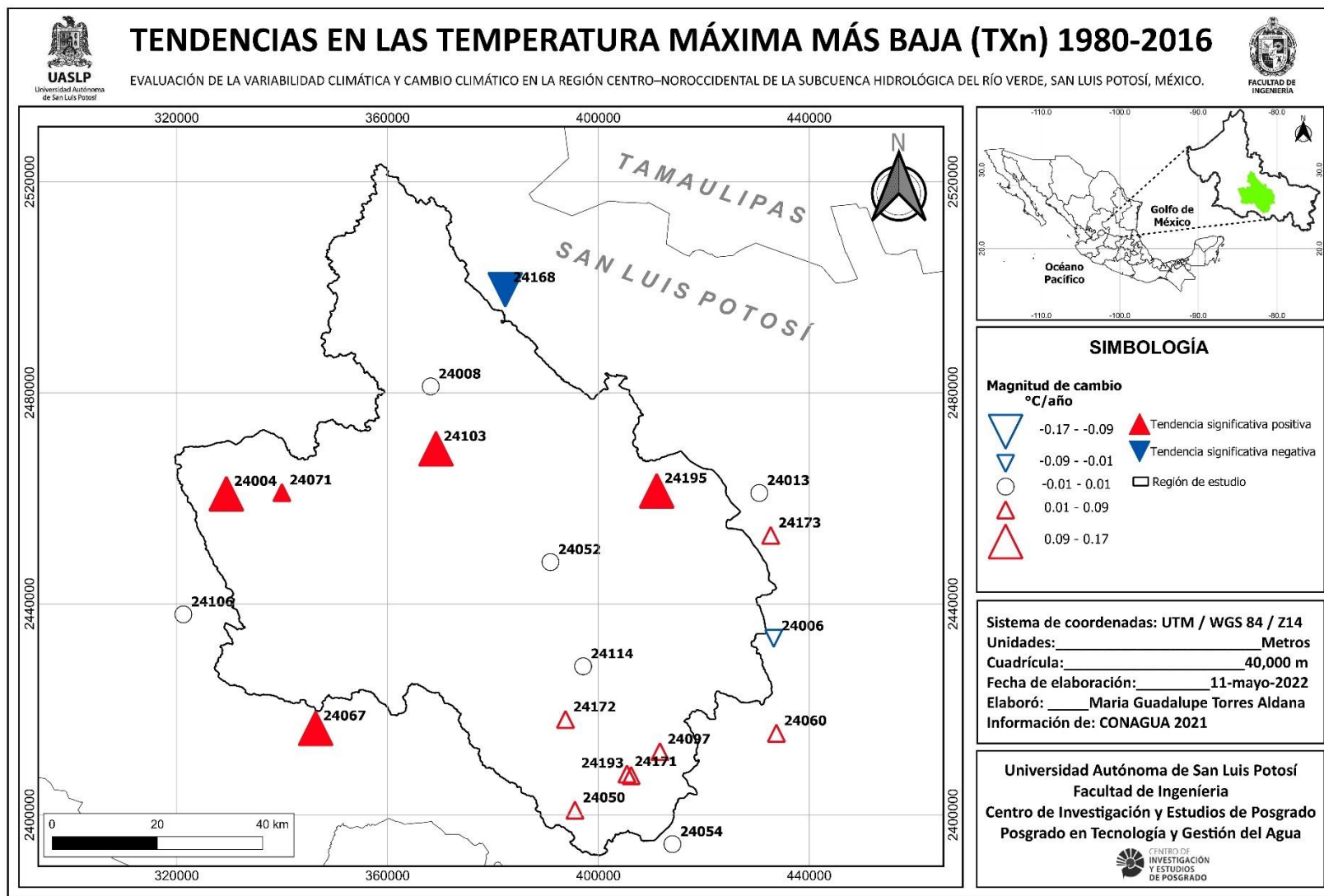


Figura 64. Tendencias en la temperatura máxima más baja (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

En el índice de la temperatura mínima más alta (TNx), los resultados mostraron tendencias significativas de decremento en el oeste, este y sur de la subcuenca (estaciones 24004, 24195, 24172 y 24050), asimismo al oeste y este del límite de la región de estudio (estaciones 24067 y 24013) con tasas de cambio de  $-0.02$  a  $-0.14^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ ; sin embargo, se registraron tendencias significativas de incremento al oeste y este de los límites de la zona de estudio (estaciones 24106 y 24006) con tasas de cambio de  $0.06$  y  $0.04^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$  respectivamente. Las tendencias significativas se concentran principalmente en la región del este valle y en menor proporción en la zona alta de la subcuenca (Figura 65).

El índice de la temperatura mínima extrema (TNn) únicamente registró tendencias significativas de incremento al oeste de la subcuenca y hacia al este del límite de esta (estaciones 24004 y 24173) con tasas de cambio de  $0.03$  y  $0.07^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ ; y, solamente se presentó una tendencia significativa de decremento hacia el norte del límite de la subcuenca (estación 24168) con magnitud de cambio de  $-0.09^{\circ}\text{C}\cdot\text{año}^{-1}$ .

En los resultados de las tendencias significativas de la frecuencia de días frescos (TX10p), se registraron tendencias de reducción en el norte, centro, este, oeste y sur de la subcuenca, asimismo al oeste del límite de la zona de estudio (estaciones 24008, 24103, 24052, 24114, 24195, 24004, 24097, 24050 y 24067) con tasas de cambio de  $-0.12$  a  $-0.4$  días $\cdot\text{año}^{-1}$  (Figura 66).

El índice TX90P que representa la frecuencia de días calurosos presentó tendencias significativas de incremento en el norte, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24103, 24052, 24114, 24171 y 24097), de igual forma al oeste, este y sur de los límites de la zona de estudio (estaciones 24106, 24067, 24006 y 24054), con magnitudes de cambio de  $0.15$ - $0.47$  días $\cdot\text{año}^{-1}$ , no obstante, se registraron tendencias significativas de decremento al oeste de la subcuenca y este del límite de esta (estaciones 24071 y 24013) con tasas de cambio de  $-0.15$  y  $-0.28$  días $\cdot\text{año}^{-1}$ , respectivamente (Figura 67).

Los índices TX10p y TX90p, se presentaron en la mayor parte de la región de estudio tanto en zonas topográficamente altas, medias y bajas, ambos índices se comportan de forma inversamente proporcional a lo largo de la subcuenca de estudio.



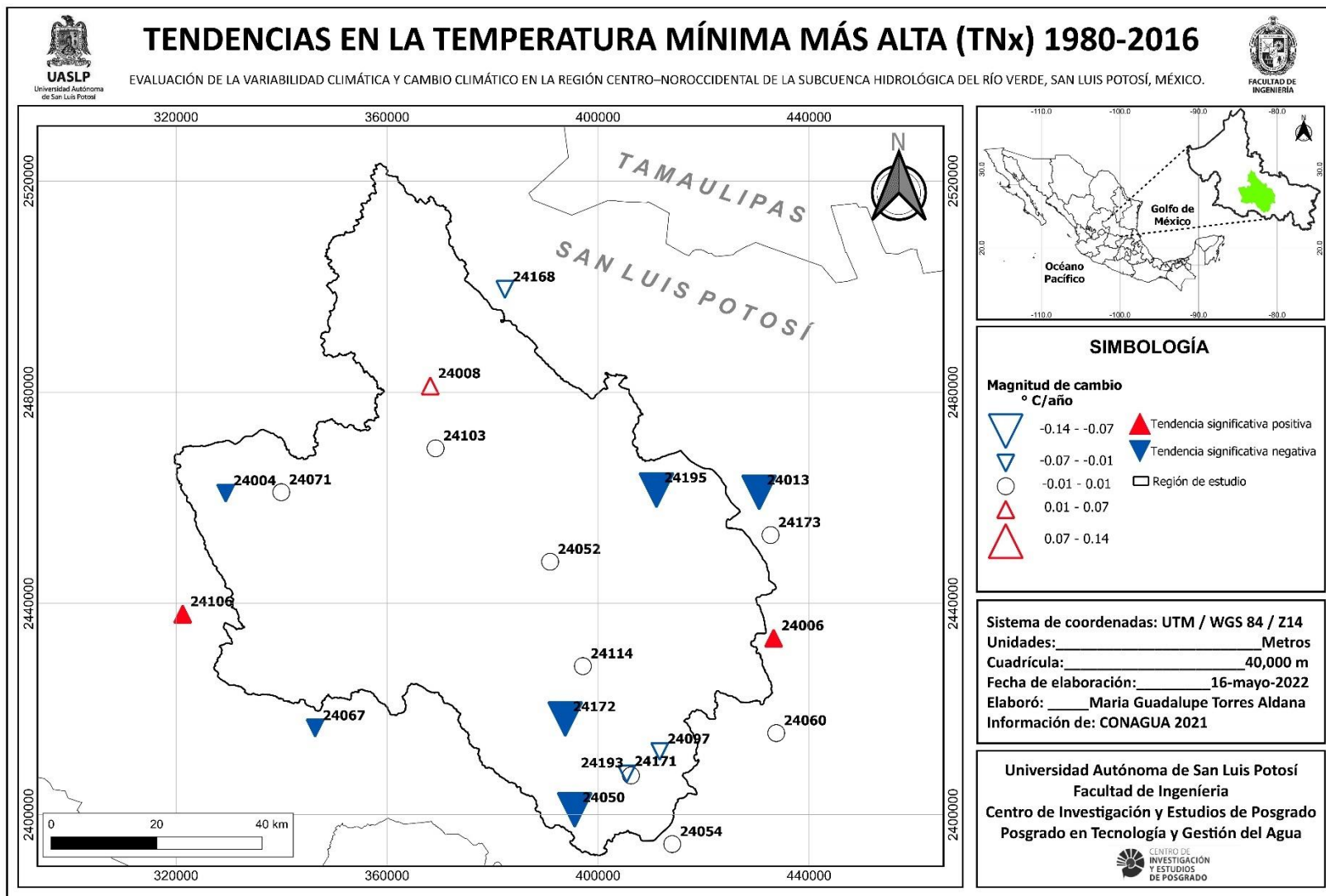


Figura 65. Tendencias en la temperatura mínima más alta (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

