



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

Evaluación de la 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.

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

Presenta:

ING. ARACELI JAIMES ARREDONDO

Asesor:

DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE

Co-Asesora:

DRA. MELVA GUADALUPE HERRERA GODINA

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 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.**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA

Presenta:

ING. ARACELI JAIMES ARREDONDO

Asesor:

DR. HERMANN ROCHA ESCALANTE

Co-Asesora:

DRA. MELVA GUADALUPE HERRERA GODINA

Comité tutorial:

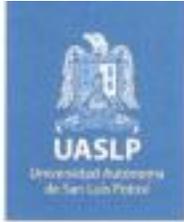
DR. JESÚS LÓPEZ DE LA CRUZ

DR. ANTONIO CARDONA BENAVIDES



San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2022



19 de mayo de 2022

**ING. ARACELI JAIMES ARREDONDO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hermann Rocha Escalante y Melva Guadalupe Herrera Godina**, *Asesor y Coasesora 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 vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático en la Región Altiplano y la Región Huasteca del estado de San Luis Potosí, México"

Introducción.

1. Caracterización hidrológica-ambiental de las regiones Altiplano y Huasteca del estado de San Luis Potosí.
2. Evaluación de la variabilidad climática e índice de precipitación estandarizada en las regiones de estudio.
3. Evaluación de los índices de cambio climático en las regiones de estudio.
4. Evaluación de la vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático en las regiones de estudio.
5. Análisis y discusión de los resultados.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 9
Zona Universitaria - CP 78200
San Luis Potosí, S.L.P.
tel (410) 526 2110 a 19
fax (410) 526 2100

Copia. Archivo.
*etn.

"Rumbo al centenario de la autonomía universitaria"

Este trabajo es dedicado con mucho amor a Leonardo Jaimes, toda tu familia y todos los que tuvieron la dicha de ver tu sonrisa hermosa te llevamos en el corazón, te amaremos siempre.

A mis sobrinos Camila, Ignacio, Eduardo, Fernanda, Natalia, Valentina y Sofia.

A mi bella abuelita Simona por su amor infinito.

A mi madre Margarita y a mi padre Jorge por su cariño, comprensión y estar siempre.

A Hector que amo mucho.

Agradecimientos

Gracias a Dios por darme una hermosa familia que me inspira a dar siempre lo mejor de mí y a hacer todo con amor, gracias a Dios por permitirme dar este gran paso en mi vida, desarrollarme profesionalmente como personalmente.

Gracias a Hector Alan Ontiveros Azuara por ser mi compañero de vida, por disfrutar, por todos nuestros sueños juntos, gracias por nuestro amor. Tu apoyo, motivación y amor son muy importantes para terminar este trabajo.

Gracias a mis padres que siempre tienen una sonrisa, abrazo y palabra de motivación. A mis hermanos Gabriel, Lourdes, Isaac, Mónica y Noé gracias infinitas por nuestros momentos juntos y por apoyarme siempre.

Gracias a mi Asesor de Tesis el Doctor Hermann Rocha Escalante por confiar en mí, por ser mi Director de tesis, por su enseñanza y su apoyo incondicional, desde el comienzo hasta la conclusión de esta investigación.

Gracias al Doctor Cristóbal Aldama por su paciencia y su gestión, siempre busco que la estancia en el posgrado fuera excelente en todos los ámbitos.

Gracias a la Doctora Melva Herrera Godina por su co-asesoría al realizar este trabajo, por confiar en mí, por todo su apoyo, paciencia y conocimiento. Con sus consejos y metodología hicieron enriquecer la presente investigación

Gracias al Doctor Jesús López de la Cruz por su asesoría, por su confianza, por sus consejos y múltiples metodologías brindadas con mucha paciencia que permitieron el excelente desarrollo de esta investigación.

Gracias al Doctor Antonio Cardona Benavides por confiar en mí, por todo su apoyo, atenciones e información brindada a lo largo de esta investigación.

Gracias a mis compañeros de Maestría que aportaron también su conocimiento, entusiasmo, apoyo y comentarios en este trabajo, en especial muchísimas gracias a Guadalupe Torres Aldana.

Gracias a Daniela Paola Vázquez Pinada y toda su familia, mi gran amiga del alma que me inspira a dar siempre lo mejor de mí. Gracias por tu cariño y amor incondicional.

Gracias a la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua del estado de San Luis Potosí, así como a su Director; el Ing. Joel Felix Díaz por brindar los registros históricos de las estaciones meteorológicas utilizadas en la presente investigación.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento de este trabajo, con numero de beca 107902. A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

RESUMEN

El cambio climático global ha provocado de forma gradual, la intensificación de la variabilidad climática natural, con un aumento en la frecuencia y severidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (como las sequías y las inundaciones) que dañan los bienes y la integridad de los ecosistemas, en una cadena compleja de impactos que afectan prácticamente a todas las dimensiones del desarrollo humano (Landa *et al.*, 2008). Este estudio brinda una comparación entre la vulnerabilidad hídrica-ambiental, las tendencias de índices de cambio climático, de tendencias de variabilidad climática y de las tendencias de sequía hidrológica; de dos regiones muy diferentes en el estado de San Luis Potosí, México, una ubicada en la zona árida del norte (Región Altiplano) y la otra en la zona húmeda del sur (Región Huasteca). En primer lugar, se obtuvieron datos de 51 estaciones meteorológicas por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para las variables de temperatura promedio, temperatura máxima extrema, temperatura mínima extrema y precipitación, se aplicó control de calidad riguroso, homogeneización y estimación de los datos faltantes antes de calcular las pruebas de Sen's slope, Pettit en XLSAT, SPI en DRINC, los 27 índices de cambio climático del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) en Rclimindex y sus respectivas tendencias utilizando la prueba de Mann-Kendal para el período combinado de 1975-2018. Para después formular la vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad y cambio climático, empleando índices de: peligro por sequía, de disponibilidad de agua en acuíferos y uso de suelo y vegetación; y variabilidad climática para ambas regiones. Los resultados indican variabilidad climática en las dos regiones de estudio, con mayor tendencia al cambio de manera local. Las temperaturas promedio y máxima extrema, están incrementando en las 4 estaciones del año y a nivel anual, mientras que la temperatura mínima extrema presentó cambios en las épocas de verano e invierno. Los resultados del análisis de la prueba de Pettit además de exhibir variabilidad climática indican que las mayores rupturas ocurren en los años de la década de los noventa. El análisis de SPI documento que se están incrementando los periodos de sequía para la Región Altiplano. Los índices climáticos que mayor presentan tendencia al cambio en la Región Altiplano son: TXx, TX90P y TNn que indican incrementos en la temperatura máxima extrema, en la frecuencia de días calurosos y en la temperatura mínima extrema, y para la Región Huasteca: SU25, TXn y TNn que indican incrementos en los días de verano, en la temperatura máxima más baja y en la temperatura mínima extrema. En cuestión al análisis de vulnerabilidad hídrica-ambiental las dos regiones presentan media-alta vulnerabilidad ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático.

CONTENIDO

Índice de Figuras.....	9
INTRODUCCIÓN.....	11
Situación actual del cambio climático.....	15
Efectos del cambio climático	15
México ante el cambio climático.....	16
Mitigación y adaptación ante el cambio climático.....	18
Cambio climático en el estado de San Luis Potosí.....	18
Justificación.....	19
Hipótesis.....	19
Objetivo General	19
Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA-AMBIENTAL DE LAS REGIONES ALTIPLANO Y HUASTECA DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.....	21
1.1 REGIÓN ALTIPLANO	21
1.1.3 Hidrografía en la Región Altiplano.....	25
1.1.4 Geología de la Región Altiplano.....	27
1.1.5 Edafología de la Región Altiplano.....	29
1.1.6 Fauna y vegetación de la Región Altiplano.....	31
1.1.7 Áreas Naturales Protegidas en la Región Altiplano.....	31
1.2 REGIÓN HUASTECA.....	33
1.2.1 Fisiografía de la Región Huasteca.....	34
1.2.2 Clima en la Región Huasteca	35
1.2.3 Hidrografía en la Región Huasteca	37
1.2.4 Geología de la Región Huasteca.	39
1.2.5 Edafología de la Región Huasteca.....	40
1.2.6 Fauna y vegetación de la Región Huasteca.....	42
1.2.7 Áreas Naturales Protegidas en la Región Huasteca.....	43
CAPITULO 2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA E ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA EN LAS REGIONES DE ESTUDIO	45
2.1 Variabilidad climática	45
2.1.1 Obtención de registros históricos	45
2.1.2. Estimación de datos faltantes	47
2.1.3 Calculo de valores regionales por el método de isolíneas.....	49
2.1.4 Prueba estadísticas.....	50

2.1.4.1 Prueba de Mann Kendall	50
2.1.4.2 Magnitud de cambio	51
2.1.4.3 Prueba de Pettit.....	64
2.2 Resultados de variabilidad climática por la época anual de la Región Altiplano y la Región Huasteca.....	73
2.2.1 Resultados de variabilidad climática para primavera de la Región Altiplano y la Región Huasteca.....	73
Resultados para temperatura promedio en primavera	73
2.2.2 Resultados de variabilidad climática para verano de la Región Altiplano y la Región Huasteca	75
2.2.2 Resultados de variabilidad climática para otoño de la Región Altiplano y la Región Huasteca	76
2.2.2 Resultados de variabilidad climática para invierno de la Región Altiplano y la Región Huasteca.....	78
2.3 Sequía	99
2.3.1 Sequía hidrológica.....	100
2.3.2 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)	101
CAPITULO 3: EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES DE ESTUDIO	117
3.1 Aspectos generales del cambio climático.....	117
3.2 Índices de cambio climático (ICC).....	117
3.2.1 Disponibilidad y homogenización de datos diarios.....	118
3.2.2 Calculo de índices de Cambio Climático en RClmDex	120
3.2.3 Tendencias de índices de Cambio Climático	122
3.2.4 Análisis integral de variabilidad climática y cambio climático	143
CAPITULO 4: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA-AMBIENTAL ANTE LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES DE ESTUDIO	146
4.1 Concepto de vulnerabilidad y componentes.....	146
4.2.1 Indicador de grado de riesgo por sequía.....	148
4.2.2 Indicador de condición de acuíferos.....	151
4.2.3 Indicador de uso de suelo y vegetación.....	154
4.2.4 Indicador de variabilidad climática	158
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	161
CONCLUSIONES.....	173
Recomendaciones	175

REFERENCIAS 176

Índice de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 21

Figura 2. Subprovincias Fisiográficas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 22

Figura 3. Climas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de CONABIO, 2020). 25

Figura 4. Hidrología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 27

Figura 5. Geología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2007). 29

Figura 6. Edafología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 31

Figura 7. Áreas Naturales Protegidas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 32

Figura 8. Localización geográfica de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 33

Figura 9. Subprovincias fisiográficas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 34

Figura 10. Climas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 37

Figura 11. Hidrología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 39

Figura 12. Geología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2021). 40

Figura 13. Edafología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 42

Figura 14. Áreas Naturales Protegidas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 44

Figura 15. Ubicación de estaciones meteorológicas (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 48

Figura 16. Métodos para estimar datos faltantes (Elaboración propia). 49

Figura 17. Hoja de cálculo para estimar el estadístico de Mann-Kendall, y el valor de la magnitud de cambio. 52

Figura 18. Hoja de cálculo que presenta los resultados del estadístico de Mann-Kendall y de la magnitud de cambio. 52

Figura 19. Prueba de Pettit para precipitación de la estación 24007 (Elaboración propia con información de Addinsoft, 2022)..... 66

Figura 20. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 82

Figura 21. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 83

Figura 22. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 84

Figura 23. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 85

Figura 24. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio del mes de agosto de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 86

Figura 25. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima del mes de agosto de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 87

Figura 26. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima del mes de febrero de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 88

Figura 27. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación del mes de diciembre de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 89

Figura 28. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 91

Figura 29. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 92

Figura 30. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).....	93
Figura 31. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).....	94
Figura 32. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio del mes de febrero de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).	95
Figura 33. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima del mes de agosto de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).....	96
Figura 34. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima del mes de febrero de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).	97
Figura 35. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación del mes de diciembre de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).....	98
Figura 36. Secuencia de sucesos de los diferentes tipos de sequías y de sus efectos (Tomado de Ortega y Velazco, 2013).....	100
Figura 37. Cálculo de SPI en DrinC.....	103
Figura 38. Comportamiento de SPI de 12 meses anual, de la RA (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).....	107
Figura 39. Comportamiento de SPI de 12 meses anual, de la RH (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).....	107
Figura 40. Tendencias en el SPI 12M, anual de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	111
Figura 41. Tendencias en el SPI 12M, época húmeda de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	112
Figura 42. Tendencias en el SPI 12M, época seca de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	113
Figura 43. Tendencias en el SPI 12M, anual de la Región Huasteca (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	114
Figura 44. Tendencias en el SPI 12M, época húmeda de la Región Huasteca (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	115
Figura 45. Tendencias en el SPI 12M, época seca de la Región Huasteca. (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).....	116
Figura 46. Archivos de entrada .csv (arriba) y . est (debajo.) para comenzar con la homogeneización en Climatol 3.2.1. (Elaboración propia).....	119
Figura 47. Código de programación para estimar datos faltantes diarios, en Climatol 3.2.1.	120
Figura 48. Archivo de entrada para ingresar los datos diarios a RClindex, (Elaboración Propia).	121
Figura 49. Datos complementarios para calcular ICC, en RClindex.....	121
Figura 50. Tendencias en el Índice simple de intensidad diaria de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).....	132
Figura 51. Tendencias en la temperatura máxima extrema de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).....	133
Figura 52. Tendencias en la frecuencia de días calurosos de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).....	134
Figura 53. Tendencias en la temperatura mínima extremas de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).....	135
Figura 54. Tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022).....	139
Figura 55. Tendencias en los días de verano (SU25) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).....	140
Figura 56. Tendencias de la temperatura máxima más baja (TXn) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).....	141
Figura 57. Tendencias de la temperatura mínima extrema (TNn) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).....	142
Figura 58. Mapa integral de temperatura promedio anual, TX90P y TX10P en la RA.	144
Figura 59. Mapa integral de temperatura promedio anual, TX90P y TX10P en la RH.	145
Figura 60. Grado de riesgo por sequía en la RH (Elaboración propia con información de CENAPRED, 2020).	151

Figura 61. Porcentaje de área con vulnerabilidad por uso de suelo y vegetación para cada región 155
 Figura 62. Uso de suelo y vegetación en la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2021). 157
 Figura 63. Uso de suelo y vegetación en la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2021). 158

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Impacto del cambio climático en México (Tomado de PECC 2014-2018). 17
 Cuadro 2. Tipos de clima en la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). ... 24
 Cuadro 3. Tipos de Climas en la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). . 36
 Cuadro 4. Características de las 51 estaciones analizadas, (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 46
 Cuadro 5. Valor medio regional, calculado por el método de isolíneas 1975-2019. (Elaboración propia). 50
 Cuadro 6. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura promedio de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 53
 Cuadro 7. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura máxima de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 54
 Cuadro 8. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura mínima de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 55
 Cuadro 9. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 56
 Cuadro 10. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura promedio de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 57
 Cuadro 11. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura máxima de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 58
 Cuadro 12. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura mínima de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 60
 Cuadro 13. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 62
 Cuadro 14. Estadísticos descriptivos de precipitación de la RA (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020)..... 65
 Cuadro 15. Interpretación de la Prueba Pettit, (Elaboración propia con información de Addinsoft, 2022). ... 65
 Cuadro 16. Resultados de la prueba Pettit, para precipitación (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 67
 Cuadro 17. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Promedio (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 68
 Cuadro 18. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Máxima (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 70
 Cuadro 19. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Mínima (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 71
 Cuadro 20. épocas anuales para describir los resultados de variabilidad climática (Elaboración propia)..... 73
 Cuadro 21. Valores de SPI y su designación conforme a CONAGUA 2021. 103
 Cuadro 22. SPI 12 meses, para datos anuales, época seca y húmeda de las regiones de estudio (Elaboración propia con información de INEGI, 2020)..... 104
 Cuadro 23. Resultados de tendencias de SPI para la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 109
 Cuadro 24. Resultados de tendencia de SPI para la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020). 110
 Cuadro 25. Resumen de los 27 índices del ETCCDI. (Pita-Díaz, 2018). 118
 Cuadro 26. Índices de cambio climático definidos por el ETCCDI (Vázquez, 2010; Figueroa, 2017)..... 126
 Cuadro 27. Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022)..... 127
 Cuadro 28. Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de precipitación (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022)..... 129

Cuadro 29. Clasificación de las sequías (Escalante et al., 2005).....	149
Cuadro 30. Clasificación de vulnerabilidad por riesgo de sequía (Elaboración propia).....	149
Cuadro 31. Disponibilidad de agua en acuíferos de la RA y RH. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2020).....	152
Cuadro 32. Descripción de rubros utilizados en el balance de disponibilidad de agua (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).....	152
Cuadro 33. Clasificación de vulnerabilidad por condición de acuíferos (Elaboración propia).....	152
Cuadro 34. Clasificación de vulnerabilidad de acuerdo con el uso de suelo y vegetación (Elaboración propia, con información de INEGI, 2021).....	156

INTRODUCCIÓN

El clima de la Tierra no ha sido siempre el mismo; hay que recordar las glaciaciones del Cenozoico superior y las épocas interglaciares por las que ha atravesado el planeta, que en algunos periodos llevaron a los mares a un nivel tres metros superiores al presente y a temperaturas mayores de 2 a 3 °C de la media actual. Estos cambios climáticos pueden atribuirse a causas naturales y los más recientes a causas antropogénicas (Allyón, 2003).

Se define como variabilidad climática a las variaciones del rango medio de las condiciones climáticas y otras estadísticas del clima en un espacio geográfico a lo largo del tiempo, que se extiende de la escala de un fenómeno meteorológico y se atribuye a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2007). Por otra parte, el cambio climático representa la variación en el clima atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima, presentado en periodos comparables. La principal causa del cambio climático es el efecto invernadero, provocado por algunos gases propios de nuestra atmósfera, por lo que, es un fenómeno que ocurre de manera natural e indispensable para mantener una temperatura superior al punto de congelación. Sin embargo, las cantidades de dichos gases han superado con mucho las que debieran existir en forma natural (INECC, 2018).

Más del 75 por ciento del número total de los desastres naturales que afectan a los seres humanos están relacionados con el agua y el clima, principalmente tormentas severas, inundaciones o sequías. En cuanto al número de personas damnificadas por desastres naturales, el 78 por ciento lo son a causa de inundaciones o sequías, es decir, debido a extremos hidrometeorológicos. No es de extrañar, por lo tanto, que el reporte de riesgos globales del Foro Económico Mundial identifique al clima extremo como el desastre natural más probable y lo ubique en cuarto lugar en cuanto a la magnitud de los daños que genera (Alcalá-Hernández *et al.*, 2020).

Los expertos en la materia han señalado que, para evidenciar la existencia de un cambio climático, es necesario analizar las tendencias de variables climáticas, considerando diferentes escalas de tiempo y espacio. Las tendencias son cambios graduales de incremento o decremento en el tiempo de las variables estudiadas, asociadas comúnmente a factores climáticos. En este sentido, desde finales del siglo XIX hasta hoy día, se han realizado estudios para detectar cambio climático en diversas partes del mundo, por citar algunos ejemplos, las tendencias de precipitación han sido analizadas por Bradley *et al.*, (1987) en el hemisferio norte; Hurrell (1995) en el Atlántico Norte; Brunetti *et al.*, (2000) en Italia; Haylock y Nicholls (2000) en Australia, Kruger (2006) en Sudáfrica y recientemente en México; Méndez *et al.* (2007), Algara (2009) y Juárez-Hernández (2015). Invariablemente de la ubicación geográfica, los resultados evidencian la presencia de cambios significativos en las tendencias de precipitación y temperatura, afirmando así la vulnerabilidad de ciertas regiones.

El clima y el ciclo hidrológico están estrechamente vinculados, lo que complica definir las fronteras entre ambos (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2014). 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 (Iglesias, *et al.*, 2005).

Actualmente, la disminución de disponibilidad de agua o calidad suficientes resulta uno de los problemas más difíciles de afrontar para el desarrollo de México. Diversos estudios en México, a partir de la generación de escenarios climáticos, coinciden en señalar que se presentarán variaciones de temperatura y precipitación con distinta intensidad y frecuencia, que a su vez incrementarían la vulnerabilidad social de: las comunidades con una menor capacidad de adaptación ante eventos extremos, la disponibilidad del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas, así como la producción de alimentos. Por ello, es fundamental generar la información base para identificar las zonas más vulnerables en ciertos sectores a nivel nacional (IMTA, 2015).

El estado de San Luis Potosí, por sus condiciones geográficas únicas, resulta un escenario complejo, de importancia nacional, que permite entender los procesos presentes en todo el territorio, asociados al cambio climático. Una particularidad interesante del territorio potosino es su extraordinaria diversidad física, climática, ecológica y cultural, la cual se manifiesta en una gran variedad de ecosistemas, sistemas de producción agrícola y pecuaria, biodiversidad y tecnologías. Esta gran diversidad es resultado natural de la variabilidad geográfica y climática del estado, y es considerada una de las más importantes del mundo; resulta claro que constituye una fortaleza que reduce la vulnerabilidad de San Luis Potosí, y de México, ante los graves efectos de la crisis socioambiental (PEACC-SLP, 2018).

A diferencia de otros desastres asociados a fenómenos naturales cuyos impactos son locales y de corto plazo (como los ocasionados por tornados, huracanes o terremotos), las sequías abarcan grandes áreas geográficas, tienen un inicio lento en la naturaleza, no tienen epicentro ni trayectorias definidas, sus daños acumulativos son no estructurales, y sus consecuencias pueden prevalecer por varios años, con un efecto negativo en la calidad de vida y en el desarrollo de las poblaciones afectadas. La severidad de una sequía depende no solamente del grado de reducción de la lluvia, de su duración o de su extensión geográfica, sino también de las demandas del recurso hídrico para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas (Wilhite, 2000).

La vulnerabilidad, definida ampliamente como el potencial de pérdida, es un concepto esencial en la investigación de peligros y es fundamental para el desarrollo de estrategias de mitigación de peligros a nivel local, nacional e internacional (Gómez, 2001). Existen muchas definiciones de vulnerabilidad. Algunas son de carácter general y pueden aplicarse en diferentes contextos mientras que otras solo se aplican en ámbitos muy específicos.

En el presente trabajo se analizaron registros históricos de hasta 44 años, de diferentes variables meteorológicas; como lo son precipitación, temperatura máxima, promedio y mínima con el fin de identificar sequía, variabilidad y cambio climático y, de esta forma poder evaluar la vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos del cambio climático en dos regiones contrastantes del estado de San Luis Potosí, como lo son la Región Altiplano y la Región Huasteca. Además, se desarrolló una fórmula de vulnerabilidad hídrica-ambiental

tomando en cuenta 4 índices: de uso de suelo y vegetación, disponibilidad de agua subterránea en acuíferos, grado de peligro por sequía y variabilidad climática.

Situación actual del cambio climático.

El cambio climático representa un problema de cambio mundial a múltiples escalas ya que se caracteriza por actores infinitamente diversos, múltiples factores de estrés y múltiples escalas de tiempo. Los grupos que ya están marginados soportan una carga desproporcionada de los efectos climáticos, tanto en los países desarrollados como los que están en desarrollo. La ciencia del cambio climático se basa en conocimientos de múltiples disciplinas y se basa en múltiples epistemologías. Los gases y compuestos de efecto invernadero, han generado anomalías climáticas que se traducen en: aumento de la temperatura de los océanos y la superficie terrestre; en el nivel del mar, así como su acidificación; disminución de los glaciares; variaciones en los patrones de precipitación y humedad; e incremento en la intensidad de huracanes. También se han presentado olas de calor, sequías intensas y prolongadas, y mayor propensión a incendios forestales. Este fenómeno también se manifiesta en la alteración del ciclo hidrológico y la distribución geográfica de flora y fauna, pérdida de biodiversidad y cambio en la composición de los ecosistemas (SEMARNAT, 2021).

Efectos del cambio climático

Los efectos conocidos del cambio climático se manifiestan a través de huracanes, sequías, temperaturas extremas y lluvias torrenciales, así como inundaciones e incendios que hasta hoy han ocasionado pérdidas humanas, así como costos económicos y sociales. Estos eventos ponen en riesgo la vida de la población; comprometen la conservación de los ecosistemas, su biodiversidad y los servicios que éstos proveen; también limitan las oportunidades de desarrollo en el corto y mediano plazo. El impacto de desastres naturales intensifica otros problemas ambientales y sociales, como el cambio del uso de suelo, la forma y estructura de los asentamientos urbanos, los procesos productivos o el estado de los ecosistemas y climas hostiles e impredecibles (INECC, 2019).

Estudios recientes revelan que en México ya se pueden presentar los siguientes efectos del cambio climático (INECC, 2019):

1. México se ha vuelto más cálido desde la década de los años sesenta del siglo pasado.
2. Las temperaturas promedio a nivel nacional aumentaron en 0.85°C y las temperaturas invernales en 1.3°C.
3. Se ha reducido la cantidad de días más frescos desde los años sesenta del siglo pasado y hay más noches cálidas.
4. La precipitación pluvial ha disminuido en la región sureste desde hace medio siglo.

Dadas las condiciones de vulnerabilidad a los efectos del cambio climático del país, y en el supuesto de que pueden intensificarse dichos impactos, se vuelve prioritario conocer, ubicar y visualizar de manera diferencial las condiciones de vulnerabilidad al cambio climático en

las que se encuentran, la población, el sistema natural, la infraestructura y las actividades económicas (IMTA, 2015).

México ante el cambio climático

Las características geográficas de México y las condiciones sociales y económicas desfavorables que viven algunos sectores de su población lo hacen un país altamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático (INECC, 2019).

En México se elaboró la Ley General de Cambio Climático (LGCC) y se crearon el Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC), la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENACC) y el Programa Especial del Cambio Climático (PECC), con miras en apoyar la mitigación y adaptación del cambio climático, y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y baja de emisiones, a través de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), mediante el consejo de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), la cual está compuesta por catorce secretarías de Estado y cuenta con el apoyo de los estados y municipios, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), del Congreso de la Unión y de los sectores público, social y privado (INECC, 2019).

En el plano internacional, México, como actor global, está obligado a cumplir los compromisos internacionales; en específico los acuerdos hechos en la conferencia de París los cuales consisten en mantener el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C, reduciendo para 2050, 50% de emisiones respecto a las que se tenía en el 2000, aumentar su capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático e incrementar la resiliencia al clima, de forma que no se comprometa la producción de alimentos y se optimice la parte financiera destinada a este problema (COP21, 2015; Miklos, 2018).

El Cuadro 1. presenta por sistemas y sectores un resumen de resultados de investigaciones sobre el impacto del cambio climático en México. La clasificación de los impactos se realiza a través de colores: amarillo indica un impacto bajo, naranja indica un impacto medio y, finalmente, el color rojo indica un impacto alto (PECC 2014).

Cuadro 1. Impacto del cambio climático en México (Tomado de PECC 2014-2018).