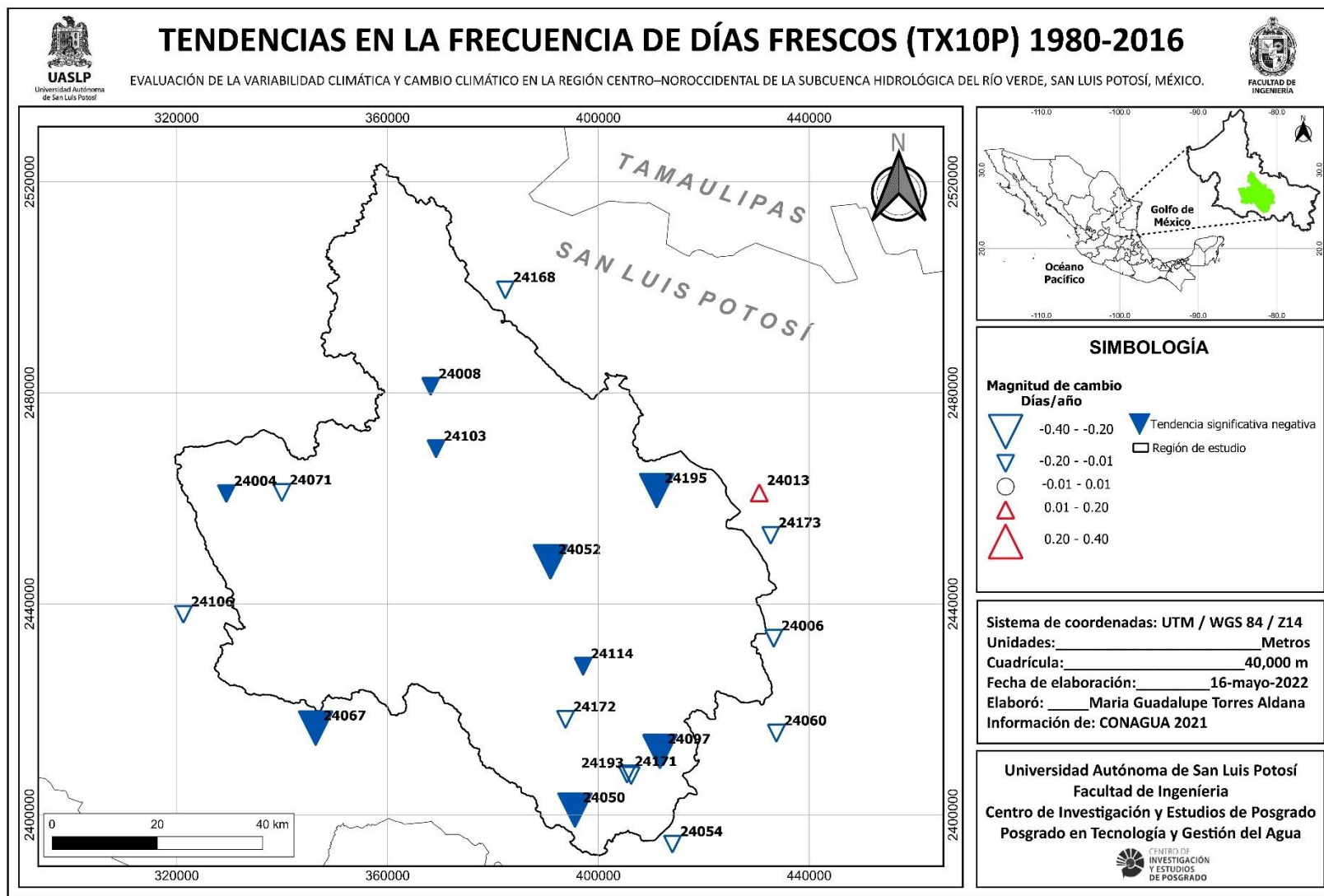


Figura 66. Tendencias en la frecuencia de días frescos (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

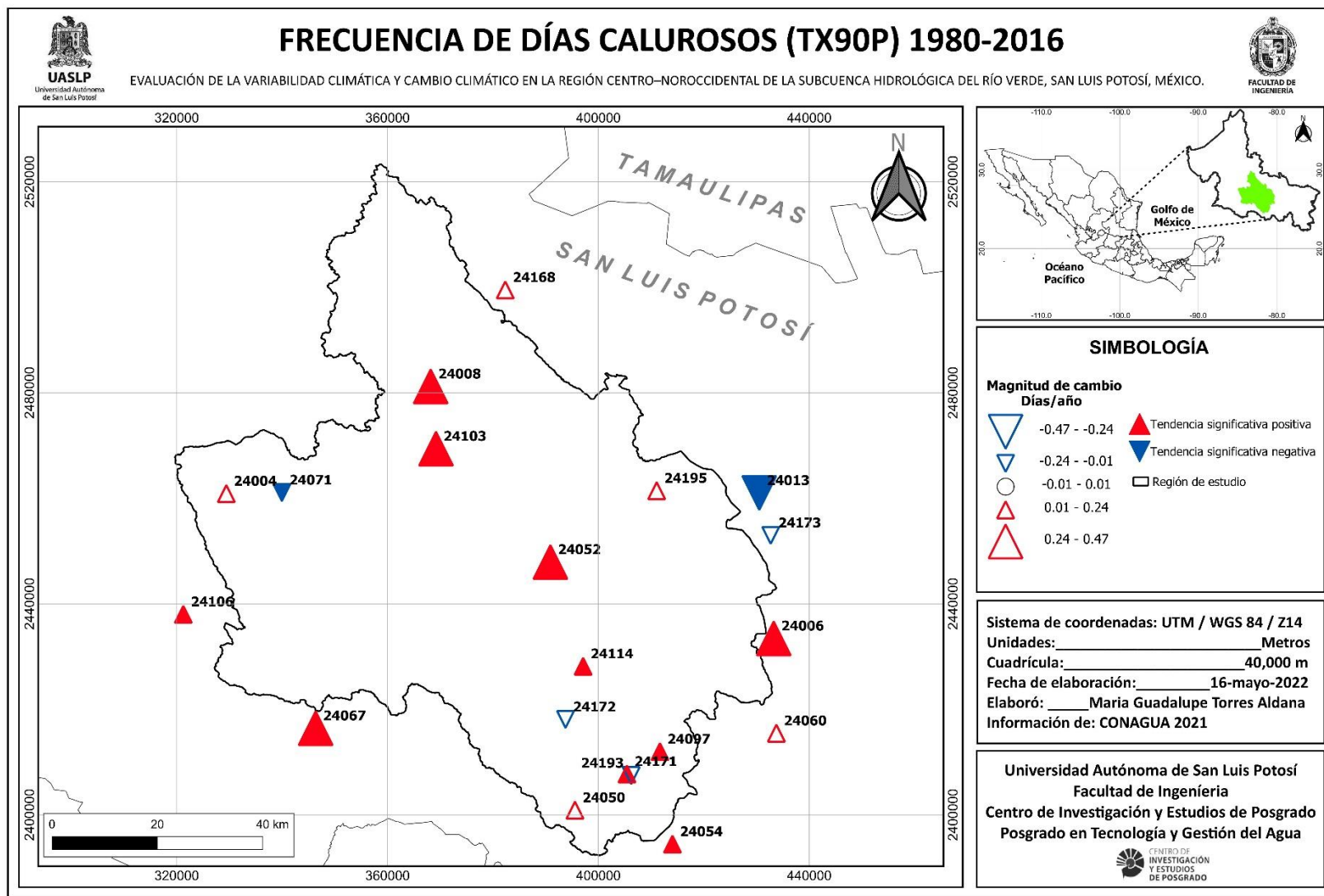


Figura 67. Tendencias en la frecuencia de días calurosos (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

El índice denominado frecuencia de noches frías (TN10P) presentó tendencias significativas de decremento en el norte, oeste, centro y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24071, 24052 y 24193), asimismo, al oeste y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24106 y 24173), con magnitudes de cambio de  $-0.14$  a  $-0.38$  días·año<sup>-1</sup>. Sin embargo, se registró una tendencia significativa de incremento al sur de la subcuenca (estación 24172) con magnitud de cambio de  $0.34$  días·año<sup>-1</sup> (Figura 68).

Respecto a los resultados del índice que representa la frecuencia de noches cálidas (TN90P), se registraron tendencias significativas de decremento hacia el oeste y sur de la subcuenca (estaciones 24004, 24172, 24097 y 24050), asimismo al oeste y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24067 y 24013), con tasas de cambio de  $-0.12$  a  $-0.51$  días·año<sup>-1</sup>. Además, se registraron tendencias significativas de incremento al norte y sur de la subcuenca (estaciones 24008 y 24193) y al oeste y este de los límites de la región de estudio (estaciones 24106 y 24173) con tasa de cambio de  $0.40$  y  $0.20$  días·año<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 69).

En términos de topografía, las noches frías registraron reducciones principalmente en la zona alta y centro-norte del valle, mientras que las noches cálidas presentaron decrementos principalmente en la zona sur del valle y en menor proporción en la región alta.

El índice que representa el rango diurno de temperatura (DTR), registró tendencias significativas de incremento en el norte, centro, este y sur de la subcuenca (estaciones 24008, 24103, 24052, 24114, 24195, 24172, 24097 y 24050), de igual manera al norte, oeste, este y sur de los límites de la región de estudio (estaciones 24168, 24067, 24013 y 24054), con tasas de cambio de  $0.03$ -  $0.21$  °C·año<sup>-1</sup>. Por otro lado, se registraron tendencias significativas de decremento al sur de la subcuenca (estación 24193) así como al oeste y este de los límites de la región de estudio (24106 y 24173) con tasa de cambio de  $-0.40$  a  $-0.70$  °C·año<sup>-1</sup> (Figura 70). Las tendencias de incremento de dicho índice se concentraron principalmente en la zona del valle específicamente en zona contigua a la región montañosa y en la zona más baja de la subcuenca.

Finalmente, el índice que representa los periodos cálidos (WSDI), únicamente registró una tendencia significativa de incremento al centro de la subcuenca (estación 24052), mientras que el índice que hace referencia a los periodos fríos (CSDI), no registró tendencias significativas.

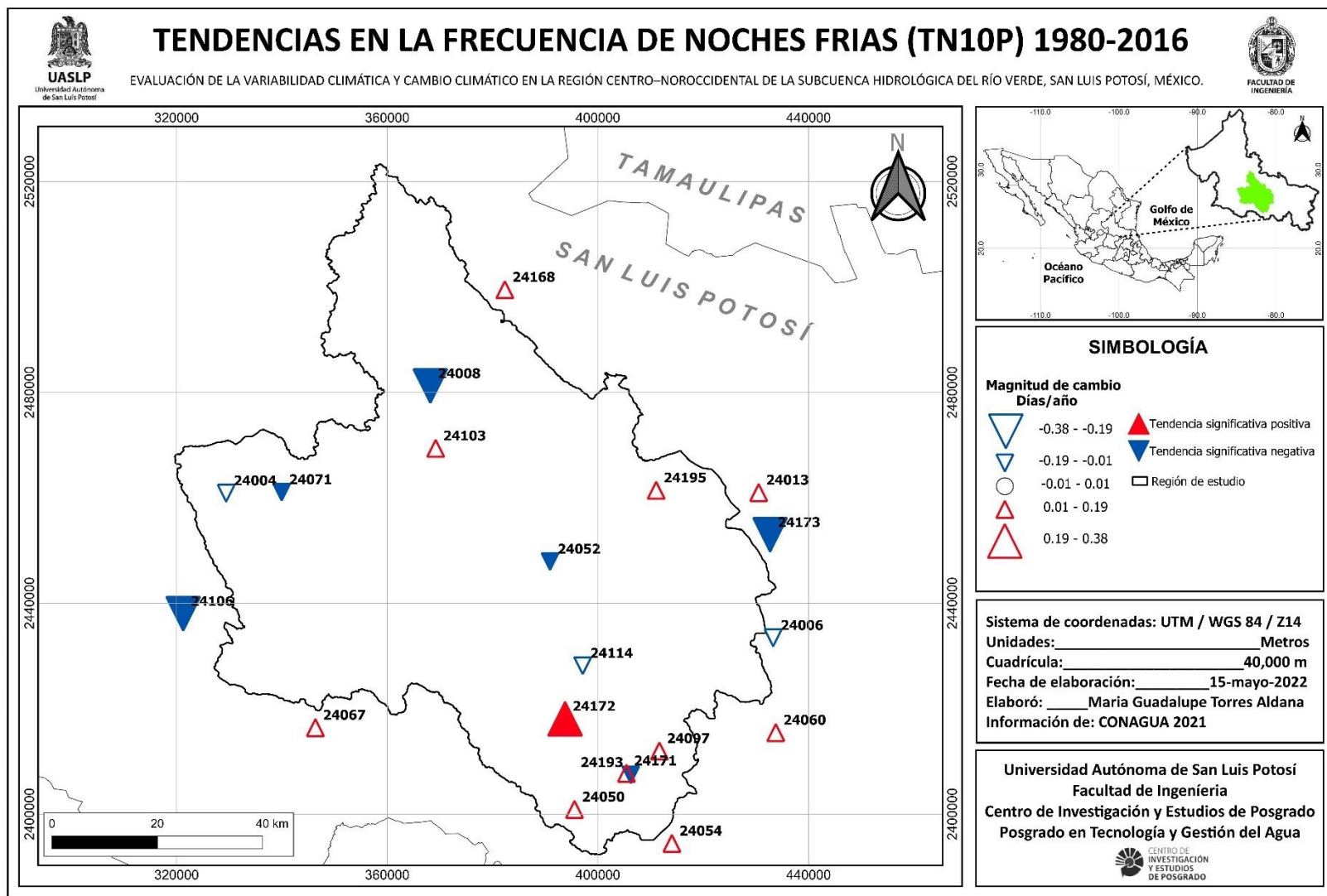


Figura 68. Tendencias en la frecuencia de noches frías (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

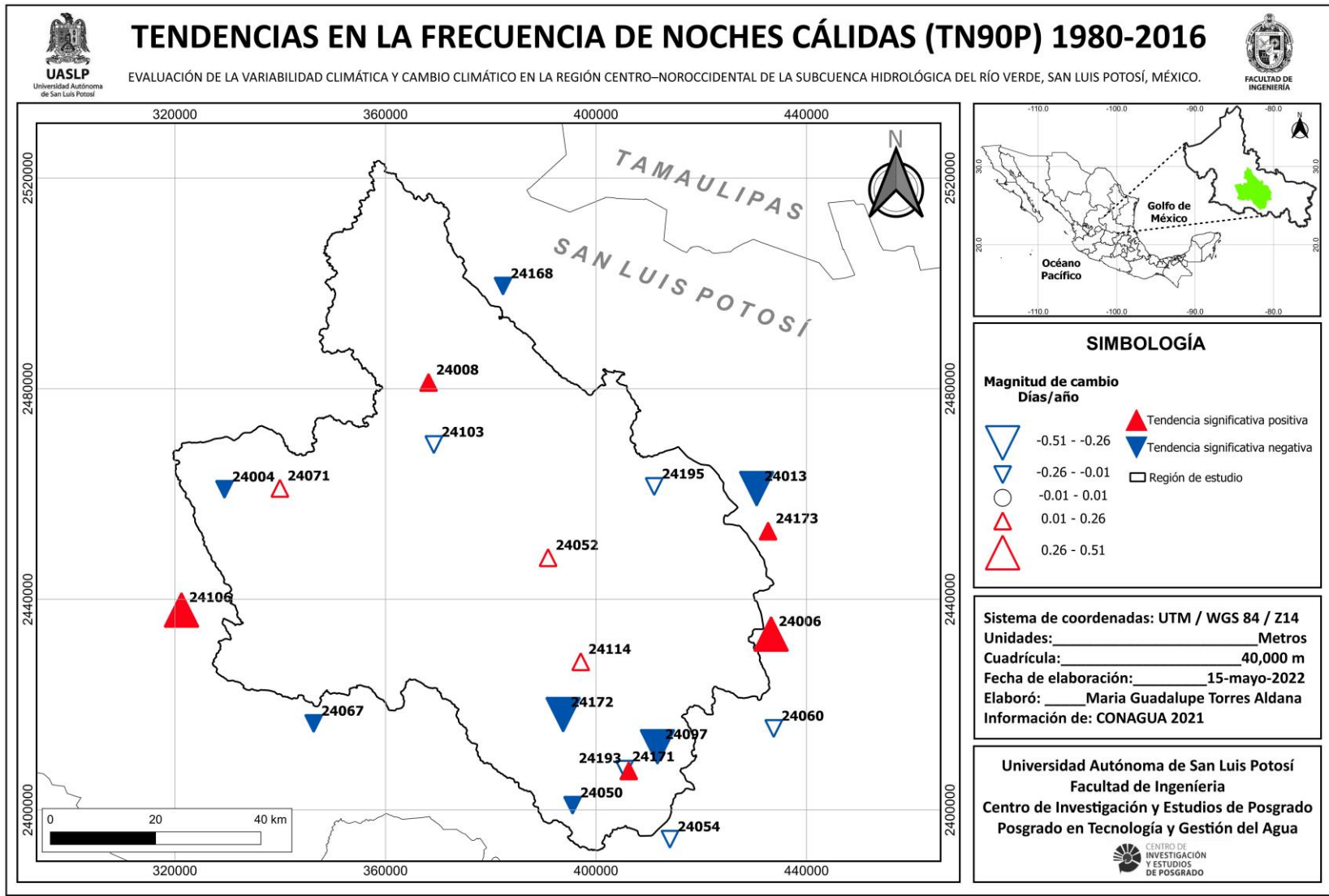


Figura 69. Tendencias en la frecuencia de noches cálidas (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).

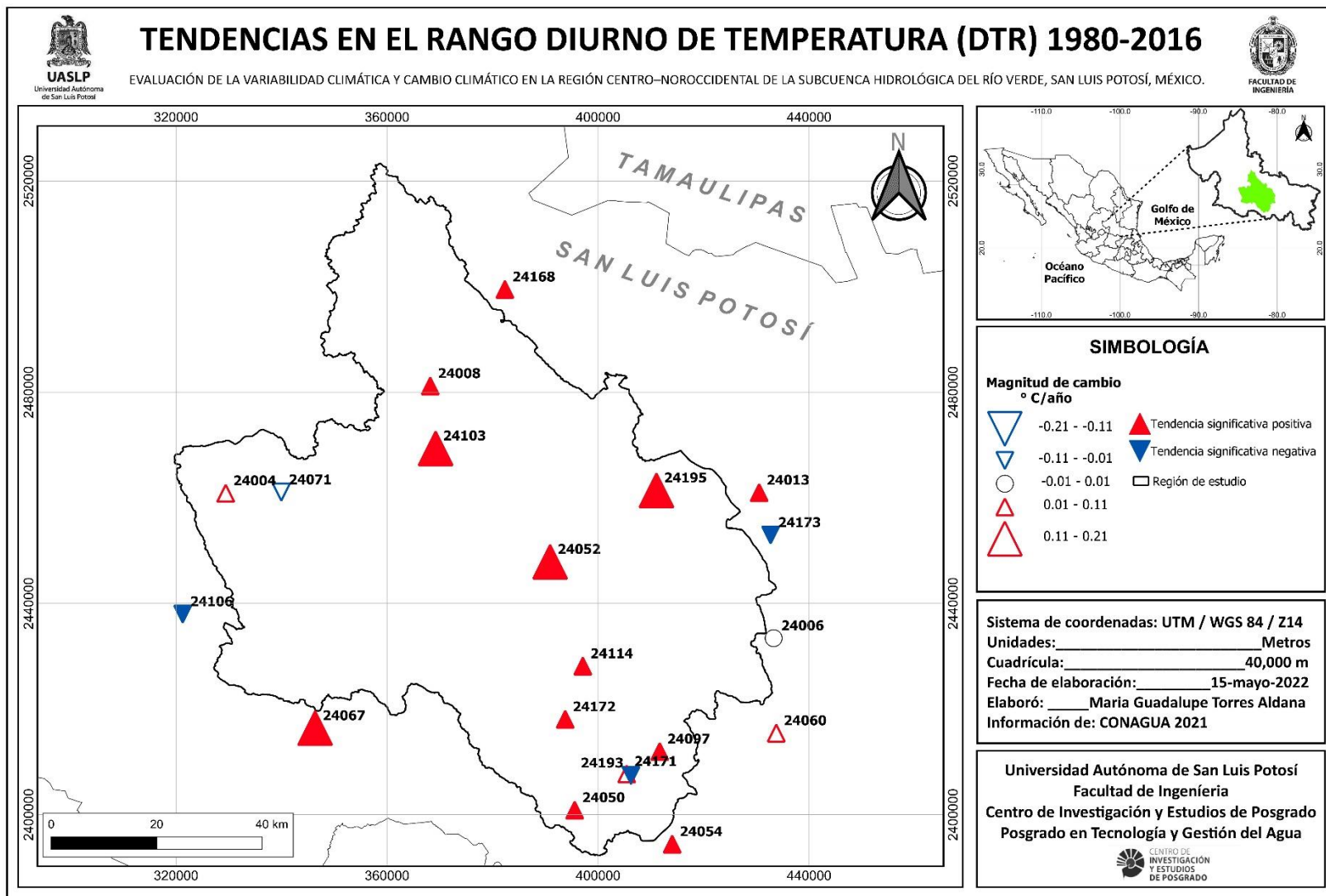


Figura 70. Tendencias en el rango diurno de temperatura (Elaboración propia con base en CONAGUA, 2022).





## **5. Análisis y discusión de los resultados.**

A continuación, se presenta la interpretación del análisis de los resultados de la variabilidad climática, la cual se llevó a cabo de manera espacio-temporal (escalas mensual y anual), considerando las estaciones del año de la siguiente manera: invierno (enero, febrero y marzo), primavera (abril, mayo y junio), verano (julio, agosto y septiembre) y otoño (octubre, noviembre y diciembre); en términos del SPI, la descripción se realizó de forma espacio-temporal (escala mensual, anual, estación húmeda y seca). Finalmente, con respecto a la evaluación de los índices de cambio climático, se realizó la interpretación de los resultados espacialmente, únicamente en los índices más relevantes para la zona de estudio. Los resultados del análisis de tendencias y rupturas de las cuatro variables de estudio, se presentan de manera general en las Tablas 11 a 18 y se representan en las Figuras 16 a 44. A partir de los mapas, se logran identificar las tendencias significativas positivas y/o negativas a nivel local y regional en los meses con mayores registros de tendencias (20 y 30 % en la precipitación total y temperaturas, respectivamente), asimismo, se logró detectar si las tendencias significativas presentaron rupturas y en cual década.

### **5.1 Análisis y discusión de resultados de la precipitación total**

En términos de precipitación total, se identificó que en el periodo evaluado (1980-2018), existen tendencias contrastantes (positivas y negativas) en distintos meses. En invierno se presentaron tendencias negativas durante enero y febrero; sin embargo, las tendencias significativas que predominaron son de incremento específicamente el mes de marzo en la zona oeste y sur de la subcuenca (Figura 17). En primavera predominaron las tendencias de reducción en los meses de abril y mayo, mientras que en junio existe una tendencia predominantemente de incremento, sin embargo, las tendencias significativas se presentaron principalmente en el mes de mayo (Figura 18).

Durante el verano, se registraron tendencias negativas durante en el mes de julio, mientras que en agosto y septiembre se presentaron tendencias principalmente de incremento, no obstante, las tendencias significativas predominaron en el mes de septiembre en las regiones norte y oeste del interior de la subcuenca (Figura 19).

En el otoño, se presentaron tendencias principalmente de incremento durante octubre y noviembre, no obstante, en diciembre se presentaron tendencias especialmente de reducción; sin embargo, las tendencias significativas, se registraron en octubre al sur de la subcuenca y en diciembre al centro y sureste de la región de estudio (Tabla 11).

A escala anual, se registraron tendencias contrastantes en las diferentes estaciones meteorológicas, sin embargo, solo se presentó una tendencia significativa positiva al sur de la subcuenca, lo que denota que no existe una tendencia dominante en la precipitación total anual (Figura 16).

Regionalmente, los registros de las tendencias son contrastantes a nivel mensual; a escala anual la tendencia es de incremento, no obstante, dichas tendencias no son significativas en la región de estudio. Por otra parte, en algunos casos donde se presentaron tendencias significativas, se detectaron rupturas, es decir, un punto de cambio en la media de la precipitación total a corto plazo, específicamente en las décadas de 1990 y del 2000; en términos de rupturas, el comportamiento espacio-temporal es irregular (Tabla 15).

## **5.2 Análisis y discusión de resultados de la temperatura media**

Con respecto a la temperatura media en el periodo evaluado (1980-2018), los resultados registraron tendencias principalmente de incremento y en menor medida tendencias de decremento. De manera específica en el invierno, predominan las tendencias positivas y en pocas estaciones tendencias negativas durante los meses de enero, febrero y marzo (Tabla 12); las tendencias significativas son de incremento y se presentaron principalmente en el mes de febrero al norte y centro de la región de estudio (Figura 31).

Por su parte, los resultados correspondientes a la estación de primavera, registraron tendencias de incremento y decremento de la temperatura media en los meses de abril, mayo y junio, no obstante, las tendencias significativas que predominan son de incremento especialmente en el mes de abril, en las zonas norte y centro de la subcuenca (Figura 32), así también durante mayo y junio se registraron el mismo patrón en las mismas zonas de la subcuenca, solo que en menor medida (Tabla 12).

En el verano se presentaron tendencias mayormente de incremento y en menor porcentaje tendencias de decremento, en los meses de julio, agosto y septiembre. Sin embargo, las tendencias significativas que predominan son de incremento, especialmente en agosto y septiembre las tendencias se registraron en la gran mayoría del territorio: norte, centro, este y sur de la región de estudio (Figuras 34 y 35), en el mes de julio, se presentó el mismo patrón solo que en menor medida (Figura 33).