Sistemas y sectores	Escenario Aumento en temperatura entre +2.5 °C a 4.5 °C, y disminución en la precipitación entre -5 y 10% Impactos proyectados
Agricultura	Disminución de la productividad del maíz para la década de 2050, lo que se aúna al problema actual del 25% de las unidades de producción con pérdida en la fertilidad de suelos. Existe cierta evidencia de que la mayoría de los cultivos resultarán menos adecuados para la producción en México hacia 2030, empeorando esta situación para finales del presente siglo.
Costero	El aumento del nivel del mar constituye un peligro para los sectores residencial y de infraestructura asentados en zonas costeras. Por otro lado, los sectores hídrico y agrícola podrían verse afectados por efecto de la intrusión salina. Por otro lado, habrá regiones donde la precipitación podría ser más intensa y frecuente, incrementando el riesgo de inundaciones para alrededor de dos millones de personas que actualmente se encuentran en situación de moderada a alta vulnerabilidad ante las inundaciones, y quienes residen en localidades menores a 5 mil habitantes, ubicadas principalmente en la parte baja de las cuencas, sumado al riesgo de deslizamientos de laderas por lluvia.
Hídrico	La mayor parte del país se volverá más seca y las sequías más frecuentes, con el consecuente aumento de demanda de agua particularmente en el norte del país y en zonas urbanas.
Ecosistemas y biodiversidad	En ecosistemas terrestres un ejemplo es la posible reducción del área cubierta de bosques de coníferas, especies de zonas áridas, semiáridas y especies forestales de zonas templadas. En el caso de los océanos, un aumento en la temperatura puede ocasionar un colapso demográfico en las poblaciones marinas, ocasionando baja productividad para las pesquerías. Para el caso de mamíferos terrestres y voladores se proyecta al 2050 una reducción de cerca de la mitad de las especies estudiadas, perdiendo más del 80% de su rango de distribución histórica.
Tormentas y clima severo	Hay consenso sobre la intensidad de los ciclones en el noroeste del Pacífico y en el Atlántico norte. Sin embargo, las incertidumbres en cuanto a los cambios y la intensidad complican estimar sus impactos para el país; se prevé que, a mayor número e intensidad de tormentas, los impactos podrían tener mayores consecuencias sociales y económicas importantes.

Mitigación y adaptación ante el cambio climático

Según la LGCC 2012, se define como **Adaptación** a las Medidas y ajustes en sistemas humanos o naturales, como respuesta a estímulos climáticos, proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos. Y **Mitigación** como la aplicación de políticas y acciones destinadas a reducir las emisiones de las fuentes, o mejorar los sumideros de gases y compuestos de efecto invernadero.

Se ha determinado que la mitigación y la adaptación son complementarias y no constituyen alternativas mutuamente excluyentes ya que sus características, escalas temporales y los agentes implicados son en gran medida distintos (IMTA,2017).

Se reconoce que la adaptación es un proceso de aprendizaje que requiere ser interdisciplinario y multidimensional, tomando como eje fundamental las dinámicas territoriales, el conocimiento local y el papel de los individuos, las organizaciones de la sociedad civil y el gobierno; además, requiere el seguimiento y la revisión constante de las políticas, planes y acciones (IMTA,2015).

Cambio climático en el estado de San Luis Potosí

En el estado de San Luis Potosí, los cambios en la temperatura máxima y en la precipitación presentan diferentes tendencias de variación. Las regiones más afectadas son la Planicie Costera y la Sierra Madre Oriental (Regiones Media y Huasteca). En la región Huasteca es donde la vulnerabilidad climática se presenta con mayor intensidad (PED, 2021). Además, la Región Altiplano de San Luis Potosí presenta tendencias al cambio (variabilidad climática) en las variables meteorológicas de temperatura promedio y precipitación total mensual (Jaimes, 2020).

Se presenta una disminución en la temperatura mínima en la Planicie Costera, Sierra Madre Oriental y Serranías Meridionales en diciembre (Regiones Centro, Media y Huasteca)., lo cual representa una amenaza para los cultivos de otoño-invierno, debido al aumento el riesgo de heladas negras. La disminución de la precipitación en la Planicie Costera y en Sierra Madre Oriental, en mayo y junio afecta los cultivos de temporal y riego, dado que estos meses son los más calientes del año, en la peor de las combinaciones posible, en las dos regiones, aumenta la demanda de agua y, al mismo tiempo, disminuye su disponibilidad. Se presenta un retraso en el arranque del periodo de lluvias, que se ha corrido a fines de junio, principios de julio, es notable un incremento en la precipitación en la Planicie Costera y Sierra Madre Oriental en el mes de octubre (PEACC, 2018).

Justificación

México es un país con alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático. Millones de mexicanos están en riesgo de sufrir los efectos de las inundaciones y por otro lado la desertificación podría afectar hasta el 40% de la superficie nacional cultivable (IMTA,2017).

Existe incertidumbre y preocupación al ver que en el Estado de San Luis Potosí cada vez más se presentan eventos naturales extremos a tribuidos al cambio climático. Esto crea una apremiante necesidad de generar información acerca del comportamiento de los eventos de variabilidad climática y cambio climático en las diferentes regiones del estado y la vulnerabilidad de estos a dichos potenciales impactos. La vulnerabilidad, descrita como el grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático (IPCC, 2007; Nations, 2012).

El crecimiento poblacional en el País, en las últimas décadas, ha ocasionado que disminuya cada vez más la disponibilidad de agua para la población, además en el estado se ha detectado una nula planeación del desarrollo hidrográfico, teniendo como consecuencia deficiencia en la infraestructura hídrica estatal; esto conduce a una serie de problemas como la falta de acceso al agua potable, la falta de tratamiento de aguas residuales, la falta de saneamiento y la baja calidad de agua. Manteniendo al Estado en un déficit hídrico que impide mejorar la calidad de vida de la población (PED, 2021). Por ello se plantea identificar el grado de vulnerabilidad de los sistemas hídricos-ambientales de la Región Altiplano y Región Huasteca de S.L.P. ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático. Este trabajo plantea una evaluación de registros históricos de variables climáticas, con el fin de determinar la presencia de variabilidad climática y cambio climático, así como la formulación de vulnerabilidad hídrica-ambiental ante dichos efectos. Y de esta forma generar información que permita a los tomadores de decisiones aplicar medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático en zonas prioritarias.

Hipótesis

La vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático se puede definir mediante los criterios de variabilidad climática, grado de peligro por sequía, condición de acuíferos y uso de suelo y vegetación.

Objetivo General

Evaluar la vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático de la Región Altiplano y la Región Huasteca en el estado de San Luis Potosí, mediante análisis estadísticos de variables meteorológicas y aplicación de índices.

Objetivos Específicos

- I. Generar una base de datos georreferenciada con la información meteorológica de las variables analizadas, que pueda servir como herramienta para diversos análisis futuros.
- II. Analizar las condiciones del tiempo atmosférico históricas de las regiones de estudio, mediante análisis de series de tiempo de las variables meteorológicas: precipitación total, temperatura promedio, temperatura máxima y mínima, con discretizaciones de tiempo diaria, mensual y anual.
- III. Determinar variabilidad climática mediante el análisis de tendencias y rupturas mediante el uso de las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y Pettit.
- IV. Examinar el índice de precipitación estandarizado (SPI), mediante la determinación de tendencias.
- V. Detectar el posible cambio climático a través de los índices de cambio climático del ETCCDI mediante un análisis de tendencias
- VI. Determinar zonas con presencia de vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático mediante la propuesta de un índice formulado con base en indicadores de variabilidad en los registros de temperatura promedio anual y precipitación total anual, grado de riesgo por sequía, disponibilidad de agua en acuíferos y uso de suelo y vegetación.

CAPÍTULO 1: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA-AMBIENTAL DE LAS REGIONES ALTIPLANO Y HUASTECA DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ.

Las áreas de estudio de este trabajo son dos zonas contrastantes en clima además de otras características socioambientales, del estado de San Luis Potosí, al norte la Región Altiplano (RA) con un clima seco y al sur la Región Huasteca (RH) con un clima húmedo, en este capítulo se presenta una caracterización hidrológica-ambiental de estas.

1.1 REGIÓN ALTIPLANO

La RA se ubica en la parte noroccidental del estado, entre los 22° 16' y 23° 8' de latitud norte y entre los 100° 5' y 101° 10' de longitud oeste. Esta región de estudio abarca 14 de los 58 municipios de la entidad (Catorce, Cedral, Charcas, Guadalcázar, Matehuala, Moctezuma, Salinas, Santo Domingo, Venado, Villa de Arista, Villa de Guadalupe, Villa Hidalgo, Villa de la Paz y Villa de Ramos) y comprende un área aproximada de 20,153.75 km², que equivalen a 33.31% de la superficie del Estado (Blanco *et al.*, 2015; SEDECO, 2013). Esta área fue delimitada ya que comprende la ubicación geográfica de las estaciones analizadas que cumplieron con la calidad de los datos (tener en común 43 años de registros). En la Figura 1. se presenta la ubicación geográfica de la RA.

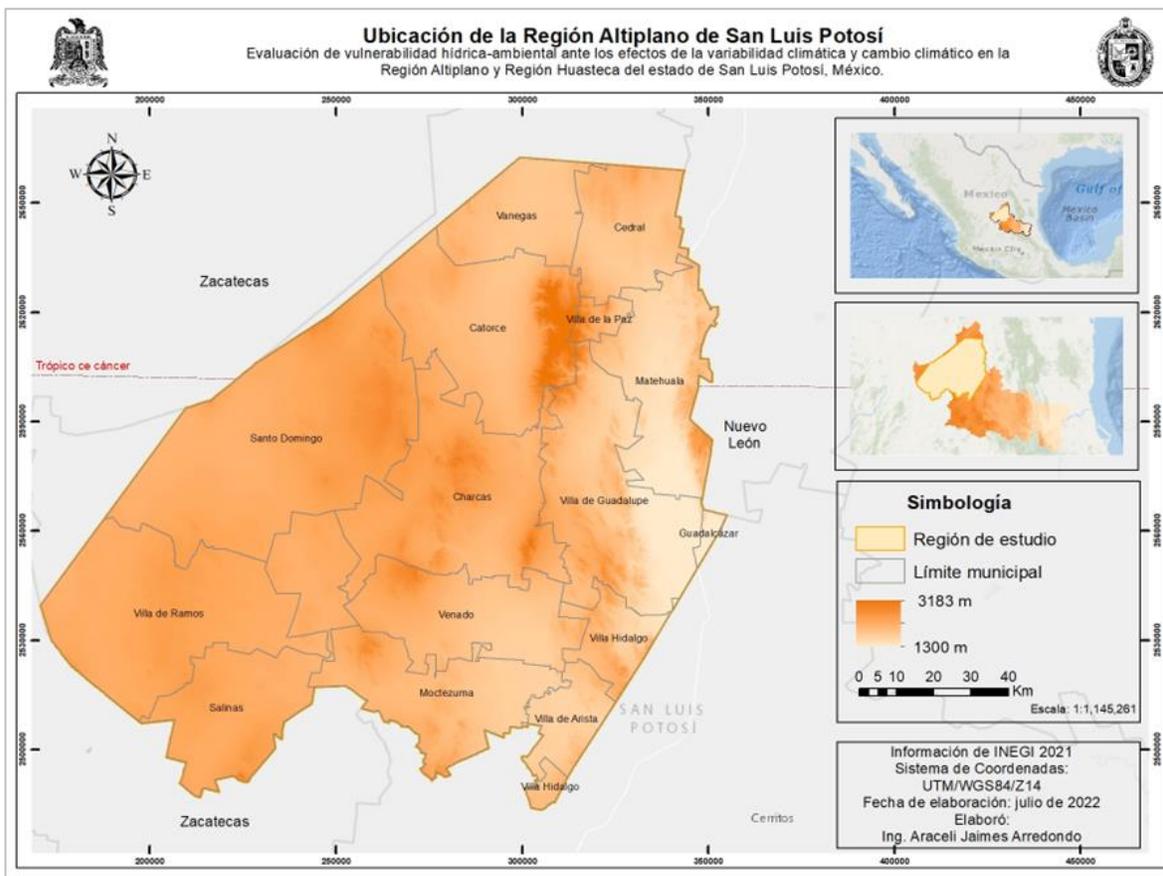


Figura 1. Localización geográfica de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.1.1 Fisiografía de la Región Altiplano

En la RA se encuentra el grupo orográfico más importante del estado después de la Sierra Madre Oriental: al norte, las sierras de Charcas, de Catorce, de Guadalcázar, del Coro o Ypoa y San Pedro Naola; en el sur, las sierras del Peñon Blanco, Ahualulco y San Miguelito. En la parte occidental están las sierras del Sabino y de la Ballena, esta última en los límites con Zacatecas. (Monroy y Calvillo, 2011). Las subprovincias fisiográficas presentes en la RA son: La Llanura de Ojuelos-Aguascalientes, Llanuras y sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras Transversales, Sierras y Llanuras Occidentales y Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande (INEGI, 2007). En la Figura 2. se presentan las subprovincias fisiográficas a las que pertenece la RA.

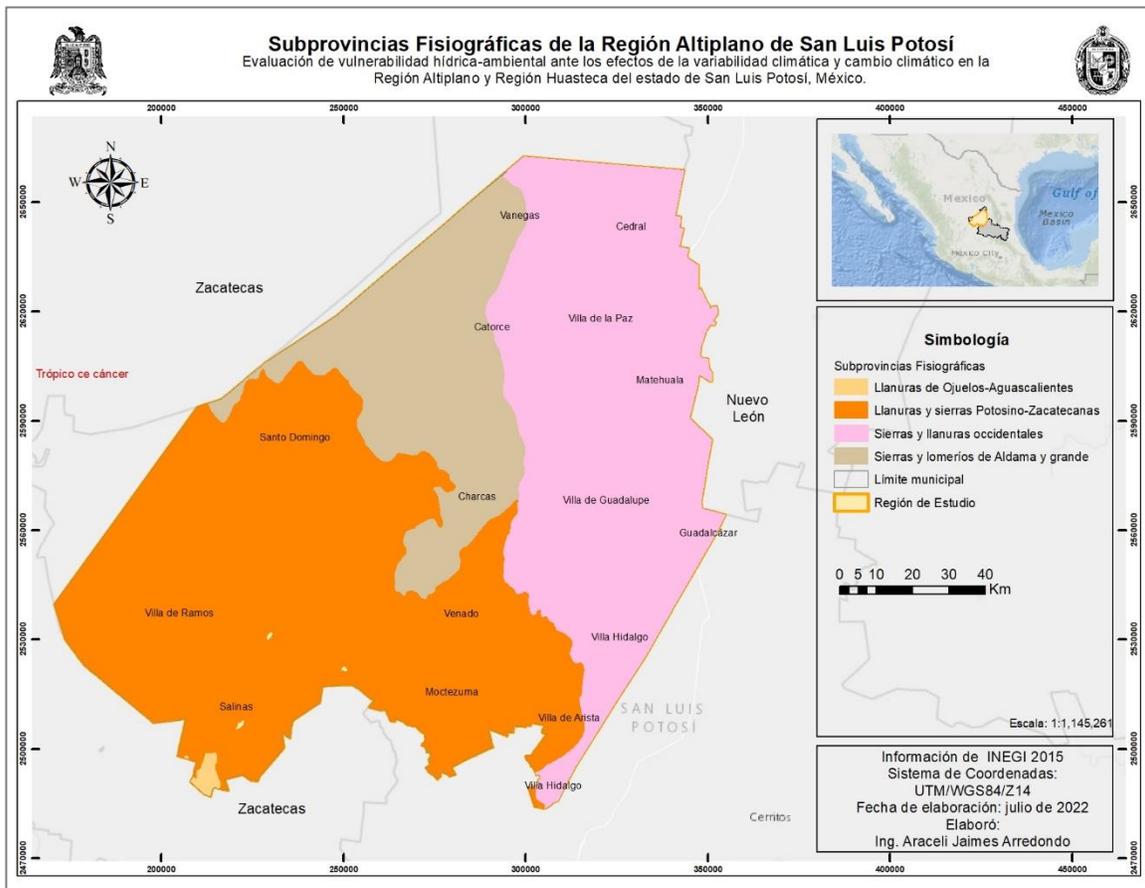


Figura 2. Subprovincias Fisiográficas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.1.2 Clima de la Región Altiplano

De acuerdo con la clasificación de Enriqueta García-CONABIO de 1998 el clima de la RA es B seco, con una precipitación anual inferior a los 400 mm. El clima seco junto con los

climas semisecos y muy secos tienen como característica común que la evaporación excede a la precipitación. Su sequedad depende principalmente de la escasa precipitación y de la temperatura, así como también de la poca persistencia de la lluvia y lo torrencial de la misma, de la naturaleza del suelo y de la cubierta vegetal (INEGI, 2007). En la Figura 3. se presentan los climas presentes en la RA.

En el Cuadro 2. se describen los tipos de clima en la RA de San Luis Potosí según García E. & CONABIO (1998).

Heladas y granizadas

En el altiplano potosino el clima es más seco y frío por lo que el fenómeno de heladas ocurre de 10 a 20 días y en las partes más altas la frecuencia es de 20 a 40 días. Con respecto a las granizadas se presenta que este fenómeno no guarda un patrón de comportamiento, sin embargo, se presenta por lo general en la estación caliente del año; ya que es el resultado de movimientos ascendentes de aire. En la mayor parte del estado las granizadas ocurren sólo un día al año, aunque hay pequeñas zonas concentradas en la Mesa Central en donde se presentan con rangos que van 1 a 2, de 2 a 3 y 3 a 4 días al año (INEGI, 2007).

Cuadro 2. Tipos de clima en la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Tipos de clima en la Región Altiplano		
Tipo	Descripción	Municipios donde se presenta este tipo de clima
BS1kw- Semiárido templado		En los municipios Villa de Ramos, Salinas, Santo Domingo, Charcas, Villa de Guadalupe, Venado, Moctezuma y Guadalcázar.
BWhw Muy árido, semicálido		Guadalcázar y Villa de Guadalupe
BSohw Árido, semicálido	Este tipo de clima presenta temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual	Vanegas y Cedral.
BSokw Árido, templado		Villa de Ramos, Salinas, Venado, Moctezuma, Villa de Arista y Villa Hidalgo.
BS1hw Semiárido, semicálido		En parte de los municipios de Guadalcázar, Villa Hidalgo y Villa de Arista
BWkw Muy árido, templado		Tipo de clima presente en el municipio de Catorce
BS1k(x') Semiárido, templado	Este tipo de clima presenta temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente menor de 22°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual	Solo presente en una parte del municipio de Guadalcázar.
BS1h(x') Semiárido, semiárido	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias repartidas todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.	Cedral, Vanegas, Matehuala, Catorce y Villa de la Paz.

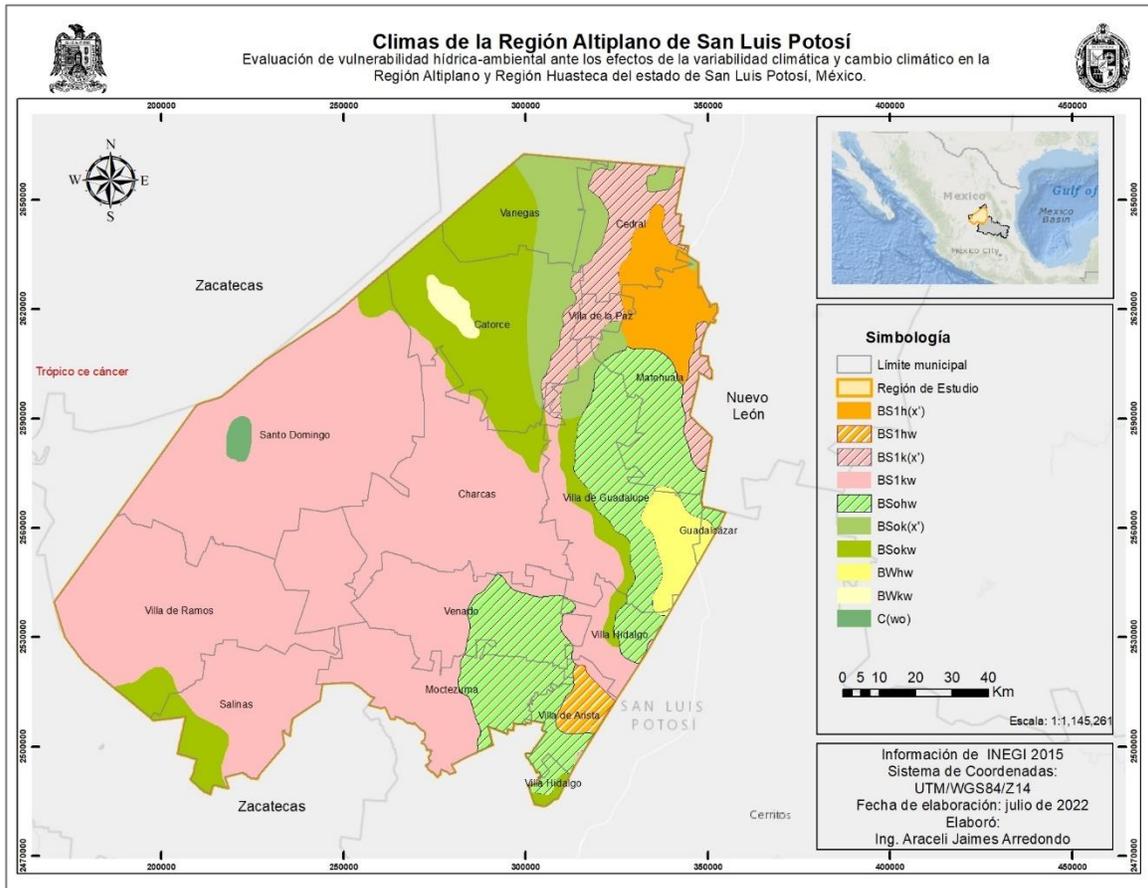


Figura 3. Climas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de CONABIO, 2020).

1.1.3 Hidrografía en la Región Altiplano

Región Hidrológica El Salado

La RA carece de ríos, la hidrografía está formada por un conjunto de cuencas endorreicas, por corrientes de temporal, mantos subterráneos y algunos manantiales. Esta región corresponde a una de las vertientes interiores más importantes del país. Se localiza en el altiplano septentrional y la mayor parte de su territorio está situado a la altura del Trópico de Cáncer. Está constituida por una serie de cuencas cerradas, de diferentes dimensiones. Aunado a las condiciones climatológicas de la región, hace que no haya grandes corrientes superficiales por lo que la descripción del aspecto hidrográfico resulta un tanto complicada (INEGI, 2007).

Los recursos hídricos del subsuelo son la principal fuente de abastecimiento en el estado de San Luis Potosí, a pesar de su relativa potencialidad, debido a que las corrientes superficiales son limitadas y transitorias generalmente. En la zona norte del estado hay amplios valles rellenos por sedimentos terciarios y recientes, encontrándose estructuras aisladas de calizas

productoras. Las aguas de los aluviones son de buena calidad, tanto para riego como para uso doméstico. Los rellenos aluviales son someros y tienen buena posibilidad de producción acuífera. Existen otros sedimentos terciarios conglomeráticos y arenosos, y su agua es abundante y de buena calidad (INEGI, 2007). En la Figura 4. se presentan las cuencas, ríos, red hidrográfica y región hidrológica a la que pertenece la RA.

La RA está formada de seis cuencas (INEGI,2007):

1. Matehuala. Esta cuenca tiene el 14.9% de la superficie de la entidad, los escurrimientos que hay en ella provienen de las sierras consideradas menores, de la región El Salado, como son las de Catorce y San Bartolo.
2. Sierra de Rodríguez. La cuenca abarca el 0.7% de la superficie del estado, forma parte de la región El Salado, las lluvias ocasionales originan algunas corrientes en esta zona, las cuales se conocen como arroyo Patos y las Vacas.
3. Camacho-Gruñidora. Es la de menor extensión en San Luis Potosí; ocupa el 0.2% del área estatal y en ella no hay corrientes de importancia, por lo mismo no presenta posibilidades de aprovechamiento.
4. Fresnillo-Yesca. Recibe este nombre porque en ella se encuentran estos parajes, que pertenecen a Zacatecas y San Luis Potosí. En esta última entidad abarca el 4.2% de la superficie estatal, gran parte de las aguas de esta cuenca se utilizan en territorio potosino.
5. San Pablo y Otras. Comprende el 13.3% del área estatal, tiene un buen número de corrientes y las más importantes son: río de La Presa, arroyo La Parada y río Calabacillas.
6. Sierra Madre. Ocupa el 6.9% de la superficie total estatal y no tiene cauces permanentes, ni definidos debido a las escasas precipitaciones en la zona.

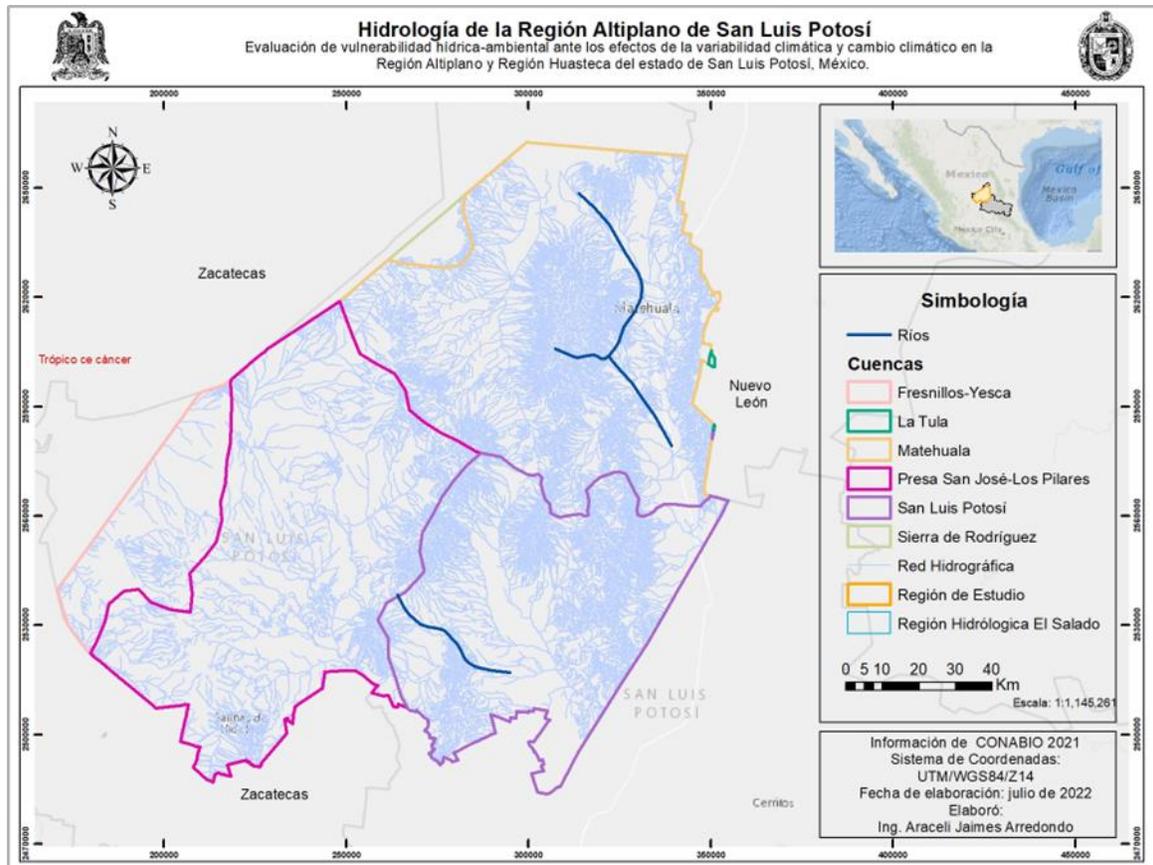


Figura 4. Hidrología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.1.4 Geología de la Región Altiplano

Las características litológicas y estructurales de las unidades aflorantes en el estado de San Luis Potosí indican que hubo diferentes eventos geológicos de tipo orogénico asociados con actividad ígnea, los cuales, actuaron en varias épocas para dar origen a un relieve estructural que ha sido modificado en forma subsecuente por procesos de alteración (INEGI, 2002).

La zona Norte de la RA (municipios de Real de Catorce, Villa de la Paz y Matehuala) está caracterizada por la presencia de depósitos marinos, principalmente por rocas sedimentarias que se depositaron y evolucionaron sobre un basamento Paleozoico. El Terciario, está pobremente representado por pequeños afloramientos de riolita, derrames fisúales de composición basáltica y andesítico-basáltica. Finalmente, en los valles de la región, se formaron sedimentos lacustres recientes (SGM, 2005a; SGM, 2009a; SGM, 2005b, SGM, 2004).

La zona Oeste (municipios de Santo Domingo, Villa de Ramos y Salinas), está caracterizada por depósitos de sedimentos marinos del Triásico, Jurásico y Cretácico. Las unidades litoestratigráficas de este grupo están cubiertas de manera discordante por rocas volcánicas

del Terciario y rocas sedimentarias clásticas de origen lacustre del Pliocuatnario (SGM, 2009b-c; SGM, 2005c).

La zona central y sur (municipios de Charcas, Villa de Guadalupe, Venado, Moctezuma, Villa de Arista y Villa Hidalgo) se caracterizan por sierras constituidas de rocas sedimentarias y mesetas volcánicas, separadas por amplias llanuras y valles aluviales. Las rocas más antiguas corresponden a sedimentos marinos y continentales del Triásico Superior; sobreyaciendo a estas rocas discordantemente se tiene al Jurásico Superior, constituido por conglomerados y calizas que, a su vez, son sobreyacidos por calizas y lutitas del Cretácico (SGM, 2005d-h; SGM, 2006).

En la zona Este (municipio de Guadalcázar) las rocas más antiguas corresponden al Triásico Superior constituidas por una secuencia detrítica con arenisca y lutita plegada y alterada a filita y esquisto. El Jurásico Superior está representado por una secuencia carbonatada, en alternancia de limonita-caliza y basalto-filita. El Cretácico se representa por una alternancia de caliza-lutita y anhidrita-dolomía con alternancia de arenisca-lutita. Estas rocas se encuentran cubiertas discordantemente por rocas volcánicas y vulcanoclásticas, además de estar afectadas por estructuras dómicas de composición riolítica y latítica del Terciario. Al Cuaternario le corresponden rocas sedimentarias continentales y derrames basálticos. Como producto del intemperismo y la erosión de rocas preexistentes, se han formado depósitos de aluvión en las partes bajas de los valles (SGM, 2006).

Desde el siglo XVII, el estado de San Luis Potosí ha destacado por su tradición minera, ocupando lugares importantes dentro de la producción minera nacional, con una participación significativa en la extracción y beneficio de minerales metálicos y no metálicos. La actividad minera se apoya fundamentalmente en la extracción de fluorita, cobre, zinc, plata, oro, plomo, estaño, arsénico, cadmio, yeso, azufre, fosforita, caolín, mercurio, antimonio y sal común. Destacan por su producción minera los municipios de Zaragoza, Villa de la Paz, Charcas, Cerro de San Pedro y Catorce (INEGI,2007). En la Figura 5. se presenta la geología de la RA.

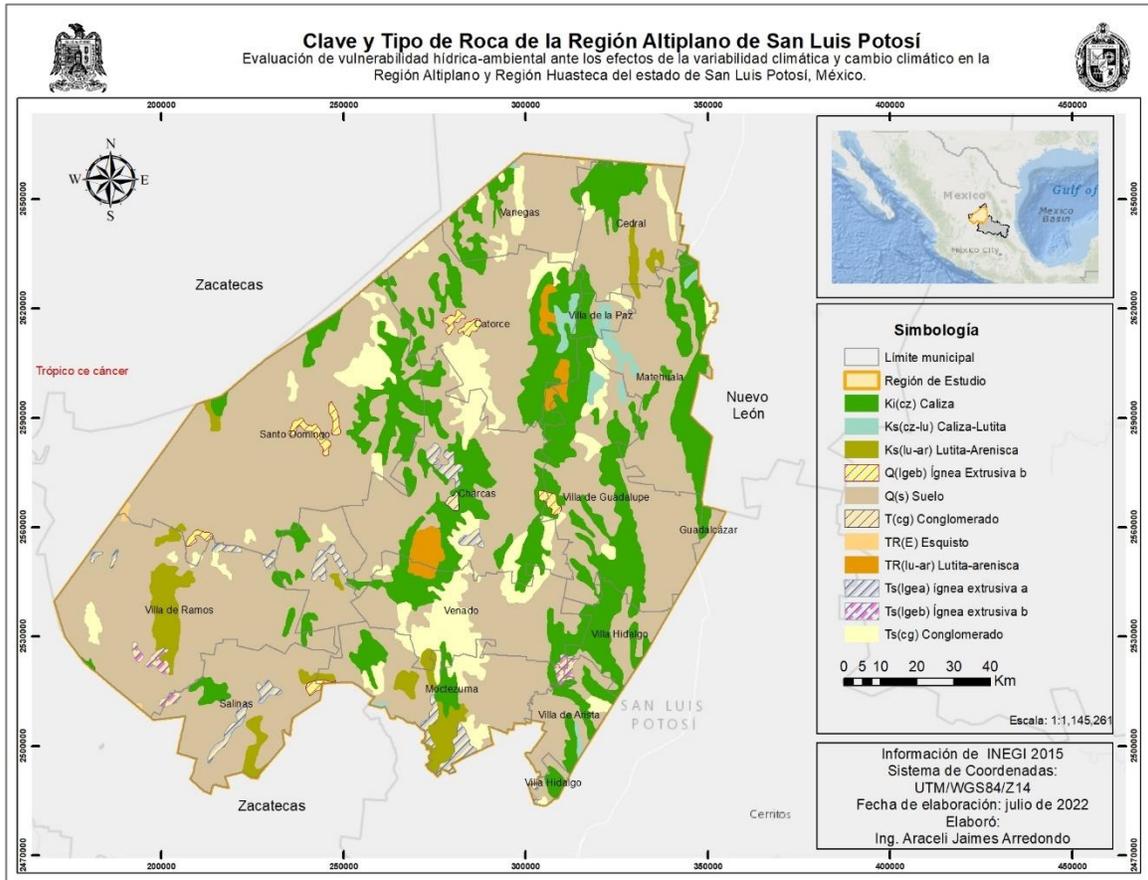


Figura 5. Geología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2007).

1.1.5 Edafología de la Región Altiplano

La distribución de los suelos tiene íntima relación con la presencia de la roca madre, así como con el clima, debido a la topografía predominante montañosa, en parte a la escasez de lluvias y algunas otras causas. La mayor parte del territorio del estado está cubierta por suelos delgados, muchas veces discontinuos y en algunos lugares excesivamente erosionados (INEGI, 2007).

A continuación, se presentan los diferentes tipos de suelo de la RA, delimitados por subprovincias (INEGI, 2007):

Subprovincia Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes. El terreno de esta región está cubierto por suelo típico de zonas áridas, denominado Xerosol háplico; es de colores claros debido al poco contenido de materia orgánica. Se encuentra en llanuras de origen aluvial y coluvial, es profundo y está limitado por tepetate, en los municipios de Aqualulco, Mexquitic de Carmona, Villa de Arriaga y en menor porcentaje Salinas de Hidalgo.

Subprovincia Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas. Esta región abarca completamente los municipios de Moctezuma y Villa de Ramos; además, parte de los de

Ahualulco, Charcas, Mexquitic de Carmona, Salinas de Hidalgo, Santo Domingo, San Luis Potosí, Venado y Villa de Arista. Los suelos que ocupan la mayor extensión en esta subprovincia son los Xerosoles; son de color claro, textura media y contenido de materia orgánica bajo. Abarcan el 84.6% del total de suelos en esta zona, Algunos presentan acumulaciones de calcio (Xerosol cálcico) y otros no tienen distinción (Xerosol háplico).

Además, se encuentran suelos donde la capa más superficial es oscura, con carbonato de calcio presentando concreciones duras, macizas o suaves y polvorientas. A estos suelos se les conoce como Castañozems; son de origen aluvial Cuaternario y soportan vegetación natural de matorral desértico micrófilo y pastizal. Se encuentran asociados con Litosol y Fluvisoles, lo mismo que con Xerosoles.

Subprovincia Sierras y Lomeríos de Aldama y Río Grande. esta subprovincia comprende parte de los municipios de Vanegas, Catorce, Santo Domingo, Charcas y Venado. Los suelos que predominan en esta zona son Xerosoles háplico y cálcico, también se encuentra Xerosol gypico, que tiene cristales de yeso en alguna parte del subsuelo. Estos suelos constituyen el 66.3% de los existentes en la zona y fundamentalmente se localizan en las bajadas, se encuentran limitados por caliche, aunque también pueden estar limitados por gravas. Son fértiles, pero la carencia de una red de drenaje organizada y el bajo porcentaje de precipitación media anual, aunado a la poca profundidad del suelo y a la presencia de sales, dificultan la instauración de la agricultura. Las sierras están constituidas por calizas, las cuales originan suelo poco profundo y de color oscuro denominados Rendzinas, que están asociadas con Litosoles (menores de 10 cm de profundidad).

Cabe destacar que en esta subprovincia se encuentra la mayor extensión de suelos salinos (Solonchak), del total de la entidad, donde solamente se desarrolla vegetación halófila. En la Figura 6. se presentan los tipos de suelo de la RA.

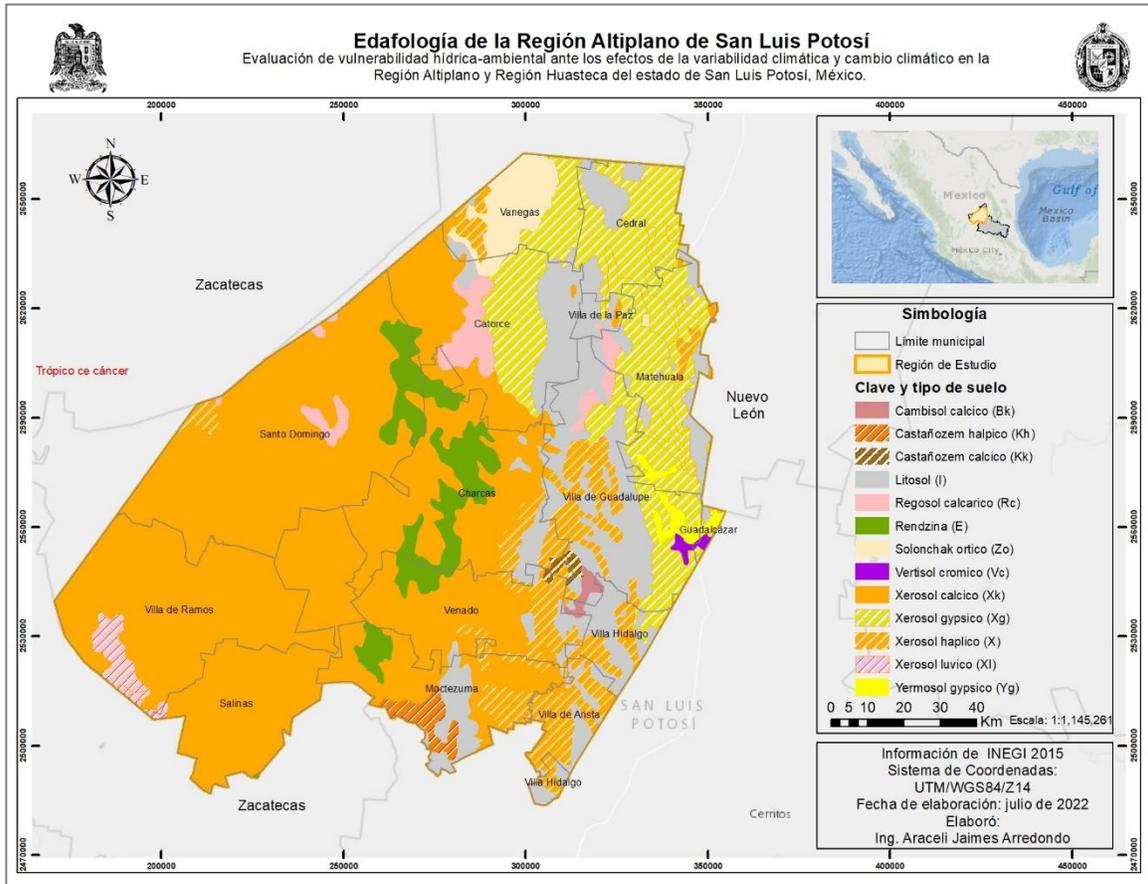


Figura 6. Edafología de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.1.6 Fauna y vegetación de la Región Altiplano

La fauna se compone de reptiles, mamíferos roedores, tlacuaches, zorrillos, lagartijas, culebras, víboras de cascabel, cenizotes, cuervos, halcones, zopilotes y águilas. La vegetación del lugar es de tipo xerofítico, predominan los matorrales desérticos como el cactus-mezquite, zacatal y encinar arbustivo. Por su ubicación geográfica, fusiona paisajes desérticos con boscosos y combina la vegetación xerófila con bosque tropical caducifolio, de coníferas y de latifoliadas, lo que le proporciona una gran diversidad de relieves con atractivos naturales (INAFED, 2002).

1.1.7 Áreas Naturales Protegidas en la Región Altiplano

La RA cuenta con dos áreas naturales protegidas (ANP): 1. Área Natural Protegida «Reserva Estatal del Paisaje Cultural Huiricuta, lugares sagrados y ruta histórico cultural del Pueblo Huichol», en los municipios de Catorce, Villa de la Paz, Matehuala, Charcas, Villa de Guadalupe y Villa de Ramos de San Luis Potosí; 2. La Reserva Estatal con características

de Reserva de la Biósfera de Real de Guadalcázar, en el municipio del mismo nombre (Blanco P. *et al*, 2015). En la Figura 7. se presentan las dos ANP presentes en la región de estudio.

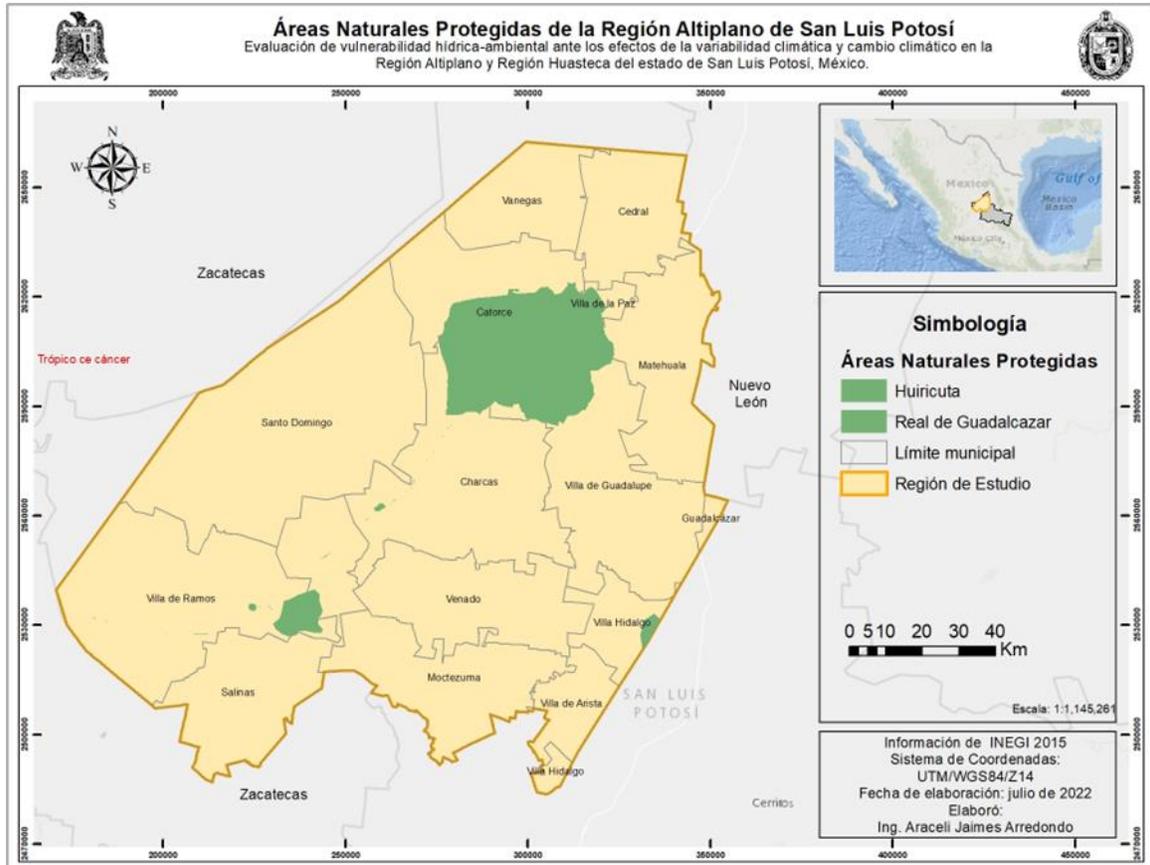


Figura 7. Áreas Naturales Protegidas de la Región Altiplano (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2 REGIÓN HUASTECA

Situada en el extremo oriental del estado de San Luis Potosí, la RH constituye, desde el punto de vista socioeconómico, la segunda región más importante de esta entidad federativa. De hecho, por su posición geográfica excepcional, en el límite convergente de la región neotropical y neártica, cuenta con una diversidad paisajística y de recursos naturales aptos para el aprovechamiento con fines de ocio y recreación (Castañeda, 2010). Se ubica a $17^{\circ}47'$ latitud norte y $92^{\circ}56'$ longitud oeste, esta región de estudio abarca 19 de los 58 municipios de la entidad (Aquismón, Tancanhuitz, Coxcatlán, Ébano, Huehuetlán, San Antonio, Tampamolón Corona, Ciudad Valles, San Martín Chalchicuátla, San Vicente Tancuayalab, Tamasopo, Tamazunchale, Tamuín, Tanlajás, Tanquián de Escobedo, Axtla de Terrazas, Xilitla y Matlapa), y comprende un área aproximada de 10 014.24 km². que equivalen a 16.55% de la superficie del Estado (SEDECO, 2013). Esta área fue delimitada ya que comprende la ubicación geográfica; de las estaciones analizadas que cumplieron con la calidad de los datos (tener en común 44 años de registros), la cual se presenta en la Figura 8.

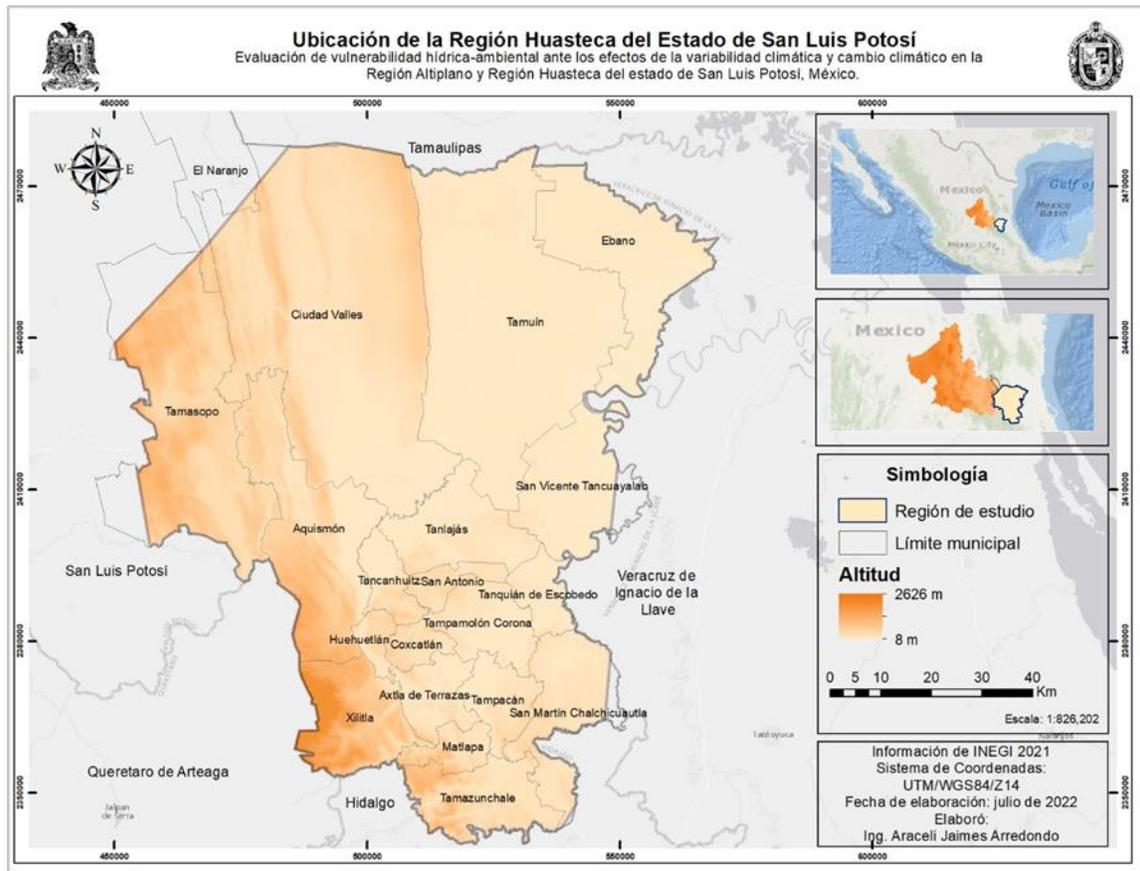


Figura 8. Localización geográfica de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2.1 Fisiografía de la Región Huasteca

En lo que se refiere al aspecto fisiográfico, la RH está enmarcada por tres subprovincias: Llanuras y Lomeríos, Carso Huasteco y Gran Sierra Plegada (Castañeda, 2010). La primera se caracteriza por un relieve plano que consiste en un sistema de topoformas de lomeríos, llanuras y valles, con ligera inclinación hacia la costa del Golfo de México; sus máximas elevaciones son de 150 metros y las mínimas de 15 metros; los materiales más comunes son sedimentos antiguos, arcillosos o arenosos y afloramientos de rocas basálticas. La segunda se constituye principalmente por sierras y en menor proporción por cañones, valles y llanuras que, al contar con un predominio de rocas calcáreas, solubles en agua, han generado grutas, pozos y dolinas. La tercera se asocia con una morfología de estratos plegados en forma de mesetas, valles intermontanos y lomeríos, donde las cumbres llegan a exceder los 1,000 msnm; además tiene un sistema de fallas con orientación norte-sur y dominancia de rocas calizas marinas con rasgos de carsificación (INEGI, 2002). En la Figura 9. se presentan las subprovincias fisiográficas a las que pertenece la RH.

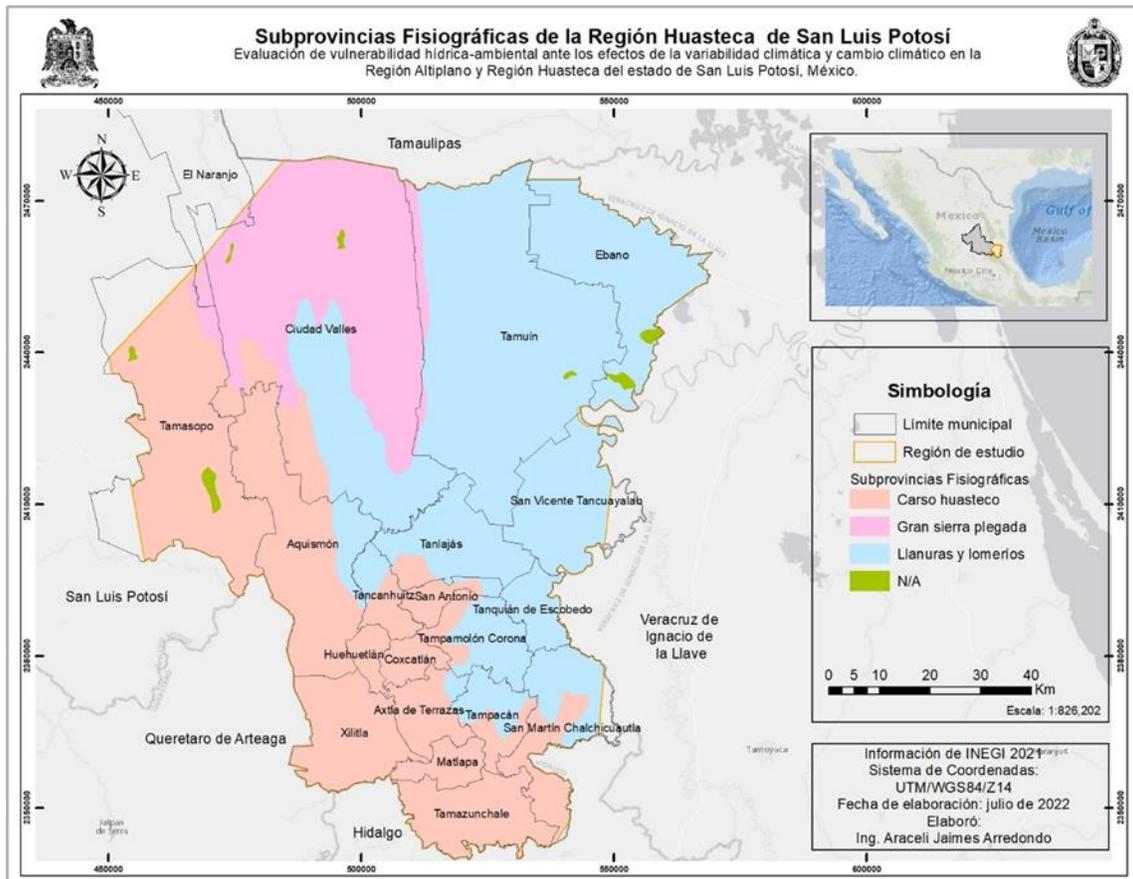


Figura 9. Subprovincias fisiográficas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2.2 Clima en la Región Huasteca

La RH cuenta con una variedad de patrones climáticos que se originan por la topografía y las principales condiciones del clima, como la latitud, la orografía, la distribución de tierras y agua, la distancia hacia el Golfo y las corrientes marinas, junto con las trayectorias de masas de aire (Barradas *et al.*, 2010). De manera general la RH presenta Clima A (Húmedo), con precipitaciones entre los 800 a 1500 mm/año. En la Figura 10. se representan los tipos de clima presentes en la RH.