Por otro lado, durante el otoño, existen tendencias contrastantes en los meses de octubre, noviembre y diciembre; sin embargo, las tendencias significativas que predominan son de incremento en octubre y diciembre, en la zona norte y centro de la subcuenca (Figuras 36 y 38). Por lo contrario, en noviembre se presentó una reducción significativa en la zona sur de la subcuenca (Figura 37).

A escala anual, se registraron tendencias principalmente positivas, asimismo, las tendencias significativas fueron principalmente de incremento en la zona norte, oeste, centro y sueste de la subcuenca, lo que reveló un incremento en las tasas de la temperatura media anual (Figura 30).

La región de estudio presentó tendencias positivas en la mayor parte de los meses, sin embargo, los incrementos significativos se presentaron en febrero, abril, mayo, julio, agosto, septiembre y octubre, asimismo, a escala anual (Tabla 12).

Además, en la mayoría de las tendencias significativas, se identificaron rupturas, principalmente en la década de 1990. Mientras que, en la década del 2000 se registraron rupturas en menor medida, se detectó un comportamiento similar en términos espaciales de rupturas durante la década de 1990 principalmente en el centro y norte de la subcuenca durante febrero, abril, julio y agosto y a escala anual. Regionalmente, la zona de estudio presentó rupturas en todas las tendencias significativas de incremento a escalas mensual y anual, específicamente en la década de 1990 (Tabla 16).

### **5.3 Análisis y discusión de resultados de la temperatura máxima extrema**

Por otro lado, los resultados de la temperatura máxima extrema correspondientes al periodo 1980-2018, registraron tendencias principalmente de incremento y en menor medida de decremento. Con respecto a la estación del invierno, en términos generales, las tendencias significativas fueron de incremento en enero, hacia la zona norte y centro de la subcuenca (Figura 21); en febrero, las tendencias se concentraron en la zona norte, este y centro (Figura 22) y respecto al mes de marzo, las tendencias de incremento se presentaron en el norte y sur de la subcuenca (Figura 23).

Durante la primavera, se presentaron tendencias contrastantes en los meses de abril y junio, mientras que en mayo las tendencias que predominaron son positivas. Ahora bien, las tendencias significativas que prevalecieron son de incremento, principalmente en abril en las zonas norte y centro de la subcuenca (Figura 24), asimismo en mayo y junio, se registraron incrementos en las mismas regiones que en durante mayo, solo que en menor medida.

Durante el verano, se presentaron tendencias predominantemente positivas durante los tres meses (julio, agosto y septiembre). No obstante, las tendencias significativas fueron de incremento durante julio, específicamente en el norte, este, centro y sur de la subcuenca (Figura 25); en agosto se registraron principalmente en el norte, centro, oeste y sur de la región de estudio (Figura 26), mientras que en septiembre se presentaron en menor medida y se localizaron en el norte y este de la subcuenca (Figura 27).

En el otoño, se registraron tendencias principalmente de incremento durante los meses de octubre y diciembre, mientras que en noviembre existen tendencias contrastantes. En general, las tendencias significativas se presentaron en octubre al norte, centro y este de la subcuenca (Figura 28) y en diciembre en el centro y este de la región de estudio, mientras que al sur se presentó una tendencia negativa (Figura 29).

A escala anual, las tendencias que prevalecieron son las positivas, en menor medida se registraron tendencias negativas, sin embargo, las significativas correspondieron en su mayoría a las tendencias de incremento específicamente en las regiones norte, centro y este (Figura 20), lo que representa un incremento en las tasas de la temperatura máxima anual.

En la región de estudio se presentaron tendencias de incremento durante todas las estaciones del año y evidentemente a escala anual, asimismo, las que tendencias significativas de incremento se registraron durante las 4 estaciones del año (a excepción de los meses junio, noviembre y diciembre); de igual manera a nivel anual (Tabla 13).

Por otro lado, en algunas tendencias significativas, se detectaron rupturas especialmente en las décadas de 1990 y del 2000. De manera particular en las rupturas correspondientes a la temperatura máxima extrema, no se detectó un comportamiento similar de manera espacial y temporal, puesto que, en algunos meses, hay regiones que presentaron ruptura en la década 1990 y en otros meses en la década de 2000 (Tabla 17).

#### **5.4 Análisis y discusión de resultados de la temperatura mínima extrema**

En términos generales, los resultados de la temperatura mínima extrema registraron tendencias contrastantes a nivel mensual y anual. De manera particular, durante el invierno, se presentaron tendencias positivas y negativas en el mes de enero, febrero y marzo; no obstante, las tendencias significativas son pocas y se presentaron principalmente en los límites de la subcuenca (Tabla 14).

En la estación de la primavera, se presentó un panorama similar al antes mencionado. Sin embargo, las tendencias significativas se presentaron principalmente en mayo donde prevalecieron las negativas en las zonas este y sur de la subcuenca (Figura 40), mientras que, en el mes de junio predominaron las de incremento en el oeste, centro y sureste de la región de estudio (Figura 41).

En el verano, se presentaron tendencias contrastantes, sin embargo, las que predominaron son las positivas en julio, agosto y septiembre. En general, las tendencias significativas de incremento en septiembre se presentaron en las regiones oeste, centro y sureste de la subcuenca (Figura 44) y, en los

meses de julio y agosto se registraron en el norte, oeste, centro y sureste; por su parte las tendencias negativas se presentaron al sur de la subcuenca en ambos meses (Figuras 42 y 43).

Por otro lado, en el otoño, se observaron tendencias contrastantes durante los tres meses respecto a las tendencias significativas son pocas, contrastantes y se registraron principalmente en los alrededores de la región de estudio (Tabla 14).

Las tendencias anuales de la temperatura mínima extrema son contrastantes y coinciden con el comportamiento mensual. Respecto a las tendencias significativas, las positivas se presentaron en las zonas oeste, este y sur, mientras en las dos últimas zonas, de igual forma se registraron algunas tendencias negativas (Figura 39). La subcuenca hidrológica de estudio presentó tendencias contrastantes a nivel mensual y anual. Sin embargo, las tendencias significativas son de incremento únicamente en los meses de agosto y septiembre en términos de temperaturas mínimas extremas (Tabla 14).

En algunos casos donde se presentaron tendencias significativas a escalas mensual y anual, se registraron rupturas en las cuatro décadas de estudio (1980, 1990, 2000 y 2010). Sin embargo, la mayor parte de los resultados se presentaron durante las décadas de 1990 y 2000, concordando con los resultados de la temperatura media y máxima extrema. Con base en lo anterior, no se identificó un comportamiento espacio-temporal uniforme en los resultados de las rupturas de la temperatura mínima extrema (Tabla 18).

## **5.5 Análisis y discusión de las cuatro variables de estudio**

En general, con base en lo antes mencionado, se logró apreciar que, en la temporada de invierno (específicamente en el mes de marzo), se registró un incremento en la precipitación total, asimismo en la temperatura media y máxima extrema (enero, febrero y marzo), sin embargo, hasta el momento la temperatura mínima extrema no presentó una tendencia significativa dominante.

En la primavera, se presentó una reducción de la precipitación (mayo), mientras que en las temperaturas media y máxima extrema se conservó la tendencia de incremento (abril, mayo y junio) y en la temperatura mínima no se presentó una tendencia dominante.

En el verano, se incrementó la precipitación total (específicamente en el mes de septiembre), temperatura media (agosto y septiembre); temperatura máxima y mínima extrema (julio, agosto y septiembre) predominaron las tendencias de incremento; es decir, prevalecieron las tendencias positivas en las cuatro variables de estudio durante dichos meses.

Por su parte, en el otoño, la precipitación presentó tendencias contrastantes (específicamente en el mes octubre), asimismo, existe un incremento en la temperatura media, predominaron las tendencias positivas durante octubre y diciembre; mientras que en noviembre se registró una reducción; respecto a la temperatura máxima extrema se registró un incremento (octubre y diciembre), mientras que en la temperatura mínima no se denota una tendencia dominante.

En términos anuales, la precipitación total, no presentó una tendencia dominante, mientras que, en las temperaturas media y máxima, se registraron tendencias de incremento; respecto a la temperatura mínima extrema se presentaron tendencias contrastantes.

Las tendencias significativas que prevalecieron a escala regional en la subcuenca hidrológica del Río Verde son de incremento en las variables de temperatura media y máxima extrema en las 4 estaciones del año y a escala anual, mientras que la temperatura mínima extrema, únicamente presentó incrementos durante el verano.

Con base en lo anterior, se logró apreciar que no existe una relación directa entre las cuatro variables de estudio, es decir, la precipitación presentó tendencias contrastantes (aumento y decremento) o en su defecto no registró tendencia a nivel anual, por lo que se observó que no existe una relación en los cambios de esta variable con respecto a las temperaturas.

No obstante, las temperaturas media y máxima extrema presentaron una influencia entre ambas variables, puesto que las temperaturas máximas extremas se están incrementando durante las cuatro estaciones y de igual manera a escala anual, dichos comportamientos inciden directamente en que las temperaturas medias se están incrementando a nivel mensual y anual; sin embargo, las temperaturas mínimas extremas no registraron una tendencia dominante a excepción de la temporada de verano, donde la tendencia registrada es de incremento.

En términos de topografía, en el análisis de las cuatro variables de estudio no se identificó que las tendencias se concentraran en una región específica tales como zonas altas (montañas), zona de valle contigua a la región montañosa o en la zona más baja del valle, algunas variables tales como las temperaturas medias y máximas extremas se presentaron principalmente en la mayor parte de la región de estudio.

Por otro lado, es relevante mencionar que recientemente se han desarrollado investigaciones enfocadas en el análisis de tendencias en variables meteorológicas. En México, en el estado de Aguascalientes, Ruiz-Álvarez *et al.* (2016), determinaron tendencias en las temperaturas extremas (máximas y mínimas) de por lo menos 30 años, con respecto a la temperatura máxima predomina la tendencia de incremento, y en la temperatura mínima se denota que existe un comportamiento

contrastante (incremento y decremento); dichos resultados concuerdan con los resultados de la presente investigación en términos de temperaturas extremas. En el estado de San Luis Potosí se han identificado tendencias significativas en la precipitación y temperaturas; Hernández-Constantino (2020), identificó un incremento en la precipitación en los alrededores de la zona metropolitana en el periodo 1979-2013.

En la región altiplano (RA) y región huasteca (RH) del estado de San Luis Potosí, Jaimes-Arredondo (2022), analizó tendencias de temperatura media, máxima y mínima extrema, así como de precipitación total para el periodo 1975-2018. En la RA, detectó incremento de precipitación en verano y reducción en otoño, mientras que, en la RH, se presentaron tendencias contrastantes, principalmente en el otoño. A nivel anual no registró una tendencia dominante a nivel regional en ambas zonas de estudio al igual que en la subcuenca del Río Verde.

En la temperatura media anual identificó tendencias contrastantes, no obstante, se registró un incremento predominante a nivel mensual y anual, asimismo a escala regional en la RA y RH coincidiendo con los resultados de la región de estudio.

Con respecto a la temperatura máxima extrema en la RA, presentó tendencias principalmente de incremento a nivel local y regional en las cuatro estaciones del año y a escala anual. Por su parte en la RH, presentó tendencias principalmente de incremento a nivel local y regionalmente en las cuatro estaciones, el comportamiento de dicha variable concuerda con el de la región de estudio, a excepción de que en la RH no registró una tendencia significativa anual.

En la temperatura mínima extrema en la RA, encontró tendencias contrastantes a nivel local durante las cuatro estaciones del año y a nivel anual, a nivel regional se presentó un incremento en febrero y septiembre. En la RH, se registró incremento local en los meses de las cuatro épocas anuales, y de manera regional en los meses de verano e invierno y a nivel anual. En la región de estudio (subcuenca del Río Verde), las tendencias son contrastantes a nivel mensual y anual, a nivel regional se registró un incremento en agosto y septiembre, sin embargo, a nivel anual no hay tendencia significativa.