Según García E. & CONABIO (1998), los tipos de clima en la RH de San Luis Potosí se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Tipos de Climas en la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Tipos de clima en la Región Huasteca		
Tipo	Descripción	Municipios donde se presenta este tipo de clima
(A)C(fm). Semicálido húmedo del grupo C.	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual	Xilitla y Tamazunchale
(A)C(m) Semicálido húmedo del grupo C	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Tamasopo, Ciudad Valles, Aquismón, San Antonio, Tanlaajás, Tanchahuitz, Coxcatlán, Tampamolón Corona y Xilitla
(A)C(w2) Semicálido subhúmedo del grupo C	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. precipitación del mes más seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Xilitla y Tamasopo.
A(f) Cálido húmedo	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.	Tamazunchale, Matlapa, Xilitla, Axtla de Terrazas, Coxcatlán, Huehuetlán y Aquismón.
Am Cálido húmedo	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Xilitla y Tamazunchale
Am(f) Cálido húmedo,	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.	Tanchahuitz, Huehuetlán, Coxcatlán, Axtla de Terrazas, Matlapa, Tampacán, Tamazunchale y San Martín Chalchicuautla,
Aw2. Cálido subhúmedo	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Ciudad Valles, Tamasopo, Tanlaajás, San Antonio, Tampamolón Corona, Tampacán y San Martín Chalchicuautla
Aw1 Cálido subhúmedo	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Ciudad Valles, Tamuín, San Vicente Tancuayalab, Tanlaajás, San Antonio, Tampamolón Corona, Tampacán, Tanquián de Escobedo y San Martín Chalchicuautla
Awo cálido subhúmedo	Temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.	Tamuín y Ebano

Heladas y granizadas

En las porciones más orientales con climas semicálidos, subhúmedos y húmedos que es parte la RH de San Luis Potosí, ocurren heladas de 0 a 5 días al año, en tanto que en las zonas más húmedas de la sierra casi no se presentan.

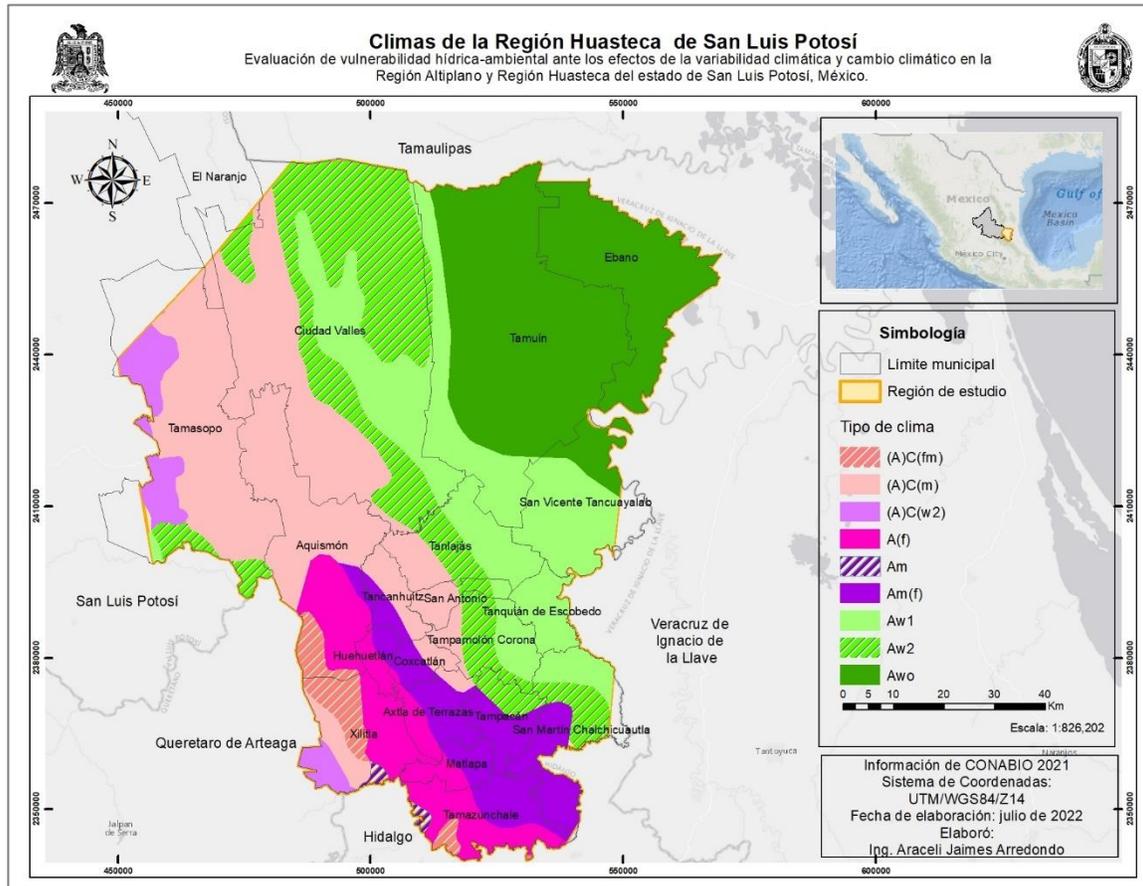


Figura 10. Climas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2.3 Hidrografía en la Región Huasteca

Debido a la topografía que desciende en forma escalonada hacia el Golfo de México, la hidrología de la RH se distribuye a través de una red fluvial que es parte de la región Panuco que se divide en Alto y Bajo Panuco. Se origina desde la Sierra Madre Oriental hasta la planicie costera, en donde debido al aumento de precipitación existe afluente desde los ríos más importantes como el Santa María, el Moctezuma y el Támesis (Estrada, 2013).

Región Hidrológica Pánuco

La región hidrológica Pánuco está dividida en dos porciones: Alto y Bajo Pánuco, a la entidad le corresponde parte de la segunda, la cual tiene importancia dentro del territorio

potosino, porque en ella se originan un buen número de escurrimientos afluentes que en cierto modo son de gran importancia para el río Pánuco. Además, existen cuatro cuencas de esta región hidrológica (INEGI, 2007):

1. Cuenca Río Pánuco. Esta cuenca abarca el 1.4% de la superficie estatal, en ella se localizan zonas de cultivo irrigadas por los ríos Tropaón y Moctezuma.
2. Cuenca Río Tamesí. Ocupa el 0.9% de superficie dentro de San Luis Potosí. Su principal corriente es la del Tamesí y es el principal afluente por el lado izquierdo del río Pánuco.
3. Cuenca Río Tamuín. Esta cuenca es la de mayor extensión en el estado, pues representa el 35.0% y su aportación es la más importante. Corre por una topografía suave y su cauce es en dirección sur, hasta llegar al río Tropaón.
4. Cuenca Río Moctezuma. Abarca el 5.4% del área total estatal y su corriente más importante es la del Moctezuma, se considera que su parte final corre sobre territorio potosino, donde se le unen dos ríos de cierta relevancia: Amajac y Tempoal.

Del total de almacenamientos en el estado en esta región los tres más importantes están ubicados en la cuenca río Tamuín, y son: presa Las Lajillas, con una capacidad de 40 millones de m³; presa Las Golondrinas, con 30 millones de m³; y presa Valentín Gama, cuya capacidad es de 10 millones de m³, en la Figura 11. se presentan la hidrología de la RH.

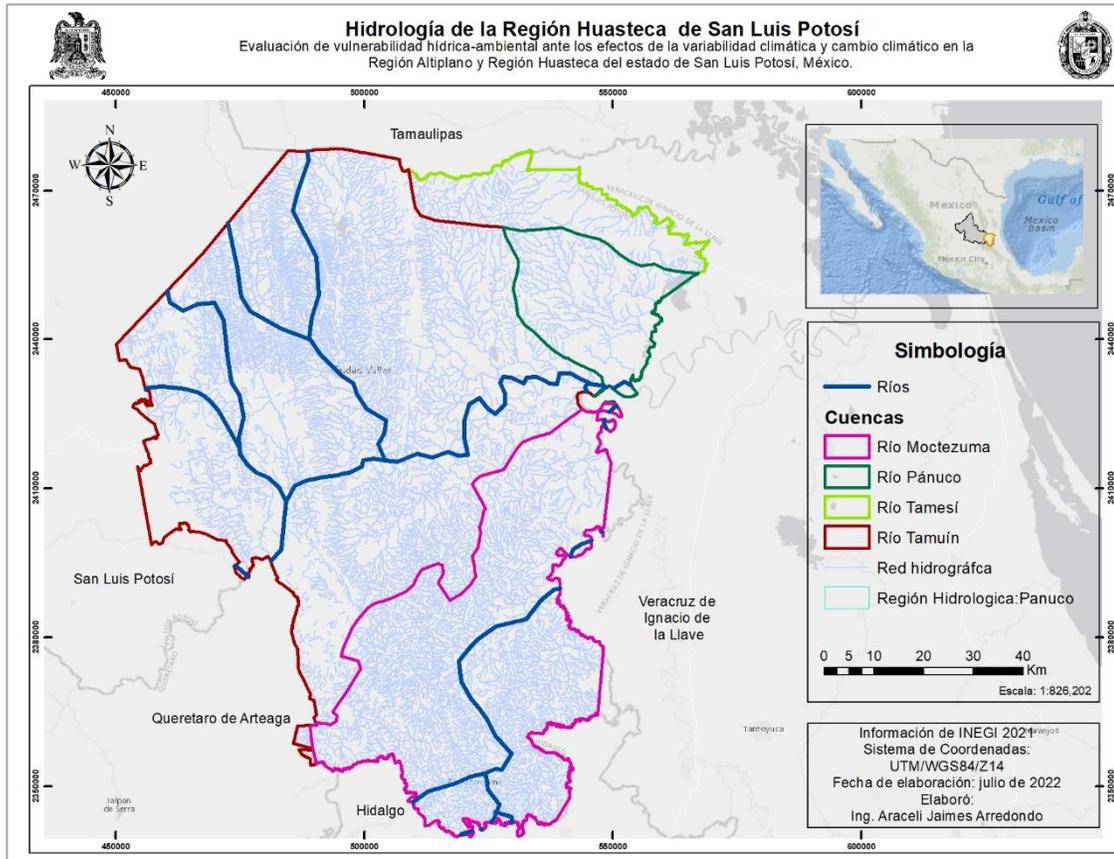


Figura 11. Hidrología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2.4 Geología de la Región Huasteca.

A fines del periodo Cretácico y principios del Terciario, la máxima deformación orogénica conocida como Revolución Laramide, provocó la formación de la Sierra Madre Oriental. Durante el Cenozoico continúan los levantamientos y el retiro de los mares, plegándose en forma definitiva. En la Sierra Madre Oriental, se tiene evidencia de dos eventos tectónicos ocurridos hacia fines del Cretácico y principios del Terciario. El primero, de carácter compresivo, deformó fuertemente a la secuencia mesozoica en pliegues anticlinales y sinclinales, algunos simétricos y otros recumbentes, dando lugar también a un sistema de fallas inversas, alineados todos ellos en dirección noroeste-sureste, característica en la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2007).

La Llanura Costera del Golfo Norte al oriente del estado, es una planicie sedimentaria cuyo origen está íntimamente relacionado con la regresión del Atlántico, iniciada desde el Terciario Inferior y causada por el relleno gradual de la cuenca oceánica, donde fueron acumulados grandes volúmenes de materiales rocosos provenientes del continente. A principios del Jurásico Superior, se inició la transgresión marina que cubrió de forma parcial la Plataforma Valles-San Luis Potosí y favoreció el depósito de sedimentos calcáreos y

arcillosos que dieron origen a la formación de rocas calizas y calizas-lutitas (INEGI, 2007). En la Figura 12. se presentan los tipos de roca presentes en la RH.

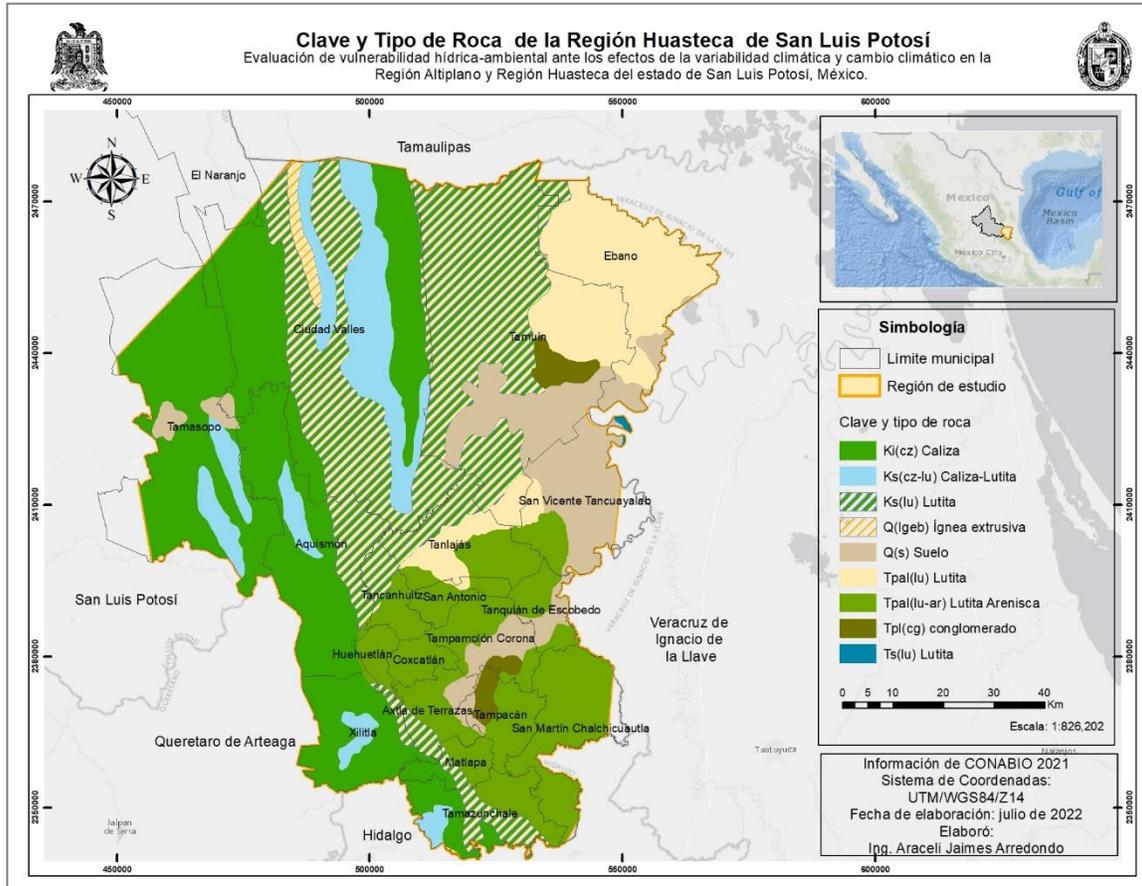


Figura 12. Geología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2021).

1.2.5 Edafología de la Región Huasteca

En la RH no existe una unidad de suelo dominante, ya que en su territorio se pueden encontrar por lo menos seis de ellas, entre las que están los suelos Regosol, Litosol, Vertisol, Rendzina, Feozem y Luvisol. Gracias al papel que juegan el clima y la vegetación en la formación del suelo, en esta región los suelos son ricos en materia orgánica a causa de que sostienen exuberante vegetación, destacando las comunidades vegetales de selvas, bosque de encino y pino, pastizales y matorral submontano (INEGI, 2007).

A continuación, se presentan los diferentes tipos de suelo de la RH, delimitados por subprovincias (INEGI, 2007):

Subprovincia Llanuras y Lomeríos. Esta región comprende los municipios de Tamuín, Ébano, San Vicente Tancuayalab y Tanquián de Escobedo, así como parte de Ciudad Valles,

Tanlajás, Tancanhuitz, San Antonio, Tampamolón Corona, Tampacán, Axtla de Terrazas, San Martín Chalchicuautla y Aquismón.

El suelo de esta subprovincia es, en gran parte, de origen aluvial y coluvie-aluvial; tienen un estrato geológico de lutitas del Cretácico Superior y lutitas-areniscas terciarias. El de color oscuro muy arcilloso que se agrieta es duro y masivo en la época seca, lodoso y adhesivo en época de lluvias (por lo que su manejo es difícil), y, sin embargo, es muy fértil y profundo, denominado Vertisol pélico que domina en casi el 80% de la región. Se le encuentra en todas las geoformas y está asociado a suelo claro de color amarillento o pardo (Vertisol crómico) o a suelos oscuros como Feozem calcáreo, Castañozem cálcico, Redzina y Regosol calcáreo. Los Vertisoles que se localizan en los alrededores de Tamuín y al sur y este de San Vicente Tancuayalab, tienen grandes concentraciones de sales y sodio por lo que esta zona tiene Vertisol pélico asociado a Gleysol de tipo vértice.

Subprovincia Carso Huasteco. Esta región comprende íntegramente los municipios de Coxcatlán, Huehuetián, Tamazunchale, Xilitla, Aquismón, Tancanhuitz, San Antonio, San Martín Chalchicuautla, Tamasopo, Tampacán, Tampamolón Corona, Tanlajás, Tierra Nueva y Axtla de Terrazas. En las sierras y cañones domina el Litosol, que ocupa el 32% del total de los suelos de la subprovincia, es de origen residual, poco profundo (menor de 10 cm), de color oscuro y rojizo. Se le encuentra asociado a Rendzina (segundo en importancia con 22%), que posee características semejantes al ya descrito, salvo en cuanto a profundidad y al contenido de materia orgánica. Otros suelos presentes en estos sistemas son los Feozems (háplicos y calcáreos), Luvisoles (órticos y crómicos) y Regosol calcáreo, sobre todo en la sierra baja y en las laderas abruptas al sureste de la subprovincia. Son de origen coluvial y tienen media y alta fertilidad. En la Figura 13. se presentan los tipos de suelo existentes en la RH.

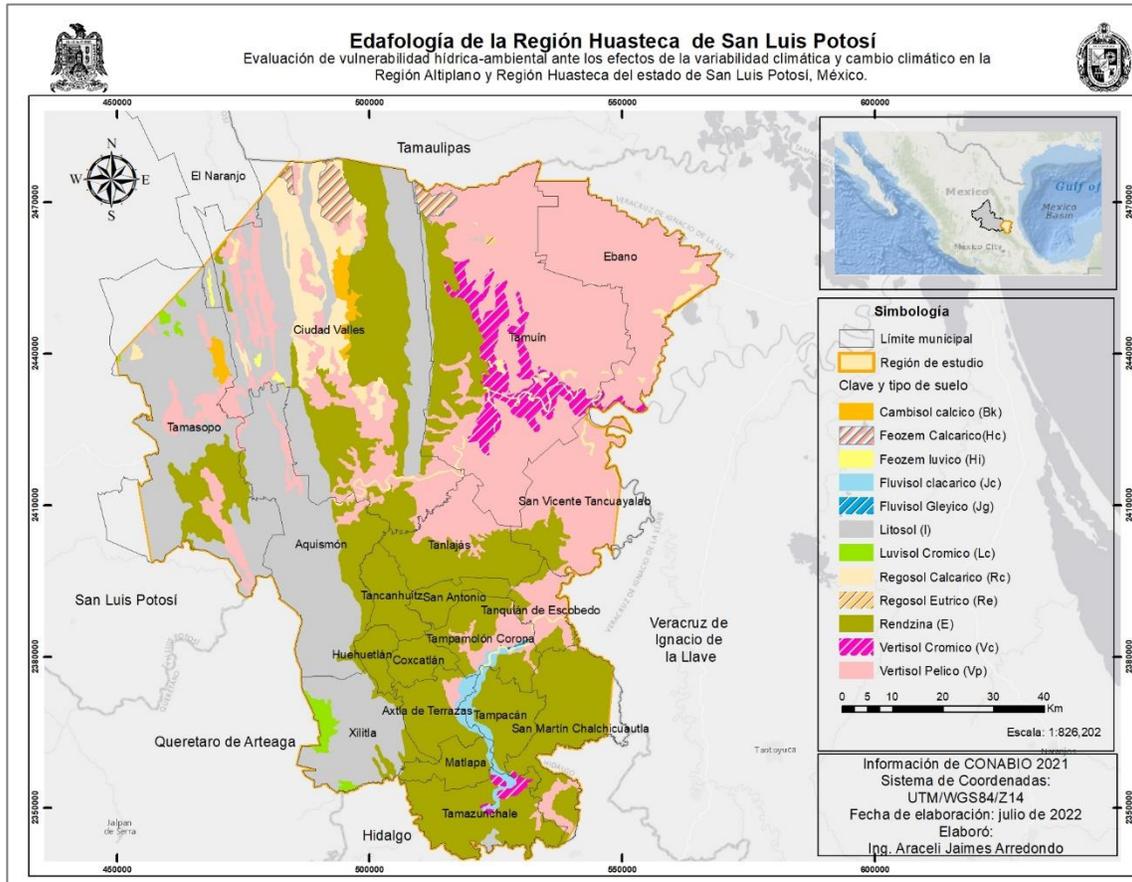


Figura 13. Edafología de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

1.2.6 Fauna y vegetación de la Región Huasteca

La fauna presente en la RH está conformada de insectos: moscas, mosquitos, mayates, libélulas y abejorros; reptiles como: tortugas, serpientes, lagartijas; batracios: sapos y ranas en charcos y estanques; aves: zopilotes, águilas, halcones, cuervos, tordos, palomas, codornices, zenzontles, gorriones, golondrinas y calandrias; entre los mamíferos destacan: rata, conejo, liebre, coyote, gato montés, tlacuache, tejón, zorrillo, iguana, ardilla jabalí, armadillo. En las zonas montañosas todavía se puede encontrar: venado, tigrillo, tepezcuintle, zorra, entre otros. En los ríos, presas y algunos estanques se encuentran especies de peces como: robalo, lisa, paje, boquín, bobo, curbina, salomiche, miquicuán, truca, anguila, mojarra, entre otros (INAFED, 2002).

Los tipos de vegetación presentes son bosques de pino-encino, de pino, de encino, mesófilo de montaña, selva alta y mediana subperennifolia, selva baja caducifolia, pastizal cultivado, inducido y natural, comunidades algales (litorales epilíticos), vegetación riparia (CONABIO, 2010).

El bosque tropical se localiza en San Martín, Valles, Tamasopo y El Naranjo, abarcando aproximadamente el 18% de la superficie del estado. En este se encuentran algunos árboles

como: guayacán, madroño, palo de hueso, palo de rosa, palma, chijol, chicozapote, papaya, mamey, plátano, entre otros. El bosque espinoso que cubre un área equivalente al 5% del territorio potosino se encuentra en la llamada planicie costera (INAFED, 2002).

1.2.7 Áreas Naturales Protegidas en la Región Huasteca

A nivel federal se encuentran decretadas 2 áreas naturales protegidas en la RH (CONABIO, 2020), en la Figura 14. se presentan las áreas Naturales Protegidas localizadas en la RH.

1. Ciudad Valles tiene un área natural protegida, como reserva de la biosfera “El abra Tanchipa”; e incluye el municipio de Tamuín según decreto de 1994.
2. El municipio de Xilitla tiene un área natural protegida como reserva forestal “Porción Boscosa del Estado”; según el decreto de 1923.

A nivel estatal se encuentran decretadas 4 áreas naturales protegidas en la RH (SEGAM, 2022).

1. En el municipio de Aquismón se encuentra como Monumento Natural; “El sótano de las Golondrinas”, según decreto de 2001.
2. “El Bosque Adolfo Roque Bautista” como Parque Estatal, en el municipio de Tamuín, según decreto de 2001.
3. “Cuevas sagradas del viento y de la fertilidad”, como Monumento Natural, en el municipio de Huehuetlán, según decreto de 2001.
4. “La hoya de las Huahuas” como Monumento Natural, en el municipio de Aquismón, según decreto de 2001.

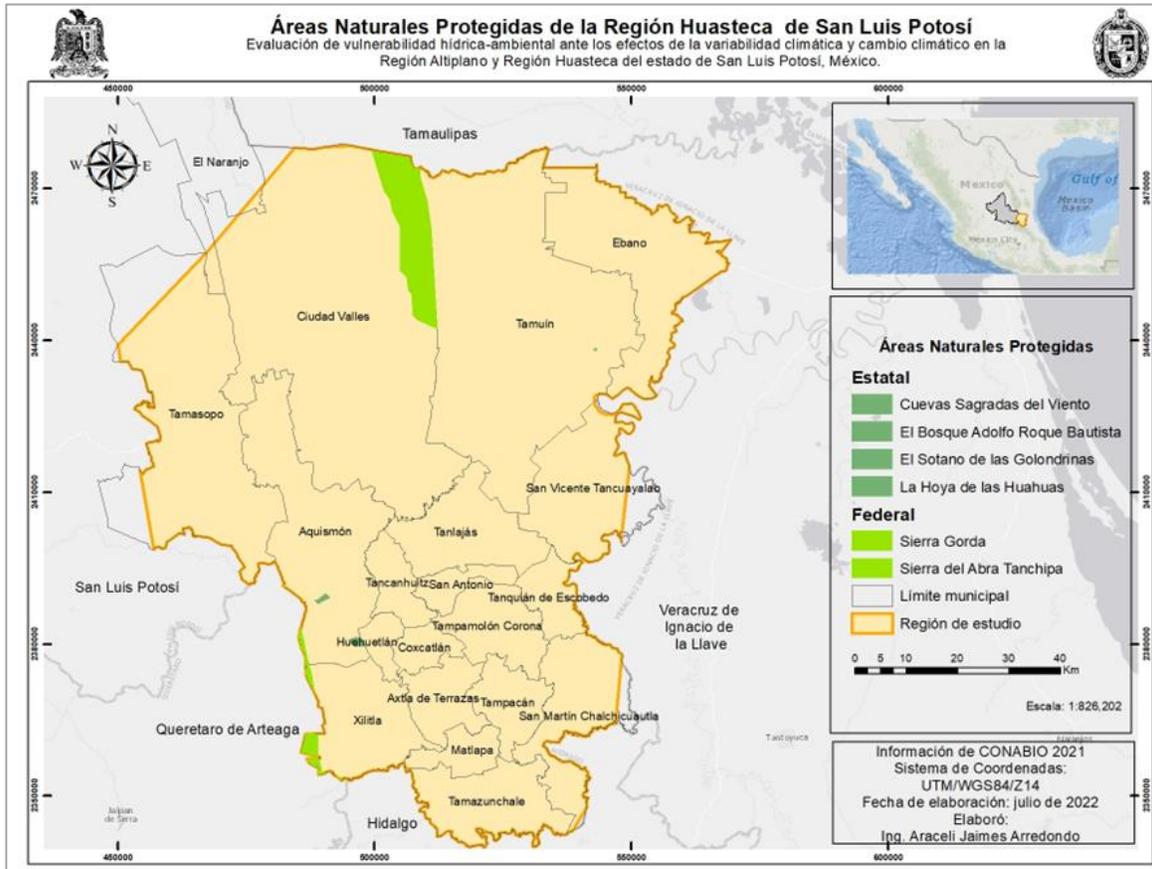


Figura 14. Áreas Naturales Protegidas de la Región Huasteca (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

CAPITULO 2. EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA E ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

2.1 Variabilidad climática

Se define como variabilidad climática a las variaciones del rango medio de las condiciones climáticas y otras estadísticas del clima en un espacio geográfico a lo largo del tiempo, que se extiende de la escala de un fenómeno meteorológico y se atribuye a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2007). Hay que mencionar que existen discrepancias, en particular en la comprensión de las pautas y tendencias del clima a nivel local y regional, que pueden mejorarse con el tiempo aumentando la investigación en las regiones del mundo.

Estudiar la variabilidad del clima regional es de fundamental importancia, ya que de aquí se puede planificar el manejo de recursos naturales de un país; sin embargo, evaluar la variabilidad climática y los mecanismos que producen los cambios es complejo. La forma más fácil de analizar e interpretar el clima promedio de una región, es en términos de medias anuales o estacionales de temperatura y/o precipitación (Ayllón, 2003).

Para cumplir con el segundo y tercer objetivos específicos de este trabajo:

- Analizar las condiciones del tiempo atmosférico históricas de las regiones de estudio, mediante análisis de series de tiempo de las variables meteorológicas: precipitación total, temperatura promedio, temperatura máxima y mínima, con discretizaciones de tiempo diaria, mensual y anual, y;
- Determinar variabilidad climática mediante el análisis de tendencias y rupturas mediante el uso de las pruebas estadísticas de Mann-Kendall y Pettit.

Se realizó la siguiente metodología:

2.1.1 Obtención de registros históricos

En primer lugar, fueron solicitados y fueron proporcionados, por CONAGUA, los registros históricos de temperatura máxima, temperatura promedio, temperatura mínima y precipitación total mensual. Fueron revisados datos de 102 estaciones meteorológicas presentes en las dos regiones de estudio. Se llevo a cabo una discretización de calidad de estos registros, empleando las pruebas estadísticas de Anderson y de Helmert (Hirsch *et al.*, 1993). Además, se tuvo como requisito el hecho de que para analizar la variabilidad climática se requieren registros históricos de 30 años o más (IPCC, 2007). Por ello, se discriminaron algunas estaciones, para quedar con un total de 51 estaciones meteorológicas; 20 en la RA y 31 de la RH, las cuales que se enlistan en el Cuadro 4. donde en la columna de la prueba de Anderson la **I** significa independencia y en la columna de la prueba de Helmert la **H**, describe una estación con datos homogéneos. Con un periodo combinado de 1975 a 2019, lo que resulta en un periodo de estudio de 44 años para la RA y 45 para la RH

Cuadro 4. Características de las 51 estaciones analizadas, (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

	N°	Nombre/municipio	Clave	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Pruebas de calidad	
				X	Y		Anderson	Helmer t
Región Altiplano	1	Buena Vista, Villa de Guadalupe	24181	316940	2591463	1,655	I	H
	2	Cedral, cedral	24007	324031	2628263	1790	I	H
	3	Charcas, Charcas	24158	283910	2559536	2021	I	H
	4	Coronado, Venado	24188	300905	2536347	1680	I	H
	5	Coyotillos, Charcas	24160	273871	2576857	2201	I	H
	6	El Carmen. Matehuala	24162	341141	2584473	1356	I	H
	7	El Hospital, Charcas	24189	273286	2572065	2187	I	H
	8	Guanamé, Venado	24150	269239	2528920	1944	I	H
	9	La Maroma, Catorce	24033	296795	2596340	1819	I	H
	10	La Presa, Villa de Guadalupe	24142	324367	2599701	1598	I	H
	11	Matehuala, Matehuala (SMN)	24040	332316	2619827	1589	I	H
	12	Reforma, Salinas de Hidalgo	24073	234100	2518880	2044	I	H
	13	Salinas, Salinas de Hidalgo	24148	220728	2505000	2073	I	H
	14	San Francisco II. Moctezuma	24192	306243	2519233	1999	I	H
	15	San Francisco. Santo Domingo	24154	251594	2579275	2213	I	H
	17	Santo Domingo, Santo Domingo	24077	220122	2582454	1971	I	H
	18	Sauz de Calera, Villa de Ramos	24152	176156	2526289	2080	I	H
	19	Villa de Ramos, Villa de Ramos	24059	201064	2527866	2210	I	H
	20	Vanegas, Vanegas	24094	301321	2642896	1738	I	H
		21	Veinte de Noviembre	24137	472084	2406287	276	I
22		Agua Buena, Tamasopo	24001	460736	2416605	777	I	H
23		Altamira, Cd. Santos	24002	502759	2395933	60	I	H
24		Aquismón	24003	498361	2391628	33	I	H
25		Ballesmí, Tanlajás	24005	505171	2403466	45	I	H
26		Chapulhuacanito, Tamazunchale	24122	533785	2346561	132	I	H
27		Damián Carmona, Tamasopo	24014	470433	2445030	491	I	H
28		Ébano, Ébano	24015	562815	2456228	55	I	H
29		El Coco, Tamuín	24017	527845	2446780	59	I	H
30		El Fiscal, San Vicente Tancuayalab	24020	532716	2418471	70	I	H
31		El Peñón, Tamuín	24107	513388	2468468	108	I	H
32		El Tigre, Cd. Valles	24028	487549	2460166	154	I	H

	N°	Nombre/municipio	Clave	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Pruebas de calidad	
				X	Y		Anderson	Helmer
Región Huasteca	33	Gallinas, Aquismón	24031	474281	2422333	314	I	H
	34	La Gloria, Tanlajás	24133	518946	2414668	33	I	H
	35	Las Adjuntas, Tamuín	24036	544737	2430123	18	I	H
	36	Requetemu, Axtla de Terrazas	24026	512091	2368421	88	I	H
	37	San Dieguito, Cd. Valles	24064	477666	2434165	346	I	H
	38	San Martín Chalchicuautla	24009	535737	2363444	212	I	H
	39	San Vicente Tancuayalab	24113	540447	2398455	45	I	H
	40	Santa Cruz, Aquismón	24072	495690	2399807	58	I	H
	41	Santa Elena, Tamuín	24149	515065	2420690	33	I	H
	42	Tamapazt, Aquismón	24082	487925	2389942	1071	I	H
	43	Tancuilín, Tamazunchale	24084	512957	2365501	92	I	H
	44	Tanlajás, Tanlajás	24087	511955	2395937	124	I	H
	45	Tanlú, Santa Catarina	24136	473263	2392574	386	I	H
	46	Tanquián, Tanquián de Escobedo	24085	535936	2390500	48	I	H
	47	Tantzohuiche, Cd. Valles	24088	500861	2411336	43	I	H
	48	Temamatla, Tamazunchale	24091	525018	2348852	187	I	H
	49	Tierra Blanca, Tamazunchale	24092	511242	2347053	398	I	H
	50	Tlamaya, Xilitla	24125	499136	2369830	619	I	H
51	Xilitla, Xilitla	24105	500933	2364868	676	I	H	

2.1.2. Estimación de datos faltantes

En la Figura 15. se presenta la ubicación geográfica de las estaciones que fueron utilizadas para realizar el análisis de variabilidad climática. En las 51 estaciones se presentaron registros de precipitación mensual incompletos, por ello se adoptó el proceso siguiente para su estimación: primeramente, calcular promedios de estaciones vecinas (mes y año) cuando hacían falta datos de 11 meses de un año (principalmente los meses de la época de lluvias), después se utilizó el método racional deductivo, que consiste en utilizar porcentajes y el registro del mes con que si se contaba. En algunos casos se utilizó una la estimación de datos faltantes mediante regresión lineal.

En las 51 estaciones se presentaron registros de temperatura promedio, máxima y mínima incompletos, por ello se siguió el proceso siguiente para su estimación: se optó por realizar estimación de datos faltantes de temperatura manejando valores medios de las estaciones cercanas. Algunas estaciones se encuentran en los límites estatales, por ello se utilizaron los datos de las estaciones con clave 32058, 3047, 13021, 13145, 13141, 13104, 13052, 30255, y 30051 de los estados que colindan con San Luis Potosí, para estimar datos faltantes. En la Figura 16. se resumen los métodos para estimar datos faltantes.

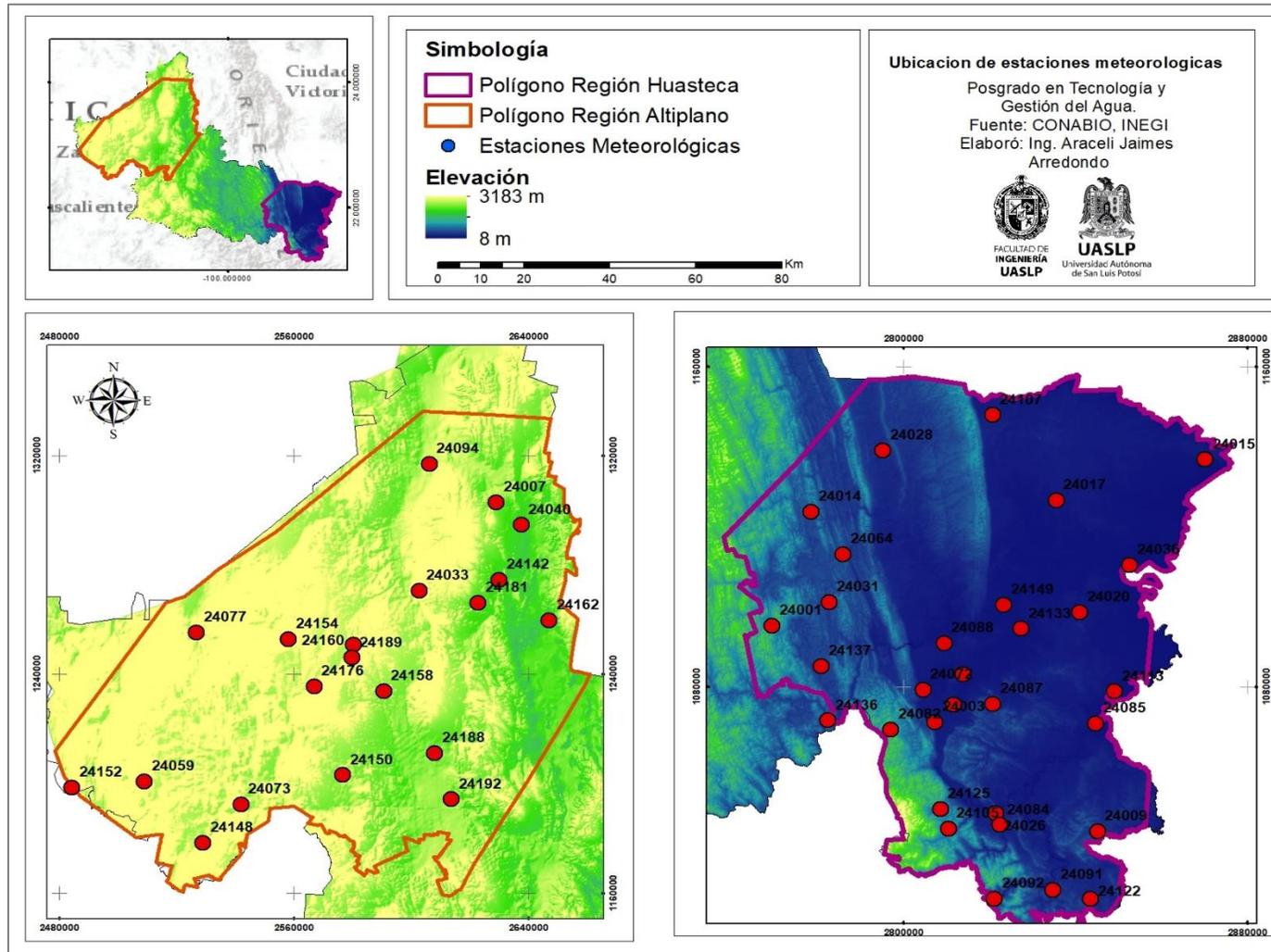


Figura 15. Ubicación de estaciones meteorológicas (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

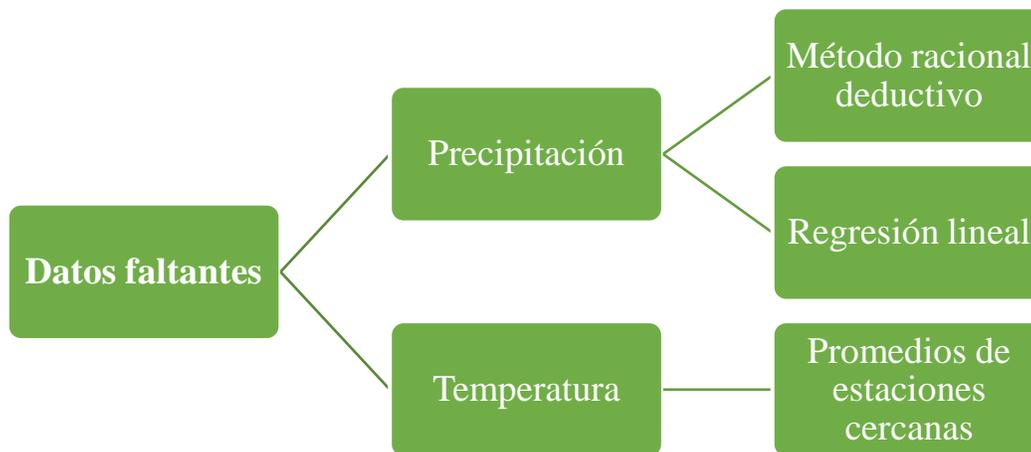


Figura 16. Métodos para estimar datos faltantes (Elaboración propia).

2.1.3 Cálculo de valores regionales por el método de isólineas

Se resolvió estimar valores para las dos regiones de estudio, no solo contar con los datos históricos de las 51 estaciones meteorológicas, sino además diferenciar de un valor para cada región de estudio de cada variable analizada. Para ello se utilizaron dos programas de S.I.G. (Sistema de Información Geográfica); Arc. Gis. y Qgis, interpolando los registros, deduciendo isólineas, y manejando la interpolación IDW.

El primer paso para determinar el valor medio de cada una de las cuatro variables analizadas después de tener los registros mensuales y anuales completos fue la elaboración de isólineas para cada región de estudio; para cada mes y año analizado, utilizando la interpolación IDW, después se calculaban las áreas a las que pertenecía cada valor de cada isólinea dibujada en el programa ArcGis, comparándolo con el valor total del área de estudio.

El método espacial de interpolación denominado Distancia Inversa Ponderada (IDW) por sus siglas en inglés, consiste en dividir una cuenca o área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de una celda sin edición puede obtenerse a través de una relación entre los valores de precipitación de las celdas próximas con datos conocidos y del inverso de la distancia que las separa, elevada a una potencia β que determina la importancia que se desea dar a las estaciones. El método IDW es uno de los más recientes en los estudios de estimación de variables meteorológicas, y su importancia radica en la fácil aplicación en un S.I.G. El método contempla una ponderación a distancia, dicha ponderación, al tener un factor exponencial y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación puede formar agrupaciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones. Este método divide a la cuenca o área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de

una celda sin medida es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medida y del inverso de la distancia que las separa, elevada al cuadrado (Juárez, 2015).

Como resultado por el método de interpolación de isólinas: se obtuvieron los valores mensuales y anuales para el periodo de 1975-2019, de cada región, en el Cuadro 5. se presentan valores medios obtenidos.

Cuadro 5. Valor medio regional, calculado por el método de isólinas 1975-2019. (Elaboración propia).

Valor medio regional				
Región	Precipitación promedio anual (mm/año)	Temperatura promedio (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)
Altiplano	401.83	17.27	30.43	4.30
Huasteca	1522.08	24.12	35.78	13.35

2.1.4 Prueba estadísticas

Para determinar variabilidad climática se aplicaron dos pruebas estadísticas, la prueba de Mann-Kendall, que predice la existencia de tendencia (positiva o negativa) al cambio de los registros históricos evaluados, o en el caso de que no haya tendencia al cambio. Y la prueba de Pettit donde se analizaron los valores medios de los registros y en el caso que se presente ruptura se concluyó con el año en el que se está presentando una ruptura de los valores promedio.

2.1.4.1 Prueba de Mann Kendall

El estudio utilizó la prueba de Mann-Kendall, ya que no requiere que los datos se distribuyan normalmente. La prueba valida la hipótesis nula, H0 (sin tendencia) contra la hipótesis alternativa H1, asumiendo que hay una tendencia positiva o negativa. El análisis estadístico de la tendencia S se define como (Hirsch *et al.*, 1993):

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

En primer lugar, la varianza de S se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

Aquí q es el número de grupos vinculados y t_p es el número de valores de datos en el grupo p^{th} .

Donde:

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

$$Z = 0 \dots \dots \dots Si S = 0$$

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

Es una prueba de dos lados para tendencias, la hipótesis nula es rechazada en un nivel de significancia de α si $|Z| > Z(1-\alpha/2)$, donde $Z(1-\alpha/2)$ es el valor de la distribución normal que excede $\alpha/2$. Un valor positivo de Z indica una tendencia ascendente; un valor negativo indica una tendencia descendente en la serie de tiempo evaluada. En este trabajo las tendencias son identificadas a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con un valor crítico de 1.96. La prueba estadística de tendencias Z es utilizada para indicar la tendencia significativa, pero no es una cuantificación de la magnitud de la tendencia (Molnár y Ramírez, 2001). Se realizó esta prueba para los datos de precipitación, temperatura promedio, máxima y mínima; considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

2.1.4.2 Magnitud de cambio

Un paso primordial fue evaluar la magnitud de cambio, después de realizar la prueba de Mann-Kendall. Para estimar la pendiente de una tendencia existente (como cambio por año) se utiliza el método no paramétrico de Sen. El método de Sen se puede usar en casos donde se puede asumir que la tendencia es lineal (FMI, 2002). Esto significa que $f(t)$ en la ecuación (1) es igual a:

$$f(t) = Qt + B$$

Donde Q es la pendiente y B es una constante.

En el análisis del estadístico de Mann-Kendall y de la prueba Sen, utilizo una hoja de cálculo habilitada para macros, en la Figura 17. se presenta la forma en la que se ingresan los datos por mes y año, y en la Figura 18. se presentan los resultados obtenidos de Z , del valor de la pendiente, así como de significancia estadística.

ANNUAL DATA

FI17 Virolahti 1987- 2000

CALCULATE TREND STATISTICS

Number of time series in the calculation: 13

Number of annual values in the calculation: 39

Select the FIRST YEAR of the calculation: 1975

Select the LAST YEAR of the calculation: 2013

Year	ene	feb	mar	abril	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	anual
1975	-7.5	-7	2	6.5	7.5	11	10.5	11	3.5	5	-4.5	-5	2.75
1976	-1.5	-7	4	5	5	10	10	9	10	6	1	0	4.291667
1977	-1	-2	-1	4	8	10.5	10	11	10	2	0	-3	4.041667
1978	-3.5	-2.5	1	4	8.5	11	10.5	11	10.5	4.5	3	0	4.833333
1979	1	1	3	7	7	6.5	10.5	11	2	4	-3	-1	4.083333
1980	-2	0	-1	-3	9.5	11	12	12	10.5	7	0	-1	4.583333
1981	-3	-1	-4	8	9.5	11	12	11	8	5	0	0	5.375
1982	-4	1	-3	8.5	11	13	11	10	8	7	1	-3	5.041667
1983	-3.5	-3.5	-3	0	9	11	10.5	10	10	3.5	1	-1.5	3.625
1984	-5	-3	-2.5	4	6.5	7.5	10	9	8	8	4	1	3.958333
1985	-8	0	5	4	9	11	8.5	8	10	2	0	-1	4.041667
1986	-3.5	-2	1	8	10	12	11.5	11	9.5	2	-3	-4.5	4.333333
1987	-7	-3.5	-2	0	8	11	11	12	12	6	1.5	0	4.083333
1988	0	-4	0	6	9.5	9	11	12	6	6.5	1	1	4.833333
1989	2.5	1	0	6	7	6	11	13	1	0	2	-6	3.625
1990	0	0	1	6	8	11	10	9	11	4	0	0	5
1991	-3	-4	-5	6	9	12	11	8	5.5	3	1	1	3.708333
1992	3	0	1	1	9.5	10	11	11	2	3	1	0	4.375
1993	1	0	0	4	8	11	11.5	11	7	2	2	0.2	4.808333
1994	0	1	2	5.5	10	10.5	11	6	10	8	3	1	5.666667
1995	0	0	1	1	12.5	12	11	11	10	0	0	1	4.958333

Figura 17. Hoja de cálculo para estimar el estadístico de Mann-Kendall, y el valor de la magnitud de cambio.

TREND STATISTICS

FI17 Virolahti 1987- 2000

Time series	First year	Last Year	n	Mann-Kendall trend			Sen's slope estimate		
				Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99
ene	1975	2013	39		-1.08		-0.053	-0.188	0.077
feb	1975	2013	39		-0.31		0.000	-0.125	0.100
mar	1975	2013	39		-2.03	*	-0.077	-0.179	0.000
abril	1975	2013	39		-0.46		0.000	-0.111	0.083
may	1975	2013	39		-0.66		0.000	-0.079	0.044
jun	1975	2013	39		1.17		0.000	0.000	0.067
jul	1975	2013	39		0.87		0.000	-0.021	0.041
ago	1975	2013	39		1.12		0.000	0.000	0.071
sep	1975	2013	39		1.00		0.033	-0.072	0.154
oct	1975	2013	39		-0.60		-0.020	-0.162	0.086
nov	1975	2013	39		-1.74	+	-0.040	-0.154	0.000
dic	1975	2013	39		-1.32		-0.048	-0.174	0.043
anual	1975	2013	39		-1.60		-0.017	-0.048	0.017

Figura 18. Hoja de cálculo que presenta los resultados del estadístico de Mann-Kendall y de la magnitud de cambio.

A continuación, se presentan los resultados de la prueba de Mann-Kendall, así como los valores de magnitud de cambio en los Cuadros numero 6 al 13. Se presenta el análisis de mensual y anual para cada una de las cuatro variables analizadas: temperatura promedio, temperatura máxima, temperatura mínima en color rojo se presentan los resultados de magnitud de cambio con tendencia significativa al cambio de incremento y de color azul con tendencia significativa de decremento.

Cuadro 6. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura promedio de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												
1	Buena Vista	24181	0.12	0.10	0.06	0.03	0.01	0.02	0.04	0.05	0.02	0.04	0.06	0.09	0.04
2	Cedral	24007	0.01	0.03	0.02	0.02	0.04	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.01	0.01	0.03
3	Charcas	24158	0.04	0.08	0.06	0.07	0.08	0.11	0.10	0.08	0.09	0.10	0.09	0.05	0.06
4	Coronado	24188	0.03	0.06	0.01	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.01	0.05	0.05	0.03
5	Coyotillos	24160	-0.03	-0.01	-0.06	-0.05	-0.06	-0.05							
6	El Carmen	24162	-0.03	-0.06	-0.06	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04	0.02	-0.02	-0.03	0.00	0.00
7	El Hospital	24189	-0.03	0.02	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.04	0.00	-0.04	-0.03	-0.01
8	Guanamé	24150	-0.01	0.03	-0.01	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
9	La Maroma	24033	0.03	0.04	0.00	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02
10	La Presa	24142	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
11	Matehuala	24040	0.02	0.04	0.02	0.03	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03
12	Reforma,	24073	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01
13	Salinas	24148	-0.02	0.00	-0.03	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.03	0.02	0.03	0.00	-0.02	0.00
14	San Francisco II	24192	-0.03	0.00	-0.02	0.04	0.06	0.02	0.05	0.04	0.03	0.00	-0.04	-0.05	0.02
15	San Francisco	24154	0.04	0.05	-0.01	-0.06	-0.11	-0.11	-0.12	-0.13	-0.12	-0.04	-0.02	0.00	-0.05
16	San Juan Del Tuzal	24176	0.03	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.08	0.06
17	Santo Domingo	24077	-0.07	-0.03	-0.03	0.04	0.05	0.02	0.01	0.05	0.02	-0.03	-0.08	-0.06	-0.01
18	Sauz de Calera	24152	-0.09	-0.04	-0.04	-0.04	-0.03	-0.01	-0.01	0.00	-0.03	-0.03	-0.06	-0.07	-0.04
19	Villa de Ramos	24059	-0.02	-0.02	-0.01	0.04	0.02	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.01	-0.01	0.01
20	Vanegas	24094	-0.01	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.07	0.04	0.03	0.00	0.04
21	REGIÓN ALTIPLANO	----	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01

Cuadro 7. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura máxima de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
1	Buena Vista	24181	0.13	0.14	0.11	0.06	0.08	0.12	0.18	0.17	0.17	0.13	0.10	0.09	0.13
2	Cedral	24007	0.05	0.08	0.03	0.01	0.11	0.07	0.08	0.10	0.07	0.06	0.02	0.03	0.06
3	Charcas	24158	0.05	0.11	0.09	0.12	0.16	0.16	0.10	0.14	0.09	0.09	0.08	0.04	0.09
4	Coronado	24188	0.08	0.08	0.04	0.09	0.13	0.09	0.07	0.08	0.03	0.00	0.05	0.04	0.08
5	Coyotillos	24160	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02
6	El Carmen	24162	0.05	0.05	0.06	0.12	0.11	0.12	0.14	0.13	0.11	0.06	0.00	0.05	0.08
7	El Hospital	24189	0.00	0.10	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
8	Guanamé	24150	0.00	0.07	0.02	0.00	0.03	0.04	0.06	0.06	0.04	0.00	0.04	0.08	0.04
9	La Maroma	24033	0.05	0.10	0.08	0.10	0.13	0.10	0.06	0.09	0.05	0.10	0.09	0.13	0.08
10	La Presa	24142	0.06	0.08	0.03	0.06	0.11	0.09	0.07	0.12	0.03	0.02	0.02	0.05	0.06
11	Matchuala	24040	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
12	Reforma,	24073	0.00	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
13	Salinas	24148	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.05	0.00	0.06	0.07	0.03	0.03
14	San Francisco II	24192	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.06	0.06	0.01	0.00	-0.04	-0.10	0.01
15	San Francisco	24154	0.03	0.02	0.00	0.00	-0.05	-0.08	-0.02	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	San Juan Del Tuzal	24176	0.00	0.11	0.05	0.05	0.04	0.00	0.04	0.06	0.06	0.00	0.02	0.06	0.05
17	Santo Domingo	24077	-0.07	0.00	-0.06	0.04	0.00	0.03	0.00	0.00	-0.08	-0.12	-0.06	-0.09	-0.02
18	Sauz de Calera	24152	-0.05	0.00	-0.08	-0.07	-0.05	-0.06	-0.05	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	-0.06
19	Villa de Ramos	24059	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.01
20	Vanegas	24094	0.03	0.08	0.03	0.04	0.11	0.06	0.07	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05
21	REGIÓN ALTIPLANO	----	0.02	0.05	0.02	0.03	0.07	0.05	0.04	0.07	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04