## **5.5 Análisis y discusión del SPI**

Los resultados del análisis del SPI-3 a escala mensual correspondientes al periodo evaluado (1980-2018), registraron tendencias principalmente negativas (condiciones más secas) durante el invierno y primavera; en verano contrastantes y en otoño principalmente positivas; no obstante, las tendencias significativas fueron escasas y en su mayoría de incremento (condiciones más húmedas) durante el

otoño; sin embargo, dichas tendencias se presentaron a escala local y a nivel regional aún no se denota una tendencia significativa (Tabla 20).

Por su parte, los resultados del análisis mensual correspondientes al SPI-12, presentaron tendencias contrastantes durante las cuatro estaciones y, con relación a las pocas tendencias significativas de incremento, se presentaron únicamente en una estación al sur de la subcuenca, durante el invierno, primavera y otoño, no obstante, a nivel regional no existen tendencias significativas. Por lo que se asume que los episodios de sequías hidrológicas no presentaron una tendencia significativa a escala mensual durante el periodo de estudio 1980-2018 (Tabla 21).

Respecto a los resultados de las tendencias del SPI-3, a escala anual y por estación seca (noviembre-mayo) y húmeda (mayo-octubre), se aprecia un incremento significativo en el sur de la subcuenca hidrológica y en la zona norte a nivel anual y en la estación húmeda, por lo que en dichas zonas se registró una tendencia a presentarse condiciones más húmedas, en la estación seca el comportamiento es similar a excepción de la zona norte. En la mayor parte de la región de estudio se registraron tendencias de decremento que representan condiciones de sequía meteorológica, sin embargo, hasta este momento, solo existe una tendencia significativa negativa (Figuras 45, 46 y 47). Cabe mencionar que el comportamiento de las tendencias fue similar a nivel anual y en ambas estaciones (húmeda y seca).

Por otro lado, los resultados correspondientes al SPI-12 a escala anual, estación seca y estación húmeda, registraron un comportamiento similar al del SPI-3; las tendencias significativas de incremento, de igual manera se presentaron al norte y sur de la subcuenca mientras que en la mayor parte de la región de estudio, existen tendencias negativas, siendo pocas las tendencias significativas (Figura 48, 49 y 50).

De manera general, se aprecia que, en la mayor parte de la región de estudio a excepción de las zonas norte y sur, se presentaron tendencias de decremento en el SPI-3 y SPI-12, lo que denota que hay una tendencia dominante a condiciones de sequía meteorológica e hidrológica, aunque hasta el momento son pocas significativas.

Las tendencias del SPI-3 y SPI-12 son predominantemente negativas y muy pocas son significativas, se localizan en regiones altas y bajas de la región de estudio sin un patrón espacial definido.

No obstante, en el estado cercano de Zacatecas, Magallanes-Quintanar *et al.* (2019), estimaron el SPI a escalas de 6 y 12 meses, dichos índices se analizaron a diversas escalas temporales anual, estación húmeda y seca, encontraron tendencias significativas negativas en las escalas temporales y se denotó una disminución en las tendencias del SPI-12 durante las últimas 5 décadas a lo largo de todo el



territorio estatal. Lo antes mencionado demuestra que existen tendencias de decremento en el SPI, en el estado contiguo a la región de estudio, lo que concuerda con lo identificado en la presente investigación, no obstante, hasta el 2018, las tendencias de reducción aún no son significativas en la mayoría de las estaciones.

## 5.6 Análisis y discusión del fenómeno del ENOS

El fenómeno del ENOS, no presentó una influencia en las condiciones de sequía meteorológica con respecto al componente principal I o patrón dominante, puesto que el resultado de los coeficientes de correlación es cercano a “0” en los cinco índices climáticos que se evaluaron (Tabla 26). Sin embargo, los resultados del SPI-12, registraron que el fenómeno del ENOS presentó una correlación negativa entre el patrón dominante y los cinco índices climáticos, lo que denota que cuando se presente una fase positiva o fase niño, se podrían presentar eventos de sequía hidrológica en la región de estudio; además, es probable que durante una fase negativa o fase niña, se presenten condiciones húmedas en la subcuenca hidrológica (Figura 56).

El patrón dominante del SPI-12 se distribuye principalmente en la zona de valle de la subcuenca, mientras que el resto de los CP, se distribuyen de manera dispersa

En términos de escorrentía, los resultados concordaron con lo anteriormente mencionado, es decir las correlaciones negativas entre el fenómeno del ENOS y los volúmenes de escorrentía correspondientes a la estación Nogal Oscuro (Figura 57), es decir, una gran parte de los volúmenes más elevados de escorrentía, se presentaron durante la fase negativa o fase niña, debido a que se propician mayores condiciones de precipitación y por ende se genera mayor volumen escorrentía superficial en la subcuenca del Río Verde.

Referente a los resultados de los coeficientes de correlación del ENOS con respecto a los regímenes de temperatura media, máxima y mínima extrema, indicaron que no se existe una influencia entre dichas variables (Tabla 28), por lo que dicho fenómeno únicamente influye en términos de sequía hidrológica y en escorrentías superficiales.

En diversas regiones se han desarrollado estudios que analizan la influencia del fenómeno del ENOS en diferentes variables meteorológicas; los resultados de la presente investigación concuerdan con Bravo-Cabrera *et al.* (2017), puesto que el noroeste del país posee una relación directa entre el ENOS y la precipitación, mientras que en la región sur una relación inversa.

Por su parte, Cerano Paredes *et al.* (2020) estudiaron el comportamiento temporal de las sequías a través del SPI-12 en la cuenca del Río Yaqui, Sonora donde los valores del SPI negativos extremos

están relacionados con la fase de La Niña mientras que los valores positivos más altos se relacionan con la fase de El Niño.

La región de estudio registró un comportamiento similar a la región sur del territorio mexicano presentando una correlación inversamente proporcional del ENOS *versus* el SPI-12 puesto que la subcuenca hidrológica del Río Verde se localiza en la zona centro cercana a la región sur.

### **5.7 Análisis y discusión de los índices de cambio climático**

Con respecto a los resultados de la evaluación de los índices de cambio climático en la subcuenca hidrológica del Río Verde, cabe mencionar que se estimaron los 27 índices propuestos por el ETCCDI, sin embargo, únicamente se representaron los resultados de los índices climáticos que son relevantes para la región de estudio, considerando las principales características socioeconómicas.

En términos de precipitación, se evaluaron 11 de los 27 índices, no obstante, únicamente 4 de los mismos, registraron tendencias significativas en más del 20% de las estaciones meteorológicas (Tabla 32). Particularmente, el índice de la precipitación máxima en un día (RX1day), únicamente registró una tendencia significativa positiva en el sur de la subcuenca (Figura 59). Con respecto al índice simple de intensidad diaria (SDII), que representa la precipitación total anual entre el número de días con precipitación  $\geq 1$  mm, registró tendencias significativas de incremento al norte, centro y sur de la región de estudio, lo que denota que los días lluviosos tienden a ser más intensos, es decir, precipita más cantidad de lluvia en un día (Figura 60). Sin embargo, el índice que representa el número anual de días en que la precipitación es  $\geq 25$  mm (R25), presentó tendencias significativas de incremento únicamente en una estación en el centro-sur de la región de estudio (Tabla 32). El índice que representa los días húmedos consecutivos (CWD), presentó tendencias significativas de decremento principalmente en el centro y este de la subcuenca (Figura 61), lo que denota una disminución en los periodos de días húmedos.

Por otro lado, los resultados de las tendencias de los 16 índices enfocados en las temperaturas extremas (máximas y mínimas) se registró que, en 8 índices, se presentaron tendencias significativas en más del 30 % de las estaciones meteorológicas (Tabla 33). Respecto a los días de verano (SU25), caracterizados por registrar temperaturas máximas mayores a 25 °C, predominaron las tendencias significativas de incremento al norte, centro y este de la región de estudio y solo una estación ubicada al sur presentó una reducción en el índice (Figura 62). Por otro lado, el índice que hace referencia a los días de helada FD0, presentó tendencias de reducción significativa, en una estación al oeste de la subcuenca.

En el caso de la temperatura máxima extrema (TXx), se registraron tendencias significativas de incremento al norte y centro de la zona de estudio (Figura 63), lo que representa que las temperaturas extremas tienden a ser ascendentes. En términos de temperatura máxima más baja (TXn), se observó que existe un incremento significativo en el norte, oeste y este la región de estudio (Figura 64), ahora bien, se denota un incremento significativo en las temperaturas máximas extremas y en las más bajas (TXx y TXn).

Los resultados del índice de la temperatura mínima más alta (TNx) presentaron tendencias significativas contrastantes, pese a esto, las que predominaron son las de decremento, específicamente en el oeste, este y sur de la subcuenca (Figura 65). No obstante, el índice de la temperatura mínima extrema (TNn), únicamente presentó una tendencia significativa de incremento en una estación al oeste de la subcuenca (Tabla 33).

Con respecto a la tendencia de los días TNn s frescos (TX10p), presentó una tendencia significativa dominante de decremento en la mayor parte de la zona de estudio (Figura 66), mientras que el índice que representa la frecuencia de los días calurosos (TX90p) registró una tendencia significativa positiva en la mayor parte del territorio de la subcuenca hidrológica (Figura 67), ahora bien, se denota que la frecuencia de los días calurosos incrementa mientras que la frecuencia de los días frescos disminuye.

Por su parte, la frecuencia de noches frías (TN10P), presentó tendencias contrastantes, sin embargo, las tendencias significativas de decremento dominaron en la región centro-norte de la subcuenca y sus límites, al sur se presentaron incremento sin embargo no son significativas (Figura 68); no obstante, la frecuencia de noches cálidas (TN90P) de igual forma presentó tendencias contrastantes en el centro-norte de la subcuenca, sin embargo, las tendencias significativas que predominaron son negativas (decremento) y se concentran en el sur de la subcuenca (Figura 69).

Finalmente, el rango diurno de temperatura (DTR), registró tendencias significativas de incremento en la gran mayoría de la región de estudio; lo que denota un incremento dominante en el rango de las temperatura máxima y mínima extrema, lo que representa que las temperaturas tienden a ser más extremas en ambos sentidos.

De manera general, se logra apreciar que en el 50% de los índices de temperaturas (extremas y mínimas), presentaron porcentaje mayor al 30% de tendencias significativas; respecto a los índices de la precipitación se presentaron en menor medida es decir solo el 36.4% presentó tendencias significativas en más del 20% de las estaciones.

Respecto a la topografía, únicamente tres índices (SU25, TXx y TXn) presentaron concentración de las tendencias significativas de en la zona topográficamente alta y en el valle (zona contigua a la región montañosa). Por su parte las noches frías registraron reducciones principalmente en la zona alta y centro-norte del valle, mientras que las noches cálidas presentaron decrementos principalmente en la zona sur del valle y en menor proporción en la región alta.

En diversas regiones del Planeta se han desarrollado estudios que pretenden determinar indicios de cambio climático con la evaluación de los índices del ETCCDI. En el territorio mexicano son pocos los estudios que han contemplado esta metodología, sin embargo, ya se han llevado a cabo algunos.

En Baja California Sur, Kachok & Ivanova (2019), evaluaron 16 índices del ETCCDI, periodo 1960-2012, utilizando 9 estaciones meteorológicas. El 75% de los índices mostró una tendencia al incremento (10 índices de temperatura y 2 de precipitación) y el 25% una tendencia a la reducción (3 índices de temperatura y 1 de precipitación); lo que concuerda con que las tendencias significativas predominan en términos de las temperaturas al igual que en la Subcuenca Hidrológica del Rio Verde.

En el estado de Guerrero, Mendoza-Uribe & Vázquez-Zavaleta (2017), analizaron los 27 índices del ETCCDI, en 47 estaciones meteorológicas para el periodo 1971-2000. De los 27 índices solo 5 presentaron tendencia significativa; 3 índices de precipitación mostraron tendencia de incremento (positiva): Precipitación total anual, días muy húmedos y días extremadamente húmedos. Para el caso de los índices asociados a temperatura solo dos índices: noches tropicales y duración de periodos cálidos presentaron un aumento. Lo anterior denota que, en el estado de Guerrero, aún son pocos los índices de cambio climático, de los índices presentaron tendencia, ninguno coincide con los resultados de los índices más significativos en la región de estudio.

En el estado de Zacatecas, contiguo al estado donde se localiza la región de estudio, Pita-Díaz & Ortega-Gaucin (2020), analizaron 8 índices (4 de temperatura y 4 de precipitación) del ETCCDI, periodo 1976-2015 (escalas anual y estacional). Los resultados indicaron que la precipitación, registró un incremento (norte y este), los días secos aumentaron a lo largo del estado, la precipitación máxima diaria aumentó en el verano, otoño e invierno y la precipitación máxima en 5 días mostró incrementos en invierno, primavera y verano. Con respecto a la temperatura máxima se detectó un aumento del número de días de verano y temperaturas máximas extremas más elevadas (primavera y verano). Respecto a la temperatura mínima se registró una reducción (otoño e invierno) y se observó que el número de días de heladas aumentó. Los resultados concuerdan en términos del incremento de

precipitación máxima diaria, Asimismo, los días de verano y las temperaturas máximas extremas presentaron incrementos en ambas regiones.

En el estado de San Luis Potosí, Jaimes-Arredondo (2022), analizó los 27 índices del ETCCDI, en la RA y RH, periodo 1975 a 2016; en los resultados de ambas regiones encontró mayor tendencia en las temperaturas, lo cual coincide con los resultados de la Subcuenca del Río Verde.

La RA presentó cambios de incremento en los índices: SU25, FDO, TXx, TNx, TX90p y DTR, y disminución en TXn y TNn, respecto a los índices de precipitación detectó un incremento en los índices de RX1day y SDII y reducción R95P y PRCPTOT. La RH presentó incremento en los índices: SU25, TXn, TNn y DTR, en términos de precipitación identificó decrementos en TX10p y TN10p. Referente a los índices de precipitación se detectaron cambios de manera local en algunas estaciones y solo para algunos índices.

En la RA, RH y Subcuenca del Río Verde, predominaron los incrementos en SU25 y DTR. En la región altiplano y en la región de estudio, los índices TXx, TX90p, RX1day y SDII registraron una tendencia predominante de incremento. En la RA el TNx incrementó mientras que en la región de estudio predominó la tendencia de disminución, el TXn disminuyó en la RA e incrementó en la Subcuenca del Río Verde. En la región huasteca y en la región de estudio, predominó la tendencia de incremento en el índice TXn, y existe un decremento en los índices TX10p y TN10p.

### **5.8 Análisis y discusión de la variabilidad climática vs. cambio climático**

Ahora bien, es relevante destacar que los resultados correspondientes a la evaluación de la variabilidad climática, en términos de normales climatológicas o valores medios, la precipitación total (periodo 1980-2018) registró un comportamiento contrastante en las cuatro estaciones del año, lo que representa que, en términos anuales, hasta el año 2018, no se registró una tendencia significativa dominante; sin embargo, los resultados de los 11 índices de cambio climático correspondientes a la precipitación total, hacen referencia al comportamiento de los valores extremos. Únicamente dos índices mostraron un mayor porcentaje de tendencias significativas en el interior de la región de estudio (SDII y CWD); el primero, indicó que la intensidad de la precipitación en un día se ha incrementado en la mayor parte de la subcuenca y el último, indicó que se están reduciendo los días húmedos consecutivos.

En la Figura 71, se representan en conjunto las tendencias de la precipitación total anual y los índices de la precipitación máxima en 1 día (RX1day) y el índice simple de intensidad diaria (SDII). En términos de valores medios, la precipitación no presentó una tendencia significativa en la región de estudio, únicamente tres tendencias de incremento al norte y este de los límites y al sur de la

subcuenca. En términos de extremos climáticos el Rx1day, presentó incrementos a los alrededores de la región de estudio y el SDII registró una tendencia de incremento que predomina en la región de estudio; con base en lo anterior, se denota que en términos de precipitación existen tendencias de incremento en los extremos de dicha variable como indicios de cambio climático.

Respecto a las normales climatológicas (valores medios) referentes a las temperaturas, las tendencias de las temperaturas máximas extremas y medias se han incrementado, no obstante, las temperaturas mínimas extremas presentaron un comportamiento heterogéneo en términos espaciales y temporales. Ahora bien, en lo que corresponde a los resultados de los 16 índices del ETCCDI referentes a las temperaturas (máximas y mínimas extremas) han presentado concordancia con los resultados previamente mencionados, es decir, las temperaturas máximas extremas, se han incrementado en términos de valores medios y asimismo en los valores máximos extremos, es decir, los valores promedio de las temperaturas extremas, cada vez son mayores, y el valor máximo extremo cada año es de mayor magnitud. Dicho comportamiento de las temperaturas en la zona de estudio concuerda con los estudios a escala global y nacional donde se ha observado un incremento en las tasas de temperatura.

En la Figura 72, se representan las tendencias de la temperatura máxima anual en conjunto con los índices de temperatura máxima extrema (TXx) y temperatura máxima más baja (TXn) a escala diaria, En términos de normales climatológicas, la temperatura máxima anual presentó tendencia dominante de incremento al interior y alrededores de la región de estudio, por su parte los dos índices que representan los extremos de dicha variable, registraron incrementos, principalmente en la región centro-noroccidental de la región de estudio, lo que denota que la temperatura máxima se ha incrementado en términos de valores medios y extremos.

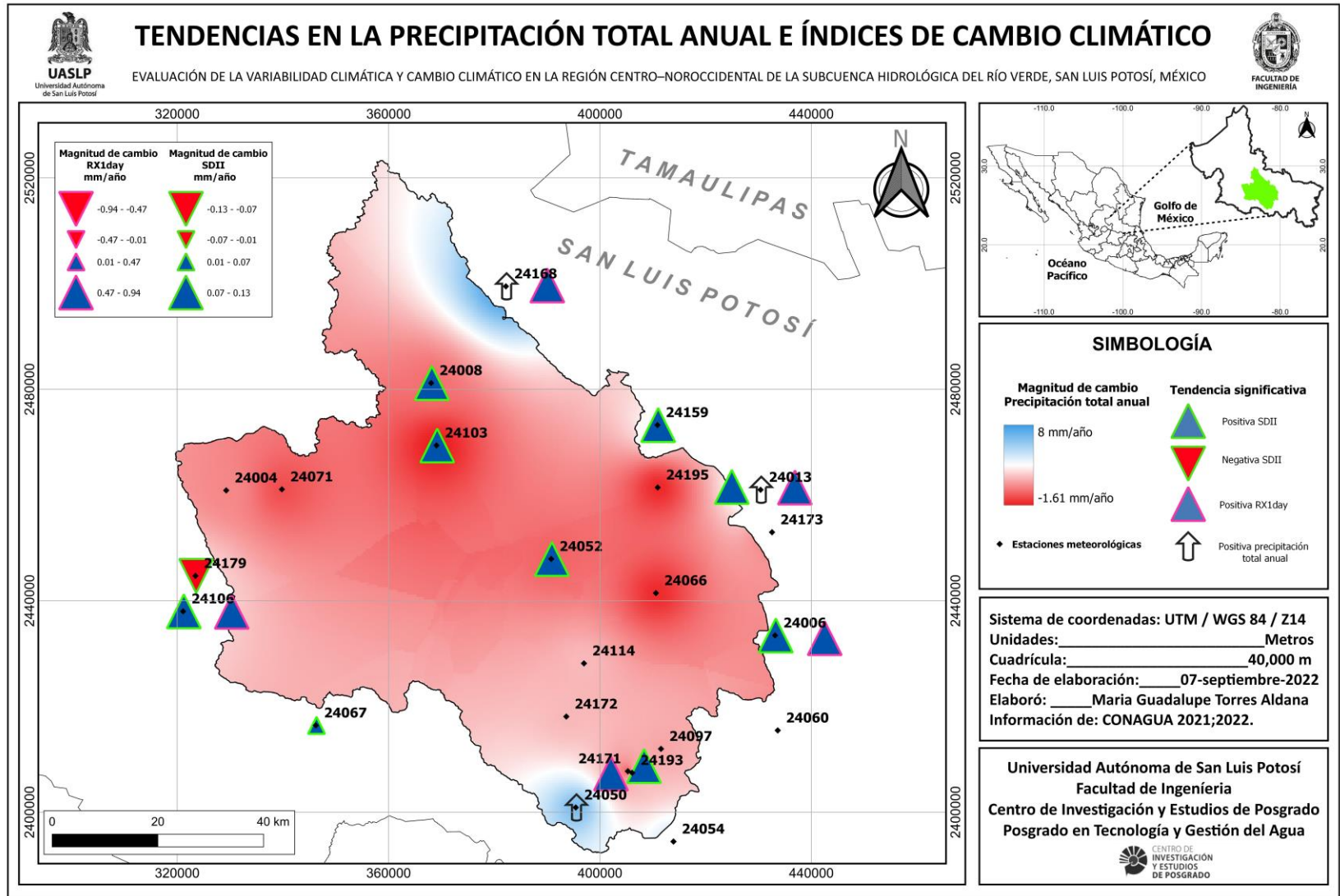


Figura 71. Tendencias en la precipitación total anual e índices de cambio climático (Elaboración propia con base en CONAGUA 2021; 2022).

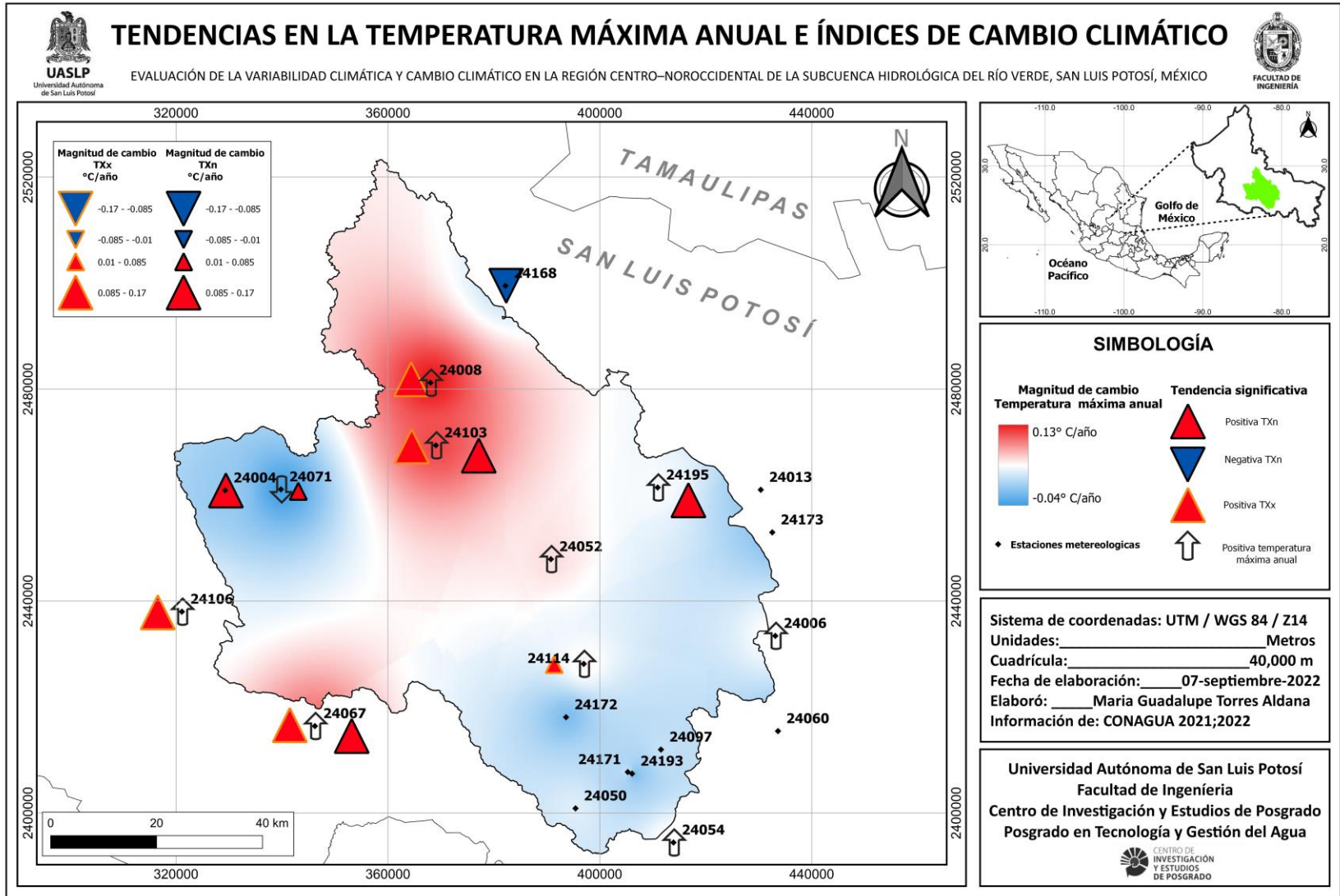


Figura 72. Tendencias en la temperatura máxima anual e índices de cambio climático (Elaboración propia con base en CONAGUA 2021; 2022).