Cuadro 8. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio para temperatura mínima de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												
1	Buena Vista	24181	0.19	0.18	0.14	0.00	-0.06	-0.08	-0.08	-0.03	0.00	0.10	0.14	0.16	0.04
2	Cedral	24007	0.00	0.08	0.00	-0.04	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.08	0.01
3	Charcas	24158	0.00	0.06	0.00	0.00	0.03	0.13	0.14	0.13	0.13	0.09	0.00	0.00	0.07
4	Coronado	24188	0.05	0.04	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.05	0.00	-0.01
5	Coyotillos	24160	-0.14	-0.06	-0.07	-0.10	-0.09	-0.05	-0.09	-0.06	-0.04	-0.07	-0.10	-0.13	-0.08
6	El Carmen	24162	-0.08	-0.09	-0.05	-0.04	-0.05	-0.03	-0.03	0.00	0.00	-0.07	-0.08	-0.02	-0.05
7	El Hospital	24189	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.06	-0.08	-0.01
8	Guanamé	24150	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00
9	La Maroma	24033	-0.05	0.00	-0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	-0.02	-0.04	-0.05	-0.02
10	La Presa	24142	0.04	0.06	0.03	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
11	Matehuala	24040	0.03	0.11	0.11	0.09	0.09	0.03	0.06	0.07	0.13	0.07	0.08	0.00	0.07
12	Reforma,	24073	0.06	0.08	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.05	-0.03	0.02
13	Salinas	24148	0.00	-0.06	-0.06	-0.04	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	-0.09	-0.08	-0.04
14	San Francisco II	24192	-0.13	-0.16	-0.09	-0.05	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.07	-0.13	-0.11	-0.21	-0.05
15	San Francisco	24154	0.10	0.10	0.07	0.00	-0.06	-0.10	-0.15	-0.13	-0.09	0.00	0.09	0.03	-0.01
16	San Juan Del Tuzal	24176	0.03	0.09	0.03	0.05	0.00	0.00	0.05	0.06	0.11	0.04	0.00	0.00	0.03
17	Santo Domingo	24077	-0.13	-0.08	-0.06	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.07	-0.04	-0.11	-0.19	-0.02
18	Sauz de Calera	24152	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01
19	Villa de Ramos	24059	0.06	0.04	-0.03	0.00	0.03	0.09	0.07	0.04	0.06	0.03	0.00	0.03	0.04
20	Vanegas	24094	-0.07	-0.03	-0.03	0.01	0.00	0.11	0.09	0.09	0.13	0.00	-0.06	-0.09	0.00
21	REGIÓN ALTIPLANO	----	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.05	0.00	0.00	-0.03	0.02

Cuadro 9. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
1	Buena Vista	24181	-0.16	0.00	0.00	-0.21	-0.38	0.15	-0.53	-0.37	0.86	-0.14	-0.06	-0.13	-0.04
2	Cedral	24007	0.00	0.00	0.00	-0.03	-0.30	-0.40	-0.59	-0.39	-0.17	-0.34	0.00	-0.40	-3.49
3	Charcas	24158	0.06	0.09	0.02	0.00	0.67	1.47	0.61	0.38	0.91	0.23	0.00	-0.19	5.48
4	Coronado	24188	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.50	-0.44	0.02	0.68	-0.30	0.00	-0.08	1.27
5	Coyotillos	24160	-0.06	0.00	0.00	-0.18	0.18	0.46	0.58	-0.01	0.39	-0.37	0.02	-0.04	1.56
6	El Carmen	24162	-0.29	0.00	0.00	0.00	-0.17	0.26	0.12	-0.11	0.39	-0.03	0.00	-0.04	0.37
7	El Hospital	24189	0.00	0.00	0.00	-0.12	0.05	0.46	0.56	0.22	0.84	-0.09	0.00	-0.14	3.56
8	Guanamé	24150	0.00	0.00	0.00	-0.14	0.00	-0.08	0.00	-0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.15
9	La Maroma	24033	0.00	0.00	0.03	0.00	-0.07	0.72	-0.31	0.38	1.30	0.00	0.00	-0.18	1.72
10	La Presa	24142	0.16	0.00	0.00	-0.22	0.00	0.36	0.08	0.69	1.17	0.08	0.07	-0.23	2.53
11	Matehuala	24040	0.00	0.00	0.02	0.00	-0.03	-0.12	-0.29	0.34	0.56	0.12	0.00	-0.13	0.19
12	Reforma,	24073	0.02	0.11	0.09	-0.03	0.26	0.50	0.30	-0.05	1.28	-0.17	0.00	0.05	2.22
13	Salinas	24148	-0.13	0.05	0.00	-0.28	0.22	0.30	0.77	-0.56	0.60	-0.24	-0.02	-0.20	1.06
14	San Francisco II	24192	-0.18	-0.05	-0.02	-0.08	-0.34	-0.25	-0.10	-0.07	0.18	-0.05	0.00	-0.02	0.01
15	San Francisco	24154	-0.59	-0.07	-0.02	-0.64	-0.97	-1.08	-1.43	-1.54	-0.78	-0.67	-0.22	-0.06	-7.91
16	San Juan Del Tuzal	24176	-0.19	-0.05	0.05	-0.25	-0.58	0.06	0.19	-0.39	0.30	-0.41	0.00	-0.07	-0.15
17	Santo Domingo	24077	0.00	-0.14	-0.12	-0.06	-0.17	-0.74	-0.68	-0.14	0.70	-0.40	-0.15	-0.16	-1.65
18	Sauz de Calera	24152	-0.26	0.46	0.41	-0.02	0.16	1.07	0.47	0.06	1.41	0.19	0.33	0.01	4.29
19	Villa de Ramos	24059	-0.29	0.30	0.24	-0.02	-0.46	0.57	-0.61	-0.47	0.29	-0.29	-0.27	-0.30	-1.31
20	Vanegas	24094	0.00	0.02	0.00	0.07	0.21	0.03	-0.06	-0.04	0.67	0.11	0.00	0.00	0.68
21	REGIÓN ALTIPLANO	----	-0.19	-0.03	0.01	-0.18	-0.14	0.25	-0.18	-0.08	0.65	-0.10	-0.04	-0.22	0.30

Cuadro 10. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura promedio de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												
1	Veinte de Noviembre	24137	0.04	0.08	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04
2	Agua Buena	24001	0.03	0.02	0.02	0.03	0.00	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.03
3	Altamira	24002	0.05	0.06	0.03	0.03	0.00	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02
4	Aquismón	24003	0.05	0.04	0.02	0.01	0.00	0.03	0.01	0.02	-0.01	0.02	0.00	0.02	0.02
5	Ballesmí	24005	-0.01	0.01	-0.03	-0.03	-0.04	-0.04	-0.03	-0.02	-0.02	0.00	-0.04	-0.02	-0.02
6	Chapulhuacanito	24122	0.03	0.07	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
7	Damián Carmona	24014	0.04	0.07	0.05	0.03	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.02	0.03	0.04
8	Ébano	24015	0.04	0.07	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04
9	El Coco	24017	0.03	0.03	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02
10	El Fiscal	24020	-0.01	0.01	-0.03	-0.04	-0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03
11	El Peñón	24107	-0.02	-0.01	-0.05	-0.06	-0.05	-0.04	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.03
12	El Tigre	24028	0.08	0.11	0.07	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.09	0.10	0.06	0.07	0.09
13	Gallinas	24031	0.04	0.07	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.02	0.02	0.04
14	La Gloria	24133	0.06	0.07	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03
15	Las Adjuntas	24036	0.00	0.03	-0.01	-0.02	-0.03	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	0.00
16	Requetemu	24026	0.03	0.06	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02
17	San Dieguito	24064	0.03	0.04	0.01	0.02	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
18	San Martín Chalchicuautla	24009	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
19	San Vicente Tancuayalab	24113	0.03	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
20	Santa Cruz	24072	0.02	0.04	0.00	-0.01	-0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.01
21	Santa Elena	24149	0.04	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.02	0.03	0.00	0.03	0.01	0.03	0.04
22	Tamapazt	24082	0.01	0.04	-0.01	0.01	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Promedio (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
23	Tancuilín	24084	0.02	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.01
24	Tanlajás	24087	0.03	0.08	0.01	0.01	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01	-0.02	0.01	0.03	0.02	0.01
25	Tanlú	24136	-0.01	0.03	0.01	-0.02	-0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.04	-0.01	-0.01
26	Tanquián	24085	0.03	0.07	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.02
27	Tantizohuiche	24088	0.06	0.08	0.04	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03	0.03	0.06	0.04	0.02	0.04
28	Temamatla	24091	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02
29	Tierra Blanca	24092	0.00	0.02	-0.01	-0.01	-0.05	-0.02	-0.02	-0.02	0.00	-0.01	-0.04	-0.03	-0.01
30	Tlamaya	24125	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
31	Xilitla	24105	0.05	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.03	0.05	0.02
32	REGIÓN HUASTECA	----	0.03	0.05	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.03

Cuadro 11. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura máxima de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
1	Veinte de Noviembre	24137	-0.04	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.10	0.08	0.06	0.04	0.02	-0.04	-0.04	0.01
2	Agua Buena	24001	0.00	-0.02	-0.04	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	-0.05	0.00	0.00
3	Altamira	24002	0.08	0.06	0.03	0.05	0.00	0.04	0.01	0.05	0.04	0.04	0.06	0.09	0.04
4	Aquismón	24003	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.00
5	Ballesmí	24005	0.00	-0.08	-0.05	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.00	-0.02
6	Chapulhuacanito	24122	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
7	Damián Carmona	24014	0.04	0.07	0.00	0.08	0.00	0.08	0.07	0.08	0.02	0.07	0.00	0.00	0.04
8	Ébano	24015	0.00	0.00	-0.06	0.05	-0.02	0.06	0.04	0.07	0.04	0.06	0.00	0.06	0.03
9	El Coco	24017	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01
10	El Fiscal	24020	-0.03	0.00	-0.05	0.00	-0.06	0.00	-0.02	0.00	-0.03	0.00	-0.06	-0.04	-0.03
11	El Peñón	24107	0.00	-0.12	-0.06	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05	-0.04	-0.04
12	El Tigre	24028	0.06	0.05	0.08	0.17	0.12	0.15	0.15	0.17	0.14	0.14	0.12	0.11	0.12
13	Gallinas	24031	0.02	0.04	0.00	0.07	0.00	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06	0.00	-0.03	0.02
14	La Gloria	24133	0.06	0.00	0.00	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01
15	Las Adjuntas	24036	0.01	0.00	-0.03	0.04	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.00
16	Requetemu	24026	0.04	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05	0.02
17	San Dieguito	24064	0.03	-0.04	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00
18	San Martín Chalchicuatla	24009	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.00	0.03	0.04
19	San Vicente Tancuayalab	24113	0.02	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
20	Santa Cruz	24072	0.00	-0.04	-0.10	0.00	-0.05	0.00	-0.03	-0.03	-0.04	-0.07	-0.06	-0.04	-0.05
21	Santa Elena	24149	-0.07	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.06	0.04	0.05	0.00	0.00	-0.07	0.01
22	Tamapazt	24082	0.00	0.02	0.03	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.08	0.02	0.04	0.03
23	Tancuilín	24084	-0.04	-0.03	0.04	0.09	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	-0.04	-0.05	-0.03	-0.01
24	Tanlajás	24087	0.06	0.02	0.03	0.06	-0.04	-0.03	-0.06	0.00	-0.03	0.00	0.03	0.04	0.01
25	Tanlú	24136	-0.10	-0.07	-0.09	-0.08	-0.03	0.07	0.00	0.00	-0.02	0.00	-0.09	-0.09	-0.04
26	Tanquián	24085	0.04	0.02	0.02	0.08	0.06	0.07	0.05	0.04	0.02	0.00	0.00	0.06	0.03
27	Tantzohuiche	24088	0.12	0.13	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08	0.12	0.14	0.13	0.14	0.09
28	Temamatla	24091	0.04	0.02	0.03	0.06	0.02	0.04	0.05	0.07	0.03	0.07	0.05	0.03	0.04

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Máxima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
29	Tierra Blanca	24092	-0.05	-0.10	-0.04	0.00	-0.03	-0.04	-0.08	-0.05	-0.06	0.00	-0.07	-0.13	-0.06
30	Tlamaya	24125	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.06	0.03	0.03	0.00	0.00	0.01
31	Xilitla	24105	0.01	0.00	-0.03	0.00	-0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
32	REGIÓN HUASTECA	----	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00	0.05	0.03	0.05	0.02	0.03	0.00	0.02	0.02

Cuadro 12. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de temperatura mínima de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
1	Veinte de Noviembre	24137	0.08	0.08	0.09	0.05	0.03	0.06	0.04	0.05	0.08	0.11	0.04	0.06	0.07
2	Agua Buena	24001	0.07	0.05	0.00	0.16	-0.03	0.00	0.00	0.17	0.25	0.00	0.00	-0.08	0.05
3	Altamira	24002	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	-0.03	-0.03	0.00
4	Aquismón	24003	0.07	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.06	0.00	0.05	0.04
5	Ballesmí	24005	0.00	0.00	-0.04	-0.03	-0.08	-0.04	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	-0.01
6	Chapulhuacanito	24122	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.04	0.00	0.00	0.03
7	Damián Carmona	24014	0.06	0.09	0.11	0.04	0.00	0.00	0.04	0.01	0.09	0.12	0.04	0.07	0.07
8	Ébano	24015	0.04	0.04	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.03	0.06	0.02
9	El Coco	24017	0.02	0.06	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	0.02
10	El Fiscal	24020	0.00	0.03	-0.05	-0.04	-0.08	-0.04	-0.03	-0.03	0.00	0.00	-0.05	0.00	-0.02
11	El Peñón	24107	0.00	0.04	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Temperatura Mínima (°C/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												(°C/año)
12	El Tigre	24028	0.03	0.08	0.07	0.04	0.00	0.04	0.05	0.05	0.08	0.03	0.00	0.02	0.05
13	Gallinas	24031	0.04	0.04	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.10	0.09	0.03	0.02	0.04
14	La Gloria	24133	0.04	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.06	0.03	0.00	0.00	0.02
15	Las Adjuntas	24036	0.03	0.03	-0.02	-0.04	-0.07	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.02	-0.03	0.00	-0.01
16	Requetemu	24026	0.06	0.08	0.04	0.00	-0.02	0.01	0.02	0.03	0.07	0.05	0.03	0.06	0.04
17	San Dieguito	24064	0.03	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.06	0.03	0.06	0.03
18	San Martín Chalchicuautla	24009	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	-0.03	0.00	0.01
19	San Vicente Tancuayalab	24113	0.05	0.05	0.00	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01
20	Santa Cruz	24072	0.07	0.06	0.06	0.03	0.00	0.05	0.05	0.06	0.11	0.07	0.03	0.03	0.05
21	Santa Elena	24149	0.08	0.05	0.11	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	0.00	0.04	0.04
22	Tamapazt	24082	0.00	0.07	-0.02	0.02	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.01
23	Tancuilín	24084	0.05	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.00	0.05	0.03
24	Tanlajás	24087	0.06	0.06	0.02	0.05	-0.06	0.00	0.03	0.02	0.03	0.03	0.06	0.02	0.03
25	Tanlú	24136	0.06	0.09	0.10	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.03	0.05	0.06	0.10	0.05	0.04
26	Tanquián	24085	0.06	0.08	0.02	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.00	0.03	0.02
27	Tantizohuiche	24088	0.04	0.00	0.02	0.00	-0.05	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00
28	Temamatla	24091	0.03	0.00	0.00	-0.03	-0.06	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.02	-0.05	0.03	-0.01
29	Tierra Blanca	24092	0.03	0.00	0.00	0.00	-0.05	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.03	0.06	0.02
30	Tlamaya	24125	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.01
31	Xilitla	24105	0.04	0.07	0.03	0.02	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	0.03	-0.03	0.01	0.06	0.02
32	REGIÓN HUASTECA	----	0.04	0.05	0.03	0.01	-0.02	0.00	0.02	0.02	0.06	0.04	0.01	0.02	0.02

Cuadro 13. Resultados de Mann-Kendall y magnitud de cambio de precipitación de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												
1	Veinte de Noviembre	24137	0.06	0.03	0.18	0.08	-0.27	-0.01	-2.49	0.14	-0.34	3.15	0.20	-0.30	-0.64
2	Agua Buena	24001	-0.12	-0.06	-0.16	0.14	-1.05	1.00	-2.11	-1.55	-0.49	-0.34	0.16	-0.41	-8.07
3	Altamira	24002	-0.14	-0.22	0.40	0.37	-0.43	-0.45	-1.32	-0.26	-0.19	3.91	0.18	-0.77	1.61
4	Aquismón	24003	-0.07	0.00	-0.03	-0.06	-0.31	-1.15	-0.37	-1.25	-1.61	-0.17	-0.35	-0.30	-6.61
5	Ballesmí	24005	0.02	-0.46	0.35	-0.14	-1.39	-0.04	-1.17	-0.32	-0.52	2.60	0.18	-1.07	-1.08
6	Chapulhuacanito	24122	-0.28	-0.29	-0.24	-0.68	-0.80	-2.08	-2.03	-2.09	-0.50	1.77	-0.43	-0.84	-8.52
7	Damián Carmona	24014	-0.08	-0.24	-0.08	-0.06	-1.50	1.20	-4.40	-1.27	1.47	1.29	0.15	-0.38	-6.13
8	Ébano	24015	0.03	-0.09	0.24	-0.06	-0.23	0.47	-1.20	-0.57	-0.17	0.93	0.08	-0.25	-0.15
9	El Coco	24017	-0.10	-0.14	0.30	0.00	-0.33	1.99	-0.13	-0.07	-0.39	1.01	-0.01	-0.31	3.20
10	El Fiscal	24020	-0.13	-0.09	0.22	0.00	-1.22	-0.34	-2.12	-0.49	-0.19	0.90	-0.05	-0.33	-1.91
11	El Peñón	24107	0.10	0.00	0.41	0.00	-1.16	-0.35	-3.09	-1.57	-3.31	0.02	0.03	-0.20	-8.85
12	El Tigre	24028	0.00	-0.01	0.16	0.00	-0.62	1.15	-1.62	-1.14	-1.32	1.10	0.12	-0.18	-1.03
13	Gallinas	24031	-0.15	-0.03	-0.08	0.13	-1.31	0.33	-1.91	-0.76	-0.51	2.32	0.03	-0.36	-4.84
14	La Gloria	24133	0.02	-0.15	0.46	0.00	-1.67	1.33	-0.46	0.16	-0.84	1.51	0.22	-0.43	1.05
15	Las Adjuntas	24036	-0.18	-0.16	0.27	-0.07	-0.72	1.05	-1.98	-0.45	-0.39	1.12	0.05	-0.44	-1.54
16	Requetemu	24026	-0.42	-0.32	0.34	0.49	-0.22	-2.32	-0.83	-1.74	-0.39	2.55	-0.65	-0.77	-3.30
17	San Dieguito	24064	0.00	0.00	0.19	0.00	-0.17	0.11	-2.24	-0.86	2.06	2.20	0.26	-0.28	-0.35
18	San Martín Chalchicuautla	24009	-0.10	0.02	0.21	-0.33	-1.25	0.09	-1.08	1.69	-0.22	1.43	-0.04	-0.47	-0.11
19	San Vicente Tancuayalab	24113	-0.20	-0.31	0.05	-0.20	-1.18	0.19	-0.90	-0.97	-0.89	1.20	0.17	-0.55	-3.81

N°	Nombre	Clave	Resultados Mann-Kendall de Precipitación (mm/año)												
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
			(°C/mes)												
20	Santa Cruz	24072	0.12	-0.26	0.70	0.06	-0.63	-0.19	-0.88	1.14	0.20	1.99	-0.56	-0.50	2.01
21	Santa Elena	24149	-0.06	-0.38	0.00	-0.76	-0.73	0.40	-1.10	0.38	-0.17	0.86	0.13	-0.68	-0.05
22	Tamapazt	24082	-0.43	-0.29	0.19	-0.85	-1.36	-1.58	-2.25	-1.91	-1.43	4.77	-0.11	-1.09	-4.64
23	Tancuilín	24084	-0.44	-0.32	0.00	-0.29	-0.63	-0.69	-2.07	-3.13	-3.95	2.07	-0.54	-1.09	-10.46
24	Tanlajás	24087	-0.23	0.09	0.59	-0.11	-0.55	0.12	1.66	-0.29	-1.46	1.47	-0.06	-0.58	2.07
25	Tanlú	24136	-0.29	-0.06	0.15	-0.07	-0.74	0.03	-0.49	-0.34	-1.67	3.27	0.06	-0.26	-0.66
26	Tanquián	24085	-0.30	-0.34	0.22	-0.23	-0.87	0.05	-1.17	-0.49	-0.88	1.19	0.15	-0.94	-2.64
27	Tantizohuiche	24088	-0.01	-0.24	0.50	-0.29	-1.88	0.32	-1.77	0.46	-0.19	0.75	0.02	-0.58	-2.84
28	Temamatla	24091	-0.30	0.06	-0.28	-0.73	-1.37	-1.38	-1.46	-2.38	-0.49	1.76	-0.33	-0.78	-7.39
29	Tierra Blanca	24092	-0.17	0.11	0.17	-0.23	-1.01	-1.55	-1.54	-3.47	-1.34	2.37	0.27	-0.35	-7.48
30	Tlamaya	24125	-0.51	0.17	0.36	-0.42	1.32	-1.33	-1.80	-1.86	-0.38	2.61	-0.83	-0.90	1.55
31	Xilitla	24105	-0.42	-0.09	0.00	-0.90	-0.34	-2.74	-4.03	-0.66	-2.78	2.70	-0.08	-0.56	-13.26
32	REGIÓN HUASTECA	----	-0.19	-0.18	0.25	-0.32	-0.84	-0.31	-1.49	-1.08	-0.40	1.72	0.00	-0.53	-2.82

2.1.4.3 Prueba de Pettit

Pettit (1979) desarrolló una prueba no paramétrica que es capaz de localizar el período (mes o año) donde es probable una ruptura. La hipótesis nula es que los datos son independientes, cantidades aleatorias idénticamente distribuidas, y la alternativa es que esté presente un cambio gradual en la media. La estadística de la prueba está relacionada con la estadística de Mann-Whitney.

Este análisis es la prueba de rango no paramétrica que puede revelar el punto de ruptura (mes o año) en un dato continuo (Agha, *et al.*, 2017). La hipótesis nula de esta prueba es que los datos son independientes y se distribuyen al azar. Esto significa que los datos siguen la misma distribución. A continuación, se presenta una breve descripción de la metodología:

1. Las presentaciones (X) se clasifican de 1 a N (i.e. X1, X2... XN).

2. El valor de V_i , N se estima a partir de:

$$V_i = N + 1 - 2R_i$$

$i=1, 2, 3, \dots, N$

donde R_i es el rango de X_i en la presenta de presentaciones de N.

3. El valor de U_i se estima a partir de:

$$U_i = U_{i-1} + V_i$$
$$U_1 = V_1$$

4. El valor de K_N es:

$$K_N = \max_{1 \leq i \leq -N} |U_i|$$

5. El valor de P_{OA} se estima de:

$$P_{OA} = 2e^{-\left(\frac{6K_N^2}{N^3+N^2}\right)}$$

La hipótesis nula se rechaza cuando el P_{OA} es menor que α , donde α es el nivel de significación estadística de la prueba.

La prueba de Pettit fue examinada en el programa de cómputo denominado XLSAT. mediante la siguiente metodología (Addinsoft, 2022):

1. Se acomodaron los datos por mes y año para cada una de las 51 estaciones y de los valores regionales.
2. Se ingresaron los registros, se ejecutó el programa y se obtuvieron los resultados.
3. Se rechazó o aceptó la hipótesis nula de que existe una ruptura.

A continuación, en el Cuadro 14. se presenta el resumen de la prueba Pettit, elaborado para precipitación anual de la Región Altiplano, y en el Cuadro 15. se presentan la interpretación estadística de la prueba Pettit en XLSAT.

Cuadro 14. Estadísticos descriptivos de precipitación de la RA (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020)

<i>Variable</i>	<i>Pre sen taci one s</i>	<i>Obs. sin datos perdid os</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Media</i>	<i>Desv. típica</i>
V. GPE	44	44	0.000	842.800	417.621	218.078
CEDRAL	44	44	139.861	1323.889	400.903	186.276
CHARCAS	44	44	119.000	1058.065	476.979	216.279
COYOTILLOS	44	44	176.700	640.800	389.258	106.732
EL CARMEN	44	44	120.500	760.281	387.946	158.124
HOSPITAL	44	44	160.952	799.000	411.365	143.552
GUANAME	44	44	65.100	1220.800	372.696	232.186
MAROMA	44	44	147.000	687.000	383.461	120.854
LA PRESA	44	44	319.229	973.276	537.380	158.735
MATEHUALA	44	44	300.254	891.800	537.413	144.386
REFORMA	44	44	143.281	677.153	387.492	136.997
SALINAS	44	44	67.240	1288.100	400.249	191.484
MOCTEZUMA	44	44	94.499	890.845	328.860	138.951
SN FRNCS	44	44	95.151	1798.596	505.859	415.614
TUZAL	44	44	158.458	1007.718	395.287	154.365
STO DOMINGO	44	44	127.827	928.708	398.012	160.672
SAUZ	44	44	115.000	829.700	364.980	148.859
V. RAMOS	44	44	68.153	788.686	304.406	159.607
VANEGAS	44	44	52.500	536.800	270.516	107.903
RA	44	44	214.260	632.164	406.725	103.680

Cuadro 15. Interpretación de la Prueba Pettit, (Elaboración propia con información de Addinsoft, 2022).

Interpretación de la prueba:
H0: Los datos son homogéneos
Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos
Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación $\alpha = 0.05$, no se puede rechazar la hipótesis nula H0.
Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación $\alpha = 0.05$, se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

Además, el programa de cómputo XLSAT, entrega gráficos donde se puede presentar el comportamiento de los registros analizados, cuando existe una ruptura, el gráfico se comporta de una forma donde se puede identificar el valor medio atípico y la fecha donde se registra el cambio como se puede presentar en la Figura 19. En esta figura, la precipitación media anual de 1975 a 1994 era de 479 mm/año, en 1995 registró una ruptura de este valor de precipitación registrando como nuevo valor medio de 1995 a 2018 de 335 mm/año. Con lo que se puede concluir variabilidad climática para la estación 24007 en el municipio de Cedral de la RA.

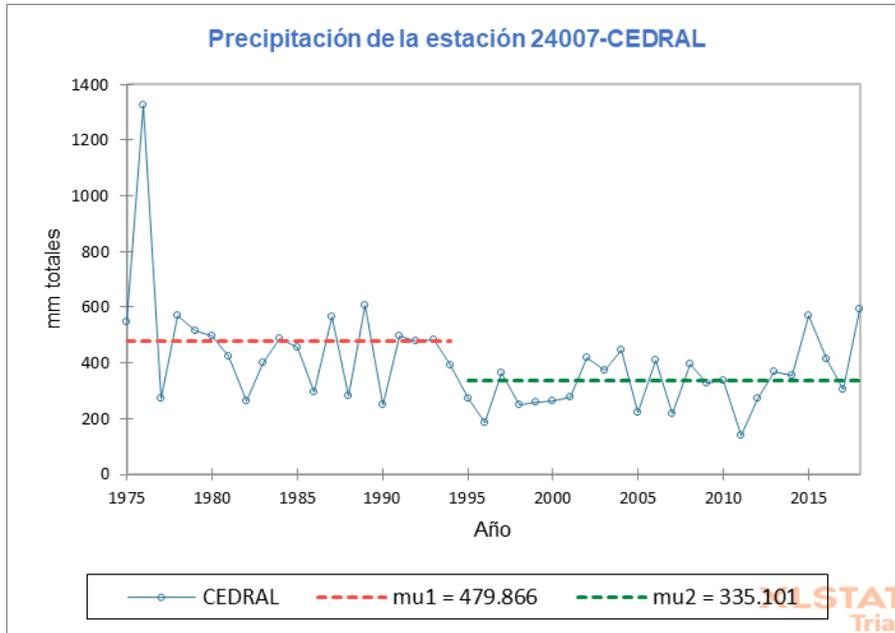


Figura 19. Prueba de Pettit para precipitación de la estación 24007 (Elaboración propia con información de Addinsoft, 2022).