## **Conclusiones.**

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación, se acepta la hipótesis planteada.

De acuerdo con los resultados de las tendencias y rupturas de las cuatro variables de estudio, se denotan tendencias significativas en términos de variabilidad climática, principalmente en las variables de temperatura media y máxima extrema, puesto que se presentaron tendencias significativas de incremento durante la mayoría de los meses del año y a nivel anual, lo que representa un incremento de dichas variables en todas las escalas temporales y espaciales.

Con respecto a la temperatura mínima extrema, se registraron tendencias contrastantes a nivel mensual y anual, las tendencias son contrastantes sin ningún patrón espacial definido. A escala regional no se presentó tendencia significativa.

Con base en lo anterior, no se distinguió una influencia directa entre el comportamiento de la precipitación y las temperaturas, es decir, no existe una relación directa o inversamente proporcional entre dichas variables.

Las temperaturas máximas extremas y medias, registraron tendencias dominantes de incremento, y se observó un comportamiento similar, lo que denota que existen incrementos de las temperaturas máximas y se reflejan en términos de temperaturas medias.

Con respecto a la identificación de rupturas, la precipitación total, temperatura media y máxima extrema, registraron rupturas en algunos casos de las tendencias significativas (incremento y decremento) principalmente en las décadas de 1990 y 2000; respecto a la temperatura mínima se registraron rupturas durante las cuatro décadas de estudio (1980, 1990, 2000 y 2010).

El SPI de 3 y 12 meses a escala mensual, registró tendencias significativas a nivel local, mientras que a nivel regional no registró una tendencia. En ambos índices, en las tres escalas temporales (anual, estación húmeda y seca), se registró un incremento al norte y sur de la subcuenca; por otro lado, en la mayoría de la subcuenca se presentaron tendencias de decremento, lo que revela tendencias a condiciones de sequía meteorológica e hidrológica, sin embargo, muy pocas son significativas.

El componente dominante del SPI-12 y los registros de escorrentía, presentaron una correlación inversamente proporcional al fenómeno del ENOS, lo que representa que durante las fases “Niño” o fase negativa, es probable que se presenten eventos de sequía hidrológica en la región de estudio.

Las tendencias de los índices climáticos del ETCCDI, denotan indicios de cambio climático en la región de estudio, principalmente en los índices referentes a las temperaturas extremas, lo anterior, se manifiesta en un incremento en el rango diurno de temperatura, días de verano, días calurosos, temperaturas máximas extremas y más bajas, asimismo una reducción de las temperaturas mínimas más altas y la frecuencia de días frescos, sin embargo, las frecuencias de noches frías y cálidas presentaron tendencias contrastantes. En lo referente a la precipitación se denota un incremento en el índice simple de intensidad diaria y la precipitación máxima en un día, asimismo un decremento en los días húmedos consecutivos.

Con base en lo anterior, se logra apreciar un incremento de los valores medios (normales climatológicas) y en los extremos de las temperaturas máximas en la región de estudio.

Hoy por hoy, existen diversos factores que afectan directamente la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, la mayoría de estos, son de origen antropogénico, no obstante, es relevante evaluar el comportamiento del clima, puesto que posee un vínculo estrecho con el ciclo hidrológico. En términos de precipitación, no se registraron tendencias dominantes a nivel anual y regional, lo que representa un aspecto positivo; sin embargo, el incremento significativo de las temperaturas máximas extremas y medias, podría representar una afectación en los recursos hídricos de la región de estudio, puesto que se podrían alterar las tasas de evaporación y evapotranspiración, limitando el volumen disponible en las fases de escorrentía superficial, y asimismo en el proceso de infiltración y recarga de agua subterránea. Adicionalmente, es relevante considerar que cerca del 25% de la región de estudio, se destina a la agricultura de temporal y de riego, por lo cual, podrían existir afectaciones en los cultivos de la región, principalmente por el posible incremento en las tasas de evapotranspiración, generando mayor demanda del recurso hídrico, por lo que es indispensable, evaluar los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos mediante la aplicación de modelos hidrológicos y climáticos, conjuntamente analizar e implementar estrategias de adaptación y mitigación en términos de recursos hídricos y agricultura. Aunado a lo anterior, un aspecto importante sería actualizar el análisis histórico mediante la incorporación de nuevos registros meteorológicos y analizar las posibles modificaciones en la clasificación del clima de la región de estudio considerando las tendencias detectadas en las variables.

## Referencias.

- Alencar-da-Silva-Alves, K. M. & Nóbrega-Ranyére, S. (2017). Tendencia pluviométrica y concentración estacional de precipitación en la cuenca hidrográfica del río Moxotó-Pernamcuco-Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, 1 (58). DOI: 10.15359/rgac.58-1.12
- Alexandersson H (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. *Jour. of Climatol.*, 6:661-675.
- Alhaji, U. U., Yusuf, A. S., Edet C. O., Oche C. O. & Agbo E. P. (2018). Trend Analysis of Temperature in Gombe State Using Mann Kendall Trend Test. *Journal of Scientific Research & Reports*, 20(3), 1-9. DOI: 10.9734/JSRR/2018/42029
- Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. & Farias, A. A. (2015). Comportamiento de la precipitación pluvial y su relación con el relieve en las microrregiones del Cariri Oriental y Occidental del estado de Paraíba. *Revista Brasileña de Geografía Física*, 8(6), 1601-1614. DOI: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150090>
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J. & Jacipt, R. (2015). Cambio climático y variabilidad climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, norte de Santander – Colombia. *Revista Luna Azul*, (40), 127-153.
- Aragón-Hernández, J. L., Aguilar-Martínez, G. A. Velázquez-Ríos, U. Jiménez-Magaña, M. R. & Maya-Franco, A. (2019). Distribución espacial de variables hidrológicas. Implementación y evaluación de métodos de interpolación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, XX, (2), 01-15. DOI: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n2.023>
- Bastidas, L. B., Vich A. I. J. & Piccolo M.C. (2020). Methodological proposal to filling monthly temperature gaps in time series without adjacent stations. *Investigaciones Geográficas*, 103. DOI: 10.14350/riig.60038.
- Bedoya, M., Contreras, C. & Ruiz, F., (2010). Alteraciones del régimen hidrológico y de la oferta hídrica por variabilidad y cambio climático., en: *Estudio nacional del agua 2010*, 40.
- Bong, C. H. J. & Richard J. (2020). Drought and climate change assessment using Standardized Precipitation Index (SPI) for Sarawak River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 11 (4). DOI: 10.2166/wcc.2019.036
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V. & Gay-García, C. (2017). Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmósfera* 30(3), 221-232. DOI: 10.20937/ATM.2017.30.03.03
- Campos-Aranda D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San Luis Potosí, México. Editorial Universitaria Potosina.
- Campos-Aranda D. F. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Primera edición. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Quantification of monthly meteorological droughts: Comparison of four indices in three locations of San Luis Potosí, Mexico. *Water Technology and Sciences* 8 (3), 159-172.
- Castro-Heredia L. M., Carvajal-Escobar, Y. & Ávila Díaz- Á. J. (2012). Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 11, 11-19.
- Castro-Lazcarro, M. G. (2019). *Influencia de la variabilidad climática en el lago de Chapala, Jalisco*. Tesis de Maestría. Universidad Autónomas de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Cerano Paredes, J., Esquivel Arriaga, G., Sánchez Cohen, I., & Estrada Arrellano, J. R. (2020). Analysis of meteorological droughts in the Yaqui River Basin, Mexico and its relationship with ENSO. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (86). DOI:10.21138/bage.2937

- Charcas-Salazar, H., Aguirre-Rivera, J.R., Durán-García, H.D., & Potosí Altair, L. C. (2012). Irrigated soils in region of Rioverde, San Luis Potosi, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3), 509–523.
- Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC). (2012). México, Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Comisión Metropolitana y de Conurbación de Rioverde Ciudad Fernández (CMCRCF). (2021). Programa Metropolitano y de Zona Conurbada de Rioverde, que comprende los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández, S. L. P. Rioverde y Ciudad Fernández, San Luis Potosí.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2007). Regiones Hidrológicas. Escala 1:250000. República Mexicana. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rh250kgw.xml?\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rh250kgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). Base de datos hidrométricos. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Recuperado de: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Archivos de la Subgerencia Técnica: Registros de precipitación total mensual, temperatura máxima extrema mensual y temperatura mínima extrema mensual. Dirección Local en San Luis Potosí. San Luis Potosí, S. L. P.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (26-04-2022). Índice estandarizado de precipitación (SPI). Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (16-02-2022). Información estadística climatológica. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Consejo Estatal de Población (COESPO). (16-03-2022). Infografías municipales. San Luis Potosí. Gobierno del estado de San Luis Potosí. Recuperado de: <https://slp.gob.mx/coespo/Paginas/Infografias-Municipales.aspx>
- Cruz-Roa, A. F. & Barrios M. I. (2018). Estimation of monthly rainfall missing data through rain gauge and satellite data assimilation in a tropical Andean river basin. *IDESIA* 2018. 107-117. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005001601>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (02/10/2014) Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Río Verde, clave 2415, en el Estado de San Luis Potosí, región hidrológico administrativa Golfo Norte. D. F., México. Recuperado de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5362355&fecha=02/10/2014](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5362355&fecha=02/10/2014)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (29/10/2015). Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del Programa de Manejo del Área Natural Protegida con Categoría de Parque Nacional El Potosí. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5413566&fecha=29/10/2015](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5413566&fecha=29/10/2015)
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (26-04-2017). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Río Amajac, Río Verde 1, Río Verde 2, Río Verde 3, Río Tamasopo 1, Río Tamasopo 2, Río Gallinas, Río El Salto, Río Valles, Río Tampaón 1, Río Choy, Río Coy 2, Río Tampaón 2, Río Huichihuayan, Río Moctezuma 3, Río Moctezuma 5 y Río Pánuco 1. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5484625](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5484625)
- Dommenget, D. & Latif, M. (2002). A Cautionary Note on the Interpretation of EOFs. *Journal of Climate* 15, 216– 225.

- Esquivel-Arriaga, G., Cerano-Paredes, J., Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A. Flores-López, F., & Bueno-Hurtado, P. (2019). Temporal analysis of droughts (1922-2016) in the upper Nazas River Basin using SPI and its relationship with ENSO. *Tecnología y ciencias del agua*. 10 (3), 126-153. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-05
- Expert Team On Climate Change Detection Indices (ETCCDI). (23-03-2022). ETCCDI Climate Change Indices, Software. Recuperado de: <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>
- Figueroa-Gallegos, J. A. (2017). Índices de cambio climático en la cuenca del Río Grande, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 137-143. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-10.
- Finnish Meteorological Institute (FMI). (03-octubre-2021). MAKESENS-application for trend calculation. Recuperado de: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/makesens>
- Fuentes-Montepeque, J. C. (2021). Régimen pluviométrico asociado a series de tiempo máximas en la subcuenca del río Villalobos. *Agua, Saneamiento y Ambiente*. Vol. 16 (1). 12-16.
- García, E. & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (1998). Climas. Escala 1:1000000. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Gbode, I. E., Adeyeri, O. E., Menang, K. P., Intsiful, J. D. K., Ajayi, V. O., Omotosho, J. A. & Akinsanola, A. A. (2019). Observed changes in climate extremes in Nigeria. *Meteorological Applications* 26, 642–654. DOI: 10.1002/met.1791
- Gómez-Limón, J. A.; Guerrero-Baena, M. D. (2019). Diseño de un seguro indexado para la cobertura del riesgo de sequía hidrológica en la agricultura de regadío. *Agua y Territorio* (13), 79-92. DOI: 10.17561/at.13.4057
- Guijarro, J. A. (2019). Homogeneización de series climáticas con Climatol 3.1.1. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Islas Baleares, España.
- 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. San Luis Potosí, México.
- Hirsch, R. M., Hesell, D., Cohn, T. & Gilroy, E. (1992). Statistical treatment of hydrologic data. In Maidment, D.R. *Handbook of Hydrology*.
- Iglesias, A. Estrela, T. & Gallart F. 7. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. 303–354.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2009). Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. D.F., México.
- Instituto nacional de ecología y cambio climático (INECC). (16-02-2022). Capítulo II. Caracterización ambiental de México y su correlación con la clasificación y la nomenclatura de las comunidades vegetales. Ciudad de México. Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/421/cap2.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2001). Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional. Escala 1:1000000. Serie I. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2001). Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional Serie I. Subprovincias fisiográficas. Escala 1:1000000. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267599>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2010). Red hidrográfica. Escala 1:50000, Edición 2.0. Subcuenca RH26-Río Verde. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [https://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2016). Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250000 Serie VI. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?\\_httplibcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no1](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httplibcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no1)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (2018). División política municipal. Escala 1:250000. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni\\_2018gw.xml?\\_httplibcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_httplibcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (INEGI). (22-12-2021). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). Entidad Federativa: San Luis Potosí. Ráster. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) & Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1995). Edafologías. Escala 1:50000. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml?\\_httplibcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml?_httplibcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III para el cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate Change, bases físicas. Unidad de apoyo técnico del Grupo de trabajo I del IPCC. Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
- Jaimes-Arredondo. A., (2022). Evaluación de vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático en la Región Altiplano y Región Huasteca del estado de San Luis Potosí, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Jaiswal, R. K., Lohani, A. K. & Tiwari, H. L. (2015). Statistical Analysis for Change Detection and Trend Assessment in Climatological Parameters. *Environ. Process* (2), 729–749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3
- Kachok, R. & Ivanova, A. (2019). Índices de cambio climático en la Reserva de la Biosfera El Vizcaíno, Baja California Sur, México (1960-2012). *Revista Brasileira de Climatología* 24.
- Kalra, A., Sagarika, S., Pathak, P & Ahmad, S. (2017). Hydro-climatological changes in the Colorado River Basin over a century. *Hydrological Sciences Journal*, 62 (14), 2280-2296. DOI: 10.1080/02626667.2017.1372855
- Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin. London. p.120.
- Kundzewicz, Z. & Robson, A., (2004). Change detection in hydrological records: a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 49, 7-19.
- Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X. & Li, J. (2017). Recent changes in daily climate extremes in an arid mountain region, a case study in northwestern China's Qilian Mountains. *Scientific Reports* 7, 2245. DOI: 10.1038/s41598-017-02345-4
- Loaiza Cerón, W., Carvajal-Escobar, Y., Andreoli De Souza, R. V., Kayano, M. T. & González López, N. (2020). Spatio-temporal analysis of the droughts in Cali, Colombia and their primary relationships with the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) between 1971 and 2011. *Atmósfera* 33(1), 51-69. DOI: 10.20937/ATM.52639

- López de la Cruz, J., 2013. Análisis estadístico y modelación del régimen de las crecidas en ríos de la España peninsular en un contexto no estacionario. Tesis de doctorado. Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
- López de la Cruz, J. & Frances, F. (2014). La variabilidad climática de baja frecuencia en la modelación no estacionaria de los regímenes de las crecidas en las regiones hidrológicas Sinaloa y Presidio San Pedro. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5 (4), 79-101.
- Magallanes-Quintanar, R., F., Blanco-Macías, F., Galván-Tejada, E. C., Galván-Tejada, J. Márquez-Madrid, M. & Valdez-Cepeda, R. D. (2019). Negative regional Standardized Precipitation Index trends prevail in the Mexico's state of Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, 37, 487-499. DOI: 10.28940/terra.v37i4.563
- Mahmood, R., Jia, S., & Zhu, W. (2019). Analysis of climate variability, trends, and prediction in the most active parts of the Lake Chad basin, Africa. *Scientific Reports* 9,6317. DOI: 10.1038/s41598-019-42811-9
- Maldonado, T., Hidalgo, H.G & Alfaro E. J. (2020). Análisis de los conglomerados de precipitación y sus cambios estacionales sobre América Central para el periodo 1976-2015. *Revista de matemática: Teoría y aplicaciones* 28 (2), 337–362. DOI: 10.15517/rmta.v28i2.42322
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometría* 13 (3), 245-259.
- Martínez-Austria, P. F. & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3 (1), 5-20.
- Martínez-Austria, P. F. & Patiño-Gómez, C. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del Río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6, 135-149.
- Martínez-Austria, P. F. & Irula-Luztow, F. (2016). Tendencias de precipitación y cambio climático en la cuenca del Río Conchos, México. *Aqua-LAC*, 8 (2) 79 – 88.
- Martínez-Austria, P. F. & Jano-Pérez, J. A. (2021). Climate Change and Extreme Temperature Trends in the Baja California Peninsula, Mexico. *Air, Soil and Water Research*, 14, 1–11. DOI: 10.1177/11786221211010702
- Mendoza-Uribe, I. & Vázquez-Zavaleta, M. A. (2017). Detección de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el estado de Guerrero. *Ingeniería* 21 (1), 13-30.
- Montealegre, J., Pabón, J., 2000. La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña–Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb*, 2, 7-21.
- Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I. Pita-Díaz, O. & Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Adv. Sci. Res.*, 15, 231–237. DOI: 10.5194/asr-15-231-2018
- Moshir-Panahi, D., Kalantari, Z. Ghajarnia, N., Seifollahi-Aghmiuni, S. & Destouni, G. (2020). Variability and change in the hydroclimate and water resources of Iran over a recent 30-year period. *Scientific Reports*, 10,7450. DOI: 10.1038/s41598-020-64089-y
- NASA. (2018). GISS Surface Temperature Analysis. Global Annual Mean Surface Air Temperature Change. Global Land-Ocean Surface Temperature Anomaly (Base: 1951-1980).
- NOAA. (05-noviembre-2021). Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series. Recuperado de: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
- Olivares, B. O. & Zingaretti, M. L. (2019). Aplicación de métodos multivariados para la caracterización de periodos de sequía meteorológica en Venezuela. *Luna Azul*, 48, 172-192. DOI: 10.17151/luaz.2019.48.10
- Ouatiki, H., Boudhar, A. Ouhinou, A., Arioua, A., Hssaisoune, M., Bouamri, H., & Benabdelouahab, T. (2019). Trend analysis of rainfall and drought over the Oum Er-Rbia River Basin in Morocco during 1970–2010. *Arabian Journal of Geosciences* 12:128. DOI: 10.1007/s12517-019-4300-9
- Paredes, F. J., Barbosa H. A., & Guevara, E. (2015). Análisis espacial y temporal de las sequías en el nordeste de Brasil. *Agriscientia*, 32 (1), 1-14.

- Patiño-Gómez, C. y Reza-García N.I. (2012). Identificación y evaluación de medidas de adaptación en el sector hídrico. En: Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México: Adaptación al cambio climático, Vol. IV: 46-69. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- Pita-Díaz, O. & Ortega-Gaucin, D. (2020). Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico. *Climate* 8 (55). DOI:10.3390/cli8040055
- Praveen, B., Talukdar, S., Shahfahad, Mahato, S., Mondal, J., Sharma, P., Reza Md., A., Islam, T. & Rahman, A. (2020). Analyzing trend and forecasting of rainfall changes in India using nonparametrical and machine learning approaches. *Scientific Reports* 10, 10342. DOI: 10.1038/s41598-020-67228-7
- Rilo, M. & Lorenzo, M. N. (2020). Tendencias en índices de precipitación y temperatura extrema en Galicia para el periodo 1960-2017. *Avances en Ciencias de la Tierra* 10, 25-43.
- Ríos-Sánchez, D. C. (2018). Monitoreo del efecto del cambio climático en la Huasteca Potosina a partir de técnicas de percepción remota y estaciones climatológicas. Tesis de Maestría. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. San Luis Potosí, México.
- Rodríguez, J. G. & Giménez-Legal, E. (2017). Aplicación del análisis de componentes principales en la investigación de aguas de pozo para el consumo humano. *Población y Desarrollo*. 23 (45), 38 – 52. DOI: 10.18004/pdfce/2076-054x/2017.023(45)038-052
- Ruíz-Álvarez, O., Espejel-Trujano, D., Ontiveros-Capurata, R. E., Enciso, J. M., Galindo-Reyes, M. A., Quesada Parga, M. L., Grageda-Grageda, J., Ramos- Reyes, R. & Ruíz-Corral, J.A. (2016). Tendencia de temperaturas máximas y mínimas mensuales en Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2535-254
- Ruíz-Álvarez, V., Portela, M. M., Espinosa, L. Á., García Marín, R.,Belmonte Serrato, F., & Ruiz Álvarez, M. (2021). Regionalization of droughts from the SPI in the Segura hydrographic basin and Commonwealth of Taibilla Channels (Southeast of Spain). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88. DOI: 10.21138/bage.3045
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. & Amnell, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the mann-kendall test and sen's slope estimates -the excel template application Makesens. Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland.
- Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM). (2018). Programa Estatal de Acción Ante el Cambio Climático Del Estado de San Luis Potosí. Gobierno del Estado. San Luis Potosí. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2017). Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Conjunto de datos vectoriales. Recuperado de: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. México.
- Sedano-Cruz, R. K., (2017). Influencia de la variabilidad climática y factores antrópicos en los extremos hidrológicos en el Valle Alto del río Cauca, Colombia. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.
- Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.*, 63, 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (15-febrero-2021). Estaciones Climatológicas 2020. Recuperado de: <https://smn.conagua.gob.mx>
- Shabalala, Z. P., Moeletsi, M. E., Tongwane M. I. & Mazibuko S. M. (2019). Evaluation of Infilling Methods for Time Series of Daily Temperature Data: Case Study of Limpop Province, South Africa. *Climate* 7 (7). DOI: <https://doi.org/10.3390/cli7070086>
- SIMEC & CBONANP (15-03-2022). Ficha SIMEC: Sierra de Álvarez. México D. F. CONANP. Recuperado de: <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=157&reg=41>



- Suhaila, J. & Yusop, Z. (2018). Trend analysis and change point detection of annual and seasonal temperature series in Peninsular Malaysia. *Meteorol Atmos Phys* (130), 565–581. DOI: 10.1007/s00703-017-0537-6
- Tigkas D., Vangelis H., Tsakiris G., (2015). DrinC: a software for drought analysis based on drought indices, 1.7 (91). [Software]. Recuperado de: drought-software.com
- Uscinski, J. E., Douglas, K., & Lewandowsky, S. (2017). *Climate Change Conspiracy Theories* (1). DOI: 10.1093/acrefore/9780190228620.013.328
- Vázquez-Aguirre, J. (2010). Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Velásquez-I., F. Cabrera-C, C., Alcántara B. F. & Lucas-V. L. (2019). Pronóstico de precipitación sobre la cuenca aportante al embalse “La Esperanza” aplicando modelo climático HadCM3. *Rev. del Instituto de Investigación FIGMMG-UNMSM* 22 (43).
- Velázquez-Zapata, J. A., Troin, M., y Dávila-Ortiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 341–351. DOI: 10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.030
- Vilatte, C. A., Confalone, A. E., Aguas, L. M. (2017). Rainfall in Azul and its relationship with the phenomenon el Niño Southern Oscillation (ENSO). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 49 (2), 235-242.
- World Meteorological Organization, (WMO). (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. Chairperson, Publications Board. Geneva, Switzerland.
- Yang, N., Men, B. & Lin, C. (2011). Impact analysis of climate change on water resources. *Procedia Engineering* 24, 643 – 648. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2710
- Zhang, X. & Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0), User Manual*. Climate Research Branch Environment Canada. Downsview, Ontario Canada