A continuación, en los Cuadros 16 al 19 se presentan los resultados de la prueba Pettit, se ordenó esta información en cuadros para cada variable; los años en los que se presentan rupturas de incremento en color rojo y de decremento con color azul.

Cuadro 16. Resultados de la prueba Pettit, para precipitación (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Resultados de la Prueba Pettit de Precipitación (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	REGIÓN ALTIPLANO	----												1995	
1	Buena Vista	24181												2001	
2	Cedral	24007												1994	1994
3	Charcas	24158						1984						1992	
4	Coronado	24188												1995	
5	Coyotillos	24160							2001						
6	El Carmen	24162	1997												
7	El Hospital	24189												1995	
8	Guanamé	24150										2008			
9	La Maroma	24033									1997				
10	La Presa	24142									1995				
11	Matehuala	24040													
12	Reforma	24073													
13	Salinas	24148				1994			2001						
14	San Francisco II	24192													
15	San Francisco	24154	1992			1997	1992		1994	1998		1992			1995
16	San Juan Del Tuzal	24176				1998									
17	Santo Domingo	24077													
18	Sauz de Calera	24152									1995				2001
19	Villa de Ramos	24059													
20	Vanegas	24094									1997				
	REGIÓN HUASTECA	----						1979				1989		1996	
21	Veinte de Noviembre	24137										1996			
22	Agua Buena	24001													
23	Altamira	24002													
24	Aquismón	24003								1996				1996	1993
25	Ballescú	24005		1999										1996	
26	Chapulhuacanito	24122												1996	
27	Damián Carmona	24014													
28	Ébano	24015			2002										
29	El Coco	24017													
30	El Fiscal	24020													
31	El Peñón	24107													
32	El Tigre	24028													
33	Gallinas	24031										1996	1979		
34	La Gloria	24133													
35	Las Adjuntas	24036												1989	

Resultados de la Prueba Pettit de Precipitación (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
36	Requetemu	24026												1996	
37	San Dieguito	24064				1995		1983				1997			
38	San Martín Chalchicautla	24009													
39	San Vicente	24113					1993								
40	Santa Cruz	24072						1996							
41	Santa Elena	24149		1992						1984				1996	
42	Tamapazt	24082					1993					1989		1992	
43	Tancuilin	24084	1993											1996	
44	Tanlajás	24087													
45	Tanlú	24136					1994	2009				1987		1992	
46	Tanquián	24085												1997	
47	Tantizohuiche	24088					1995				2006				
48	Temamatla	24091		1996										1996	
49	Tierra Blanca	24092													
50	Tlamaya	24125												1994	
51	Xilitla	24105													

Cuadro 17. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Promedio (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Resultados de la Prueba Pettit de Temperatura Promedio (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	REGIÓN ALTIPLANO	----						1994	1991	1992	1997				
1	Buena Vista	24181	2005	1992	1998					1995				2004	2008
2	Cedral	24007					1986	1986	1986	1985	1984				1986
3	Charcas	24158	1997	1998	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997		1997
4	Coronado	24188													
5	Coyotillos	24160			2000	2000	2000	1999	2003	1999	1999	2005	2000	1987	2000
6	El Carmen	24162	2002	2003	2002		1988			1985		2002	2001		2002
7	El Hospital	24189									1999			1998	
8	Guanamé	24150													
9	La Maroma	24033		1992											1992
10	La Presa	24142	1988												1987
11	Matehuala	24040	1988				1987	1987	1986	1986	1986	1987	1985		1987
12	Reforma	24073		1992					1991	1991	1991				1992
13	Salinas	24148	1994		1985					2008					
14	San Francisco II	24192								1995	1994			1995	
15	San Francisco	24154	2001			2001	2000	1999	2001	2001	2001	2007			1986

Resultados de la Prueba Pettit de Temperatura Promedio (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
16	San Juan Del Tuzal	24176	1998	2000	1999	1999	1999	1997	1999	1997	1999	1999	1996	1998	1999
17	Santo Domingo	24077	1995			1997					1984		1998	1987	
18	Sauz de Calera	24152	1996		2004							2005	2004	2001	2005
19	Villa de Ramos	24059			1997	1997	1994	1996	1996	1994	1994	1997			1996
20	Vanegas	24094		1992	1996	1994	1997	1997	1995	1997	1994	1993	1991		1994
	REGIÓN HUASTECA	----	1988	1992						2001				1976	1993
21	Veinte de Noviembre	24137	1988	1989	1989	1989	1994	1996	1996	1996	1985	2003			1992
22	Agua Buena	24001													
23	Altamira	24002	1988	1996	1996			1994		1996	1994				1994
24	Aquismón	24003													1993
25	Ballesmí	24005					2003	1999							2001
26	Chapulhuacanito	24122	1988	1992						2003					1997
27	Damián Carmona	24014	1988	1989	1990			1994	1993	1993	1994	1992			1993
28	Ébano,	24015	1988	1993					1993	1996	1994	1993			1993
29	El Coco	24017													1993
30	El Fiscal	24020			2006	2006	2004	2005	2005	2005	2006	2005	2005	2004	2005
31	El Peñón	24107			2002	2002	2003	2002	2001	2001	2001				2001
32	El Tigre	24028	1996	1994	1996	1997	1994	1995	1995	1996	1996	2000	1993	1991	1996
33	Gallinas	24031	1988	1992				1994		1996	1994	2001			1992
34	La Gloria	24133	1988	1989							2007				1989
35	Las Adjuntas	24036					2004								
36	Requetemu	24026		1992						1996		2001			1993
37	San Dieguito	24064	1988	1992											1993
38	San Martín Chalchicuautla	24009								2008					
39	San Vicente	24113		1989											
40	Santa Cruz	24072	1988	1992											
41	Santa Elena	24149		1989	1994	1997				1996		1994			1993
42	Tamapazt	24082													
43	Tancuilin	24084		1992											
44	Tanlajás	24087	1988	1992											
45	Tanlú	24136													2006
46	Tanquián	24085		2002										2001	2002
47	Tantizohuiche	24088	1988	1992	1996					1996	1994	1993			1993
48	Temamatla	24091													1993
49	Tierra Blanca	24092					2007	2007	2006		2006		2001		2006
50	Tlamaya	24125													1993
51	Xilitla	24105	1988	1992								2000		2004	1993

Cuadro 18. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Máxima (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Máxima (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	REGIÓN ALTIPLANO	----		1992		1997	1994	1988	1991	1995		1992	1987	1992	1992
1	Buena Vista	24181	1996	1996	1996			1994	1995	1995	1995	1995	1995	1993	1995
2	Cedral	24007		1987	1987		1994	1986	1986	1986		1986	1985		1986
3	Charcas	24158	1998	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1997	1998	1997	1996	1997
4	Coronado	24188	1986	2007		1987	1987	1988	1986						1986
5	Coyotillos	24160													
6	El Carmen	24162			1989	1987	1993	1988	1991	1992	1990	1988		1991	1992
7	El Hospital	24189		1995											
8	Guanamé	24150				1992	1990	1991	1989	1991				1987	1991
9	La Maroma	24033	1998	1993	1993	1999	1994	1987	1988	1992		1998	2003	1993	1993
10	La Presa	24142	1987	1985		1993	1994	1987	1991	1995				1987	1987
11	Matehuala	24040								1983					
12	Reforma	24073		1992		1993	1993		1988	1991					1992
13	Salinas	24148										2009	2009		2010
14	San Francisco II	24192					1993						2006	1999	
15	San Francisco	24154						2011	2011	2011	2011				2011
16	San Juan Del Tuzal	24176		1995	1990	1997	1993		1997	1997	1998			1993	1996
17	Santo Domingo	24077				1999		2000			1987	1987	1987	1987	
18	Sauz de Calera	24152	2007	2006	2006		1991	2006	2005	2004	2005	2005	2005	2006	2006
19	Villa de Ramos	24059	1994	1995		1994	1994	1995	1993	1994	1994	1993	1994		1994
20	Vanegas	24094	1988	1992	1993	1994	1993	1988	1990	1990	1991			1987	1988
	REGIÓN HUASTECA	----						1993		1995					1994
21	Veinte de Noviembre	24137		2013				1988	2003						
22	Agua Buena	24001													
23	Altamira	24002	1996			1997				1995	1996	1995		1995	1995
24	Aquismón	24003								1996					
25	Ballesmí	24005		1998									1997		
26	Chapulhuacanito	24122													
27	Damián Carmona	24014						1987	2008	1993					1993
28	Ebano	24015						1987		1994	1994	1993		2006	1994
29	El Coco	24017				1999									
30	El Fiscal	24020									2007		2005		2005
31	El Peñon	24107		1998											1991
32	El Tigre	24028	1994		1995	1997	1994	1996	2000	1996	1996	1996	1996	2003	1996
33	Gallinas	24031								1993					
34	La Gloria	24133													
35	Las Adjuntas	24036											1998		

Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Máxima (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
36	Requetemu	24026												2003	
37	San Dieguito	24064													
38	San Martín Chalchicuautla	24009				2004					2003	2003			2003
39	San Vicente	24113													
40	Santa Cruz	24072			2006						2006	2000	1998		2000
41	Santa Elena	24149						1997	1993	1995	1995				
42	Tamapazt	24082						2009			1995	2005			
43	Tancuilin	24084										1985	1998		
44	Tanlajás	24087													
45	Tanlú	24136	2006	2008	2005	2006							2004	1998	2005
46	Tanquián	24085												2001	2002
47	Tantizohuiche	24088	1994	1995			1994	1987		1995	1997	1999	1994	1994	1994
48	Temamatla	24091								1995	1999	2003			1994
49	Tierra Blanca	24092		1998					2001	2006	2006		2006	1999	2000
50	Tlamaya	24125							1991	1996	1995				
51	Xilitla	24105					2009								

Cuadro 19. Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Mínima (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Mínima (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
	REGIÓN ALTIPLANO	----									1994				2000
1	Buena Vista	24181	2005	2004	2005		2003		1998			2003	2005	2004	2006
2	Cedral	24007												1994	
3	Charcas	24158					1997	1997	1997	2000	1997	1997			1997
4	Coronado	24188	2007	2006	2006	2006		2006	2006	2006	2006	2007	2006	2006	2006
5	Coyotillos	24160	1995				1986	2005	2005	2006			1994	1988	1986
6	El Carmen	24162	1995				2003								2003
7	El Hospital	24189												2002	
8	Guanamé	24150		2000											
9	La Maroma	24033												1996	
10	La Presa	24142	1988	1992					1990						
11	Matehuala	24040	1988	1989	1996	1984	1987	1987	1990	1985	1993	1986	1986		1987
12	Reforma	24073			1985						2001	2011			
13	Salinas	24148	1994	1993	1987	1986	1996						1994	1992	1994
14	San Francisco II	24192	1992	1995			2008							1994	
15	San Francisco	24154	2001		2001	1986	1986	2000	1998	2004	2000				

Resultados de la Prueba Pettit para Temperatura Mínima (año de ruptura)															
N°	Nombre	Clave	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
16	San Juan Del Tuzal	24176	1999	1999	1999	1999	1999		1999	1999	1999	1999		1998	
17	Santo Domingo	24077	1995	1999	1999		1982			1988	1989	2005	1998	1998	1999
18	Sauz de Calera	24152					2003								
19	Villa de Ramos	24059	1996	1999		1997	1995	1997	1996	1996	1997	1997	1992	1991	1997
20	Vanegas	24094	1996	2003				1997	2001	1997	1996				
	REGIÓN HUASTECA	----	1988						1999		2002				1996
21	Veinte de Noviembre	24137	1988	1990	1995			1996	1992	2000	1995				1992
22	Agua Buena	24001					1982								
23	Altamira	24002					2008								
24	Aquismón	24003	1988						1989	1991	2002				1989
25	Ballesmí	24005					2003	2002							
26	Chapulhuacanito	24122							2004	2008		2000			1997
27	Damián Carmona	24014	1988	1990	1995				1999	1999	2002	1992			1998
28	Ébano	24015													
29	El Coco	24017													1997
30	El Fiscal	24020					2005	2004	2004	1997					2005
31	El Peñón	24107							2011	2011					
32	El Tigre	24028						1993	1992	2000	2003				1997
33	Gallinas	24031						1993	1994		2002	2000			1989
34	La Gloria	24133				1984					2002				
35	Las Adjuntas	24036					2003	2002							
36	Requetemu	24026	1988	1990					1994	2005	1997				1993
37	San Dieguito	24064	1988	1990	1995				1999	1999	2002	1992			1998
38	San Martín Chalchicuautla	24009							2003	2005					
39	San Vicente	24113													
40	Santa Cruz	24072	1988	1999				1995	2000	2001	2002				1997
41	Santa Elena	24149			1996										1997
42	Tamapazt	24082													
43	Tancuilin	24084							2002	2002	2001				2002
44	Tanlajás	24087	1988						2004				1995		1995
45	Tanlú	24136	1987	1993		2002		1982					1992		1993
46	Tanquián	24085		2002							2002				2002
47	Tantizohuiche	24088													
48	Temamatla	24091					2007	1999							
49	Tierra Blanca	24092					2007								
50	Tlamaya	24125													
51	Xilitla	24105	1988	1989				2003							1989

2.2 Resultados de variabilidad climática por la época anual de la Región Altiplano y la Región Huasteca

Se sintetizaron los resultados obtenidos en relación con la época del año, las 4 épocas anuales se pueden observar en el Cuadro 20.

Cuadro 20. épocas anuales para describir los resultados de variabilidad climática (Elaboración propia).

Primavera	Verano	Otoño	Invierno
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> abril	<input type="checkbox"/> julio	<input type="checkbox"/> octubre	<input type="checkbox"/> enero
<input type="checkbox"/> mayo	<input type="checkbox"/> agosto	<input type="checkbox"/> noviembre	<input type="checkbox"/> febrero
<input type="checkbox"/> junio	<input type="checkbox"/> septiembre	<input type="checkbox"/> diciembre	<input type="checkbox"/> marzo

2.2.1 Resultados de variabilidad climática para primavera de la Región Altiplano y la Región Huasteca

Resultados para temperatura promedio en primavera

Para la época de primavera se presentaron cambios tanto locales como regionales en la variable de temperatura promedio en la **RA** se presentó tendencia al incremento en 6 de las 21 estaciones meteorológicas analizadas, con una magnitud de cambio que va desde los $0.020^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.094^{\circ}\text{C/año}$. Y de decremento en 3 estaciones con valores desde $-0.033^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.058^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit también evidenció rupturas para la época de primavera para 10 estaciones en las décadas de 1980, 1990 y 2000. En la **RH** al igual que en la **RA** se presentan cambios locales y regionales; se presentaron tendencias al cambio en 6 de las 31 estaciones analizadas de esta región húmeda del estado, con valores de magnitud de cambio que van desde $0.020^{\circ}\text{C/año}$ a $0.094^{\circ}\text{C/año}$ y tendencia de decremento en 3 estaciones con valores de -0.33 a $-0.058^{\circ}\text{C/año}$. Además de rupturas en 11 estaciones, en años de las décadas de 1980, 1990 y 2000.

Resultados para temperatura máxima en primavera

Para la variable de temperatura de máxima en los meses de primavera la **RA** presentó cambios locales y regionales. En 11 estaciones, más de la mitad de las 21 estaciones analizadas se presentó tendencia al incremento de temperatura máxima con valores desde $0.053^{\circ}\text{C/año}$ a $0.1571^{\circ}\text{C/año}$. Y en dos estaciones se presentó tendencia al decremento con valores de magnitud de cambio de $-0.050^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.082^{\circ}\text{C/año}$. Para los meses de primavera se presentan rupturas en 16 estaciones en las décadas de 1980, 1990 y 2000. La **RH** también presenta cambios locales y regionales de temperatura máxima en los meses de primavera, con tendencia al incremento en 9 estaciones con valores que van desde $0.048^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.157^{\circ}\text{C/año}$. Y la tendencia a decremento de temperatura máxima en la época de primavera en la **RH** solo se presentó en la estación 24136 en el mes de abril con

un valor de magnitud de cambio de -0.084 C/año. Las rupturas de temperatura máxima de los meses de primavera; se presentaron en 12 estaciones en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000.

Resultados para temperatura mínima en primavera

La variable de temperatura mínima en los meses de primavera de la **RA** presenta cambios locales. Se presentaron tendencias de incremento en 4 estaciones con valores de magnitud de cambio que van desde los 0.091 °C/año a 0.125 °C/año. También se encontraron 6 estaciones con tendencia al decremento de temperatura mínima en los meses de primavera con valores de -0.027 a -0.1 °C/año. Las rupturas de temperatura mínima de los meses de primavera; en la **RA** se presentaron en 14 estaciones en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. La variable de Temperatura Mínima en los meses de primavera de la **RH** presenta cambios locales y solo en los meses mayo y junio. Se presentan tendencias de incremento en 4 estaciones con valores de magnitud de cambio que van desde los 0.039 °C/año a 0.059 °C/año. También se encontraron 4 estaciones con tendencia al decremento de temperatura mínima en los meses de mayo y junio con valores de -0.025 °C/año a -0.083 °C/año. Las rupturas de temperatura mínima de los meses de primavera se presentaron en 14 estaciones en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000.

Resultados para precipitación en primavera

Para la variable de precipitación en la **RA**, en los meses de primavera, solo se presentaron tendencias al cambio en dos estaciones; en el primer caso con tendencia de incremento en la estación 24158 en el mes de junio, con una magnitud de cambio de 1.478 mm/año y en segundo caso la estación con clave 24148 con tendencia de decremento en el mes de abril con una magnitud de cambio de -0.278 mm/año. Para el caso de la prueba Pettit de la variable precipitación en los meses de primavera se distinguió solo una estación la 24158 en el municipio de Charcas, con una ruptura de incremento con fecha de junio de 1984, y 3 estaciones con rupturas de decremento de precipitación en los meses de abril y mayo, en las décadas de 1980 y 1990. Para la variable de precipitación en la **RH**, en estos mismos meses de primavera se presentaron cambios locales, con tendencia al incremento en solo una estación, con clave 24017 en el municipio de Tamuín al norte de la **RH**, con una magnitud de cambio de 1.987 mm/año, en el mes de junio. Y con tendencia al decremento se encuentran 7 estaciones solo en los meses de abril y junio, con valores de magnitud de cambio desde -0.757 mm/año a -1.883 mm/año. Las rupturas descritas por la prueba de Pettit en la **RH** en los meses de primavera se identificaron en 6 estaciones meteorológicas tendiendo al decremento.

2.2.2 Resultados de variabilidad climática para verano de la Región Altiplano y la Región Huasteca

Resultados para temperatura promedio en verano

Para la variable de temperatura promedio en los meses de verano en la **RA** se identificaron cambios locales y regionales, en 11 estaciones se encontró una tendencia al incremento con una magnitud de cambio desde $0.022^{\circ}\text{C/año}$ a $0.103^{\circ}\text{C/año}$ y en tres estaciones se presenta una tendencia al decremento con valores que van desde $-0.036^{\circ}\text{C/año}$ hasta $-0.127^{\circ}\text{C/año}$. En el análisis de rupturas también se encontraron las mismas 11 estaciones con una ruptura de incremento y 3 con una ruptura con valor de decremento, en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. El comportamiento de la temperatura promedio en los meses de verano en la **RH** es similar al de la RA, se diferenciaron cambios locales y regionales en 12 estaciones se presentó una tendencia al cambio de incremento con valores desde $0.015^{\circ}\text{C/año}$ a $0.111^{\circ}\text{C/año}$ y en 3 estaciones se presentan tendencias al decremento en temperatura promedio con valores de $-0.02^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.03^{\circ}\text{C/año}$. Y el análisis de rupturas de temperatura promedio en la época de verano en la **RH** presenta 12 estaciones con ruptura de incremento en las décadas de 1980 a 2000 y 3 estaciones con rupturas de decremento en la década de los 2000.

Resultados para temperatura máxima en verano

Para los registros de la variable temperatura máxima de la **RA** de los meses de verano es donde se presentan las mayores tendencias al cambio y mayores rupturas ya que, se encontraron cambios locales y regionales en 14 estaciones con tendencia al incremento con valores de magnitud de cambio que van desde 0.04°C/año a $0.182^{\circ}\text{C/año}$, para esta variable en los meses de julio, agosto y septiembre. No se presentaron cambios con tendencia al decremento. En la prueba de Pettit se encontraron rupturas de incremento en las mismas 14 estaciones que presentaron tendencia al cambio, en las décadas de 1980 y 1990, sin embargo, también se encontraron 3 estaciones con una ruptura de decremento en la década de los 2000. Con respecto a la **RH** en los meses de verano la temperatura máxima también presenta las mayores tendencias al cambio y rupturas de los valores medios, tanto local y regionalmente, se distinguen 15 estaciones con tendencia al cambio de incremento con valores desde $0.040^{\circ}\text{C/año}$ a $0.172^{\circ}\text{C/año}$ y en dos estaciones se presenta una tendencia a la baja, la primera con clave 24072 con un valor de $-0.04^{\circ}\text{C/año}$ y la segunda con clave 24092 con un valor negativo de $-0.08^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit en los meses de verano de temperatura máxima de la **RH** presenta rupturas de incremento en 12 estaciones en diferentes años de las décadas de 1980 a los 2000. Y en tres estaciones se presentan rupturas de decremento en la década de los 2000.

Resultados para temperatura mínima en verano

Por lo que se refiere a la variable de temperatura mínima de la **RA** en los meses de verano se distinguieron cambios locales y regionales en 6 estaciones se encontraron tendencias al incremento con magnitud de cambio que va desde los $0.056^{\circ}\text{C/año}$ a los $0.143^{\circ}\text{C/año}$. También 4 estaciones con tendencia de decremento con valores de $-0.034^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.148^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de rupturas de valores medios en la **RA** de temperatura mínima en los meses de verano registro 8 estaciones con valores positivos en los años de las décadas de

1980, 1990 y 2000. Y 4 estaciones con rupturas negativas en años de las décadas de 1990 y 2000. Ahora bien, en la **RH** en los valores de temperatura mínima de los meses de verano se presentaron cambios locales y regionales, la temperatura mínima está aumentando ya que se registraron 15 estaciones con tendencia al incremento con valores desde $0.014\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.119\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. Y solo una estación, con clave 24020 registro tendencia al decremento con un valor de $-0.031\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. En la prueba de rupturas de valores medios sobresalen 13 estaciones con valores positivos en las décadas de 1900 y 2000. No obstante, también se encuentran 3 estaciones con rupturas de temperatura mínima en la RH en los años 2000.

Resultados para precipitación en verano

Acerca de precipitación en la **RA** en los meses de verano se presentaron cambios regionales y locales, solo en el mes de septiembre en 5 estaciones se presentó una tendencia al incremento con valores de 0.65 mm/año a 1.409 mm/año . Y solo en una estación, la 24154 en los meses de julio y agosto se presenta una tendencia de decremento con valor de -1.45 mm/año . Las rupturas solo presentaron de manera local, en 6 estaciones con incremento en años de las décadas de 1990 y 2000. Y en la estación 24154 se presentó una ruptura de decremento en los valores de precipitación con fecha de julio de 1994 y agosto de 1998. En segundo lugar, la precipitación de la **RH** en los meses de verano presenta un comportamiento de cambio solo de manera local, en el mes de julio no se presentó ninguna anomalía, en los meses de agosto y septiembre se presentaron dos estaciones con tendencia al decremento, la primera con clave de 24003 con -1.61 mm/año de precipitación y la segunda con clave de 24107 con un decremento solo en el mes de agosto con -1.568 mm/año . Para la prueba de Pettit en la **RH** se tienen 3 estaciones con una ruptura, la primera con clave 24003 con una ruptura de decremento en el mes de agosto de 1993, la segunda también con ruptura de decremento, con clave de 24149 en el mes de septiembre de 1984 y la tercera con una ruptura de aumento en el mes de septiembre de 2006.

2.2.2 Resultados de variabilidad climática para otoño de la Región Altiplano y la Región Huasteca

Resultados para temperatura promedio en otoño

Los meses de otoño son octubre, noviembre y diciembre, la temperatura promedio de la **RA** en estos meses presenta un comportamiento de cambios locales y regionales en el análisis de Mann-Kendall, se presentaron tendencias al cambio de incremento en 5 estaciones con valores de $0.021\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, y de igual forma en 5 estaciones se presentan tendencias al cambio de decremento con valores de $-0.030\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta $-0.089\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. En la prueba de rupturas se presentan cambios solo de manera local para estos meses de otoño, con 6 estaciones con una ruptura de incremento en las décadas de 1980, 1990 y 2000, en 7 estaciones se presentaron rupturas de decremento en las mismas décadas. Por otra parte, en la **RH** en los meses de otoño de temperatura promedio se presentaron cambios locales y regionales, y solo se identificaron tendencias al cambio de incremento, en 11 estaciones con valores de magnitud de cambio de $0.03\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. Para la prueba de Pettit se presentaron anomalías locales y regionales para 10 estaciones con rupturas positivas;

presentes en las décadas de 1990 y 2000. Así como rupturas de decremento en 2 estaciones en la década de los 2000.

Resultados para temperatura máxima en otoño

En cuanto a la temperatura máxima de los meses de otoño de la **RA** se presentaron cambios locales en la prueba de Mann-Kendall en 8 estaciones con tendencia al incremento con valores de $0.059^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.130^{\circ}\text{C/año}$. En una estación se presenta tendencia al decremento, la estación con clave 24077 en los tres meses de otoño presenta decremento en la temperatura máxima con un valor medio de $-0.063^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit en los meses de otoño de la **RA** presenta anomalías locales y anuales en 11 estaciones se presentaron incrementos en los valores medios de temperatura máxima en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. Y en 3 estaciones se presentó un decremento en las mismas décadas. Así mismo en los meses de otoño de la **RH** de temperatura máxima se presentaron tendencias al cambio locales y regionales, en 11 estaciones se evidenció tendencia al incremento con valores de 0.03°C/año hasta 0.14°C/año . Y en 9 estaciones se identificó tendencia al decremento de temperatura máxima, con magnitudes de cambio que van desde los $-0.04^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $-0.13^{\circ}\text{C/año}$. En la prueba de Pettit de la **RH** para los meses de otoño se presentaron cambios locales, con 9 estaciones que presentan una ruptura de incremento en los años de las décadas de 1990 y 2000 también 6 estación de presencia de decremento en las mismas décadas.

Resultados para temperatura mínima en otoño

Para la variable de temperatura mínima de los meses de otoño en la **RA** se indicaron cambios solo de manera local, las tendencias al cambio de incremento se hicieron presente en 3 estaciones con valores de $0.071^{\circ}\text{C/año}$ a $0.159^{\circ}\text{C/año}$. Y en 7 estaciones se presentaron tendencias al decremento con valores de magnitud de cambio que van desde los $-0.055^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $-0.190^{\circ}\text{C/año}$. La prueba Pettit para los meses de otoño de la **RA** presenta cambios locales en 7 estaciones que presentan rupturas de los valores medios en los años de las décadas de 1990 y 2000, de igual forma se encontraron 7 estaciones con rupturas de decremento para las mismas fechas. Para los registros históricos de la **RH** en los meses de otoño de temperatura mínima está ocurriendo algo de que llama la atención, ya que solo se presentan cambios locales y son de incrementos de temperatura mínima, lo que infiere que está aumentando la temperatura mínima en estos meses, se distinguieron 12 estaciones con tendencia al incremento con valores de magnitud de cambio que va desde los $0.052^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.119^{\circ}\text{C/año}$. Y para la prueba de Pettit de igual forma solo se presentan cambios locales y de aumento de los valores medios con rupturas en 6 estaciones en fechas de octubre y noviembre de los años de los 1990 y 2000.

Resultados para precipitación en otoño

Ahora para la variable precipitación de los meses de otoño de la **RA** solo se presentan cambios de decremento de precipitación; locales y regionales en los meses de octubre y diciembre, pero mayormente en el mes de diciembre. En 7 estaciones para el mes de diciembre se presentó una tendencia al decremento con valores de magnitud de cambio de -0.218mm/año hasta -0.396mm/año , una clara presentación de disminución de precipitación está ocurriendo en este mes del año. Y para 1 estación, la estación con clave 24154, en el mes de octubre se presenta una tendencia al decremento con un valor de magnitud de cambio

de -0.668 mm/año. Las rupturas de los valores medios se presentan solo en los meses de octubre y diciembre de manera local y regional, en 6 estaciones se presenta una ruptura de decremento en las décadas de 1990 y 2000, y en la estación con clave 24150 en la fecha de octubre de 2008 se presentó una ruptura de incremento en la precipitación. En la **RH** se presenta algo análogo en el comportamiento de la variable de precipitación para los meses de otoño con relación a Lo que ocurre en **RA**, se presentaron tendencia al cambio tanto de incremento como de decremento, solo para el mes de octubre se presentan 5 estaciones con tendencia al incremento con valores de magnitud de cambio que van desde los 2.195 mm/año hasta los 4.768 mm/año. Así como solo para el mes de diciembre se presenta tendencias al cambio de decremento en 12 estaciones con valores de magnitud de cambio que van desde los -0.583 mm/año hasta los 1.070 mm/año de precipitación. La prueba de Pettit de la **RH** destaca cambios locales y regionales en los tres meses de otoño, en 6 estaciones se presentaron rupturas de incremento de los valores medios en las décadas de 1980 y 1990, y en 12 estaciones se presentaron rupturas de decremento todos en los años de la década de 1990.

2.2.2 Resultados de variabilidad climática para invierno de la Región Altiplano y la Región Huasteca

Resultados para temperatura promedio en invierno

Con relación a temperatura promedio de los meses de invierno de la **RA**, se indicaron solo cambios locales, en 6 estaciones se presentó tendencia al cambio de incremento con magnitud de cambio desde $0.044^{\circ}\text{C/año}$ hasta 0.1°C/año . Y en 4 estaciones se presentan tendencias al cambio de decremento con valores de magnitud de cambio de $-0.033^{\circ}\text{C/año}$ hasta $-0.088^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit presenta también solo cambios locales, con 9 estaciones con rupturas de incremento en las décadas de 1980, 1990 y 2000, y por otro lado 6 estaciones con rupturas de decremento en décadas de 1990 y 2000. Para los registros analizados de la temperatura promedio de la **RH** es donde se presentan las mayores tendencias al cambio y mayores rupturas: ya que, en los meses de invierno a diferencia de la **RA**, si se presentan cambios locales y regionales todos ellos de tendencia al incremento con excepción de una estación; se encuentran 19 estaciones con tendencia al cambio de incremento con valores de magnitud de cambio que van desde los $0.029^{\circ}\text{C/año}$ a $0.112^{\circ}\text{C/año}$. Y la estación con clave 24107 presentó una tendencia al cambio de decremento en el mes de marzo con un valor de $-0.054^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit de la **RH** presenta cambios locales y regionales con 18 estaciones con rupturas en los valores medios con incremento en las décadas de 1980, 1990 y 2000, y también se presentaron dos estaciones con rupturas negativas, la primera la 24020 con una ruptura de decremento con fecha de marzo de 2006 y la segunda con clave de 24107 que presentó una ruptura de decremento en marzo de 2002.

Resultados para temperatura máxima en invierno

La variable de temperatura máxima presenta tendencia al cambio de incremento también en los meses de invierno de la **RA**, se encontraron cambios locales como regionales, todos de incremento excepto en 1 estación, 11 estaciones presentan tendencia al cambio de incremento con valores de magnitud de cambio desde $0.048^{\circ}\text{C/año}$ hasta 0.11°C/año , la estación que presentó una tendencia al decremento fue la 24152 con una magnitud de cambio de $-0.077^{\circ}\text{C/año}$. La prueba de Pettit presenta anomalías locales y regionales, en 12 estaciones con una ruptura de incremento en los años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. Igualmente, la estación con clave 24152 presentó una ruptura de decremento en los 3 meses de invierno con fecha de enero de 2007, febrero de 2006 y marzo de 2006. En cambio, en la **RH** solo se presentan cambios locales en las tendencias de cambio, con incremento solo en los meses de enero y febrero; en 3 estaciones con magnitud de cambio desde los $0.063^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.127^{\circ}\text{C/año}$. Y se presenta tendencia al decremento en 3 estaciones durante los tres meses de invierno de la **RH** con valores de $-0.08^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.12^{\circ}\text{C/año}$. Por otro lado, se presentan rupturas en los valores medios de incremento en 3 estaciones con fecha de 1994, 1995 y 1996. Y en 6 estaciones se presentó una ruptura de decremento en las décadas de 1990 y 2000.

Resultados para temperatura mínima en invierno

Para la variable de temperatura mínima de la **RA** en los meses de invierno se encontraron tendencias al cambio locales y regionales en 7 estaciones de presentó una tendencia de incremento con valores de magnitud de cambio que van desde los $0.037^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.188^{\circ}\text{C/año}$, y en 6 estaciones está ocurriendo una tendencia al cambio de decremento con valores de $-0.032^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.138^{\circ}\text{C/año}$. En la prueba de rupturas se indicaron solo cambios locales, en 8 estaciones rupturas en el valor medio con incrementos, en las décadas de 1980, 1990 y 2000. Y en 7 estaciones se presentaron rupturas de decremento en las décadas de 1990 y 2000. Además, se hace evidente el incremento en la variable de temperatura mínima, para la **RH** en los meses de invierno, ya que se encontraron cambios locales y regionales solo de incremento en 15 estaciones con valores de magnitud de cambio de $0.051^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.111^{\circ}\text{C/año}$. Para la prueba de Pettit en la **RH**, ocurre lo mismo se presentan cambios locales y regionales solo de aumento en los valores medios de 10 estaciones para las décadas de 1980, 1990 y 2000.

Resultados para precipitación en invierno

Y para concluir estos resultados por época anual, se mencionan los resultados de precipitación en los meses de invierno, para la **RA** aún no se presentan tendencias al cambio, pero si se presentaron rupturas de los valores medios en 2 estaciones, en la primera con clave de 24162 en el municipio de Matehuala se presentó una ruptura de incremento en enero de 1997, y en la estación 24154 en el municipio de Santo Domingo se presentó una ruptura de decremento en enero de 1992. En la **RH** se encontraron cambios solo locales, y solo en los meses de febrero y marzo, para el mes de febrero se mostraron 2 estaciones con tendencia al cambio de decremento con valores -0.31mm/año y -0.38mm/año . Y también en 2 estaciones se presentaron tendencias al incremento estas en el mes de marzo con valores de 0.237mm/año y 0.463mm/año . Las rupturas que se presentan en la **RH** son solo locales, en la estación 24015 en el municipio de Ébano se presentó una ruptura de decremento en la

fecha de marzo de 2002. Y en 10 estaciones se presentaron rupturas de incremento en los meses de enero y febrero de la década de los 90'.

En las Figuras 20 a la 35, se presentan mapas donde se representaron los resultados de las pruebas de Mann-Kendall, de Sen, y de Pettit. Para las cuatro variables atmosféricas analizadas, para la Región Altiplano y Región Huasteca. Se exhiben los resultados anuales y además resultados mensuales de los meses en los que más se encontraron cambios de cada variable analizada. A continuación, se enlistan las principales características de los mapas de resultados:

- I. La prueba de Mann-Kendall fue delimitada con base en un formato tipo ráster, de una interpolación IDW de los valores de la prueba de Z, se utilizó una rampa de colores; en rojo cuando había incrementos y en azul decrementos en temperatura ya sea promedio, máxima o mínima.
- II. La prueba de Pettit se presenta en el mapa con forma de triángulos equiláteros (en caso de existir), de diferentes colores dependiendo el año de la década en la que se registró una ruptura. Un triángulo equilátero invertido a 180° significa una ruptura con valor de decremento.
- III. La prueba de Sen, indico la magnitud de cambio a la que ocurren las tendencias al cambio. Fue representada en el mapa por medio de contornos, con color negro y se indicó el valor unitario de esta.

En la Figura 20. se representaron los resultados de temperatura promedio anual de la RA para el periodo de 1975-2018. se evidenció variabilidad climática ya que se encontraron tendencias de incremento en la parte norte, centro y suroeste de la región. En los municipios de Vanegas, Cedral, Catorce, Villa de la Paz, Matehuala, Villa de Guadalupe, Charcas, Venado, Villa de Arista y Salinas; se identificó por los menos una estación con tendencia al incremento de temperatura promedio anual. El valor de mayor tendencia de incremento se presentó en la estación 24158 en el municipio de Charcas con 0.065 mm/año. Para el caso del valor menos negativo de decremento se registró en la estación 24154 en el municipio de Moctezuma, es de mencionarse que ambos casos se presentan en la parte centro de la RA.

En la Figura 21. se presentan las tendencias al cambio de temperatura máxima anual de la RA, para esta variable se presentaron cambios tanto local como regionalmente y solo estadísticamente significativos con tasa de incremento. En 13 estaciones pertenecientes a los municipios de Cedral, Vanegas, Catorce, Charcas, Moctezuma, Moctezuma, Villa de Guadalupe y Matehuala se presentaron incrementos con valores de 0.031°C/año a 0.125°C/año . Para estas mismas 13 estaciones se presenta una ruptura con incremento en los valores medios en las décadas de 1980, 1990 y 2000, también hay que mencionar que localmente en 2 estaciones con clave 24154 y 24152 respectivamente se presentó una ruptura de decremento en los años de 2006 y 2011, lo que sugiere variabilidad climática.

En la Figura 22. se presentan las tendencias y rupturas de la temperatura mínima anual en la RA, se presentan las tendencias al cambio solo de manera local en dos estaciones; se presentó una tendencia al incremento en los municipios de Charcas y Matehuala con valores de 0.067°C/año y 0.074°C/año . Y en 4 estaciones se presentó una tendencia al decremento

significativa, en los municipios de Salinas, Charcas, Matehuala y Moctezuma con valores que van desde los $-0.052^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $-0.083^{\circ}\text{C/año}$. En cuanto a las rupturas anuales de temperatura mínima estas se exhiben de manera local y regional; en 5 estaciones con valores de incremento en años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. Y en 4 estaciones con valores de decremento en las décadas de 1990 y 2000.

En la Figura 23. se presentan los resultados de precipitación anual de la RA. Los cambios estadísticamente significativos solo se hicieron comprobables de manera local en dos estaciones: la primera en el municipio de Cedral, la estación 24007 presenta una tendencia al cambio de decremento con un valor de -3.489 milímetros de precipitación por año. Y la segunda en el municipio de Charcas la estación 24158 presenta una tendencia al cambio de incremento con un valor de 5.47 mm/año. En el mapa se presentan tres triángulos que denotan la presencia de rupturas, en la estación 24007 al norte de la RA en Cedral se presentó una ruptura en 1994, al oeste en el municipio de Santo Domingo se presenta un triángulo de color café claro, que describe una ruptura de decremento en el año de 1995, y ya en la parte suroeste un triángulo café oscuro en el municipio de Villa de Ramos en la estación 24152 que indica una ruptura de incremento registrada en el año de 2001.

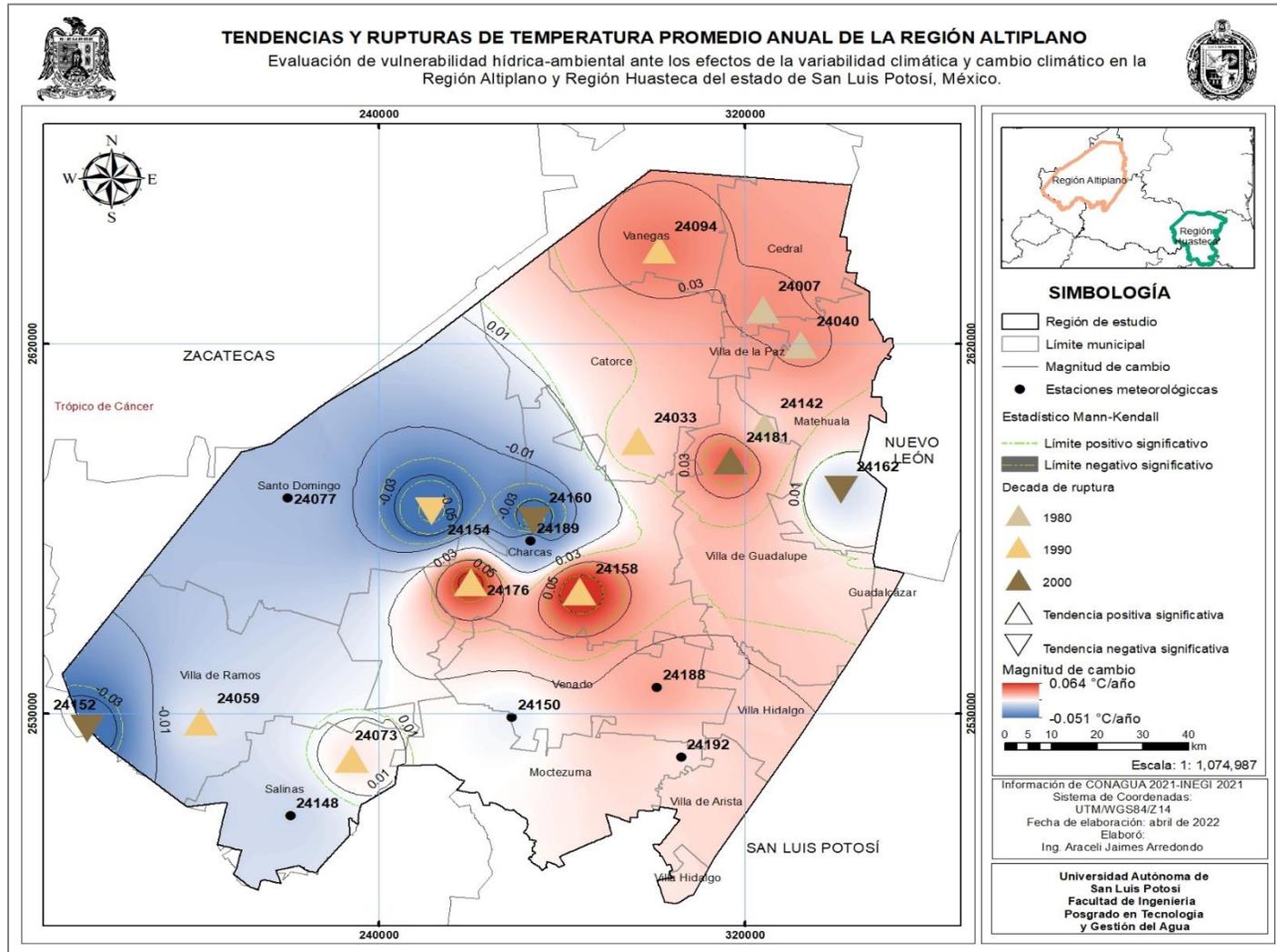


Figura 20. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

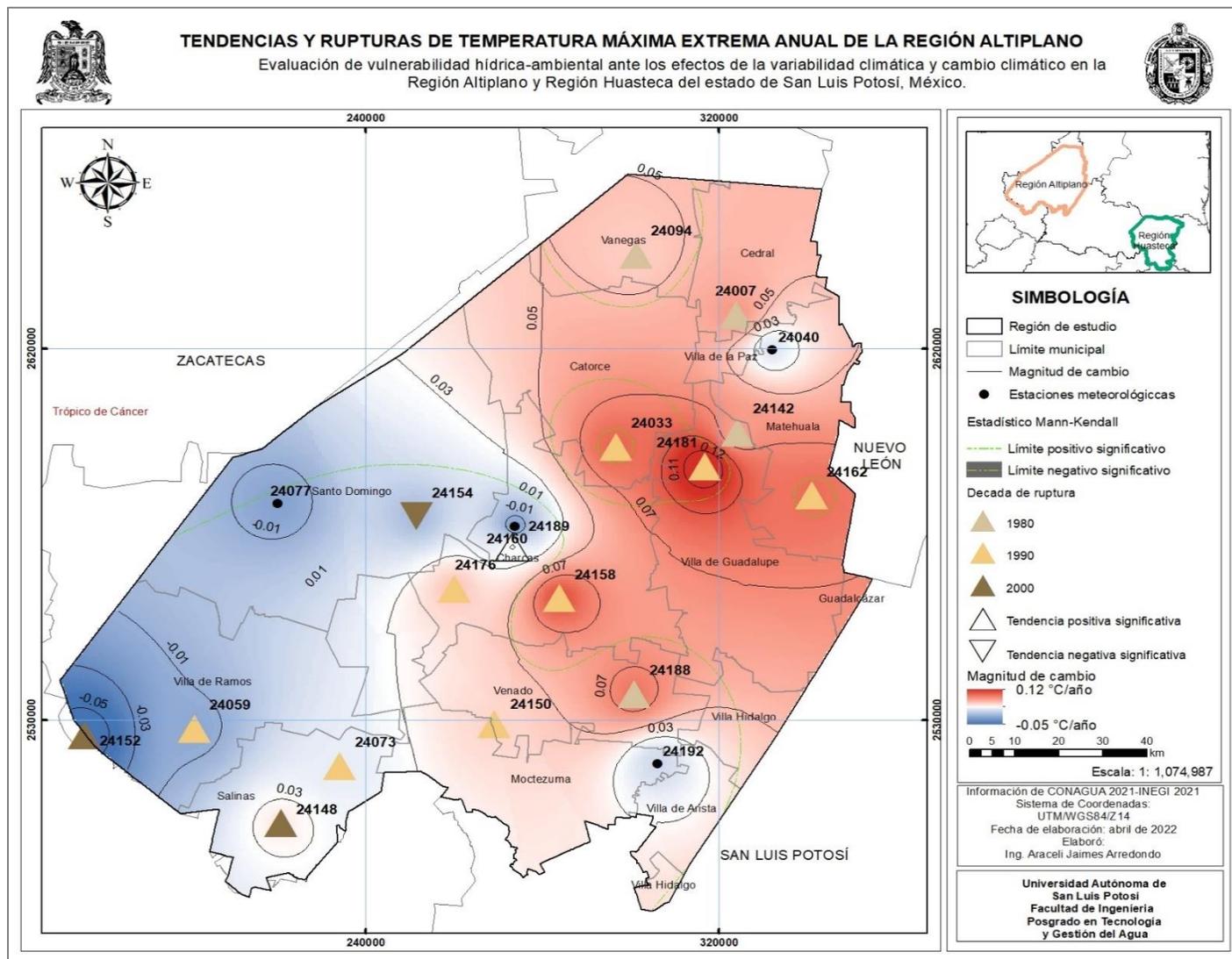


Figura 21. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

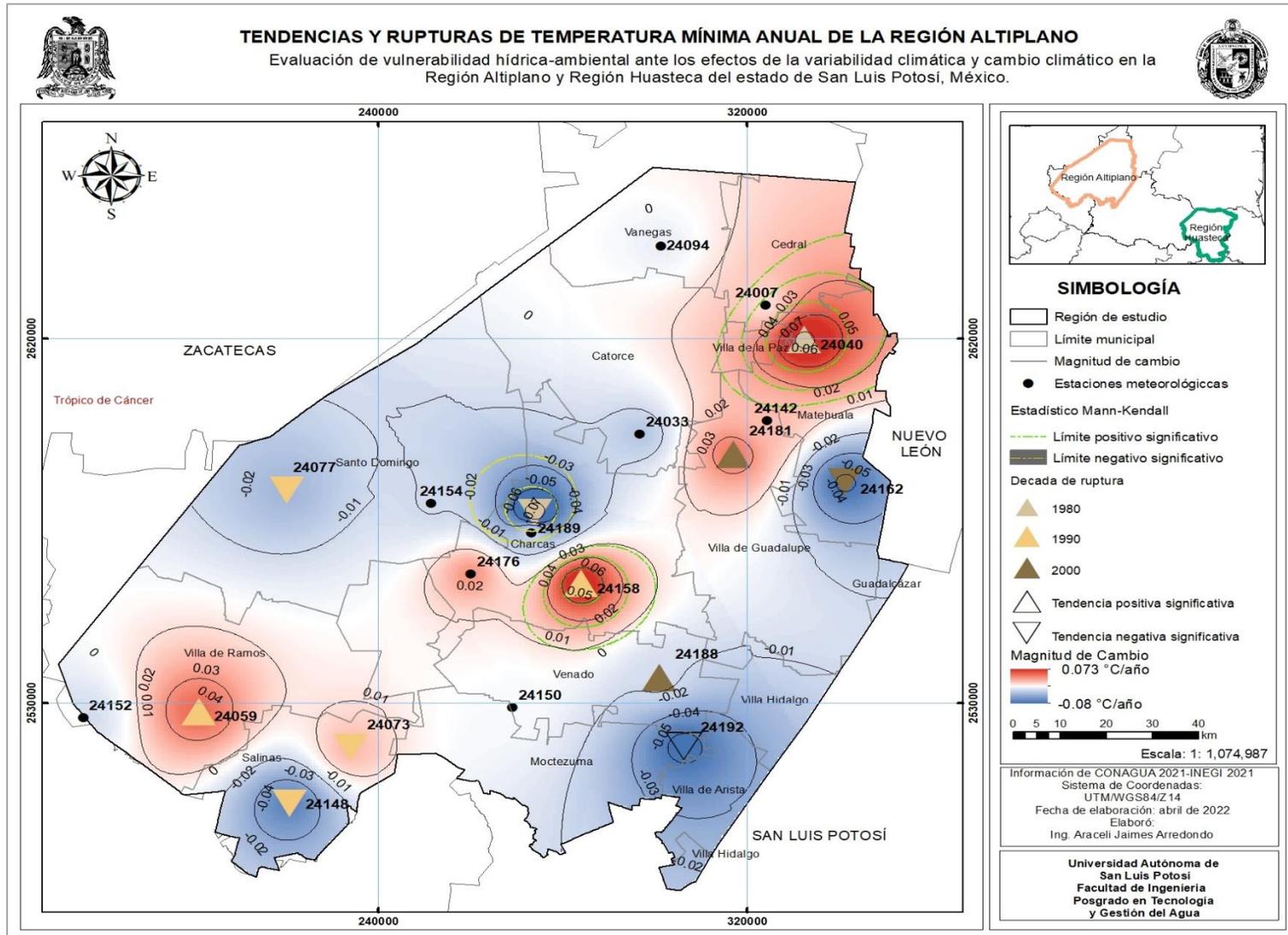


Figura 22. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

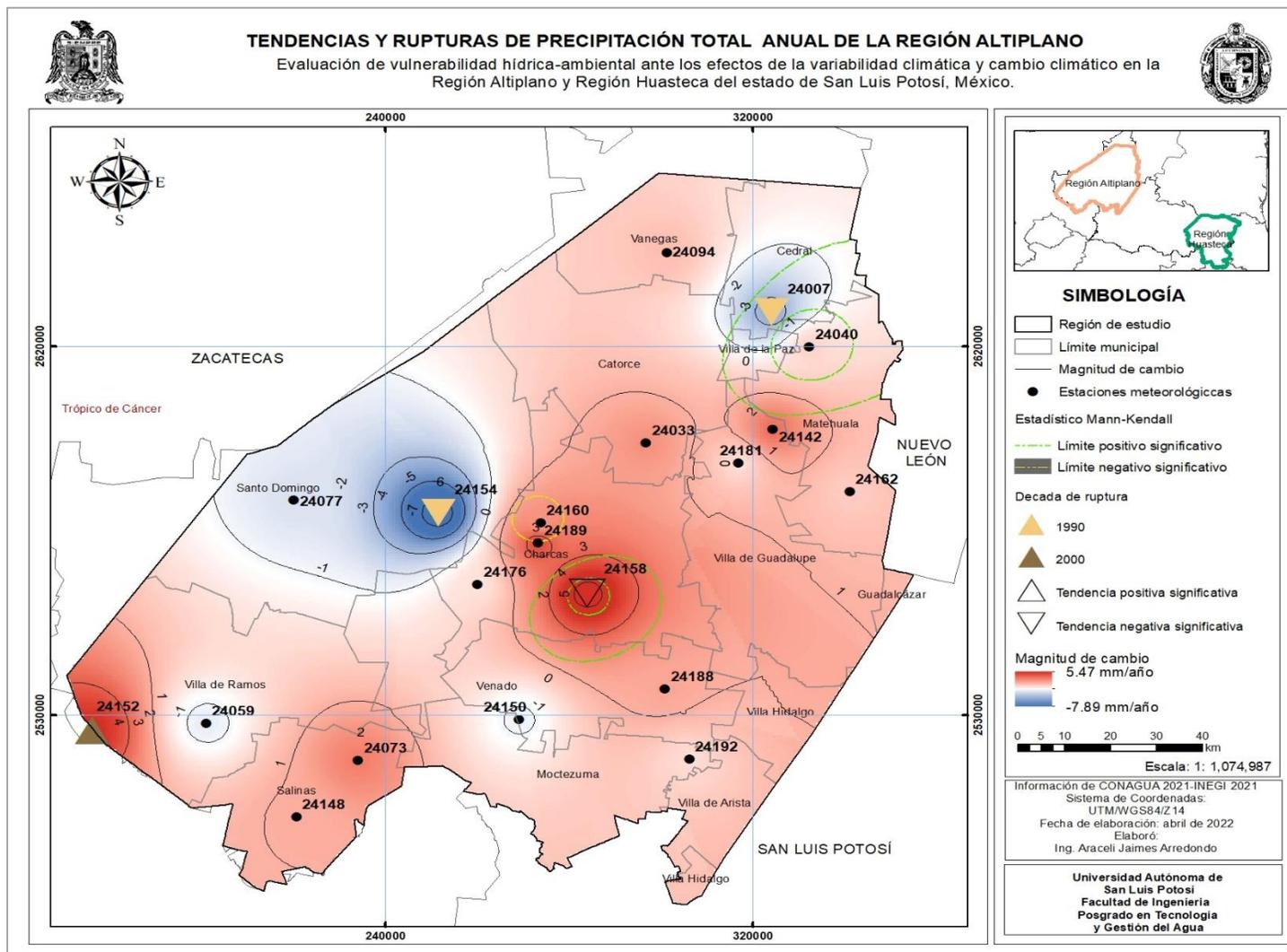


Figura 23. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación anual de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

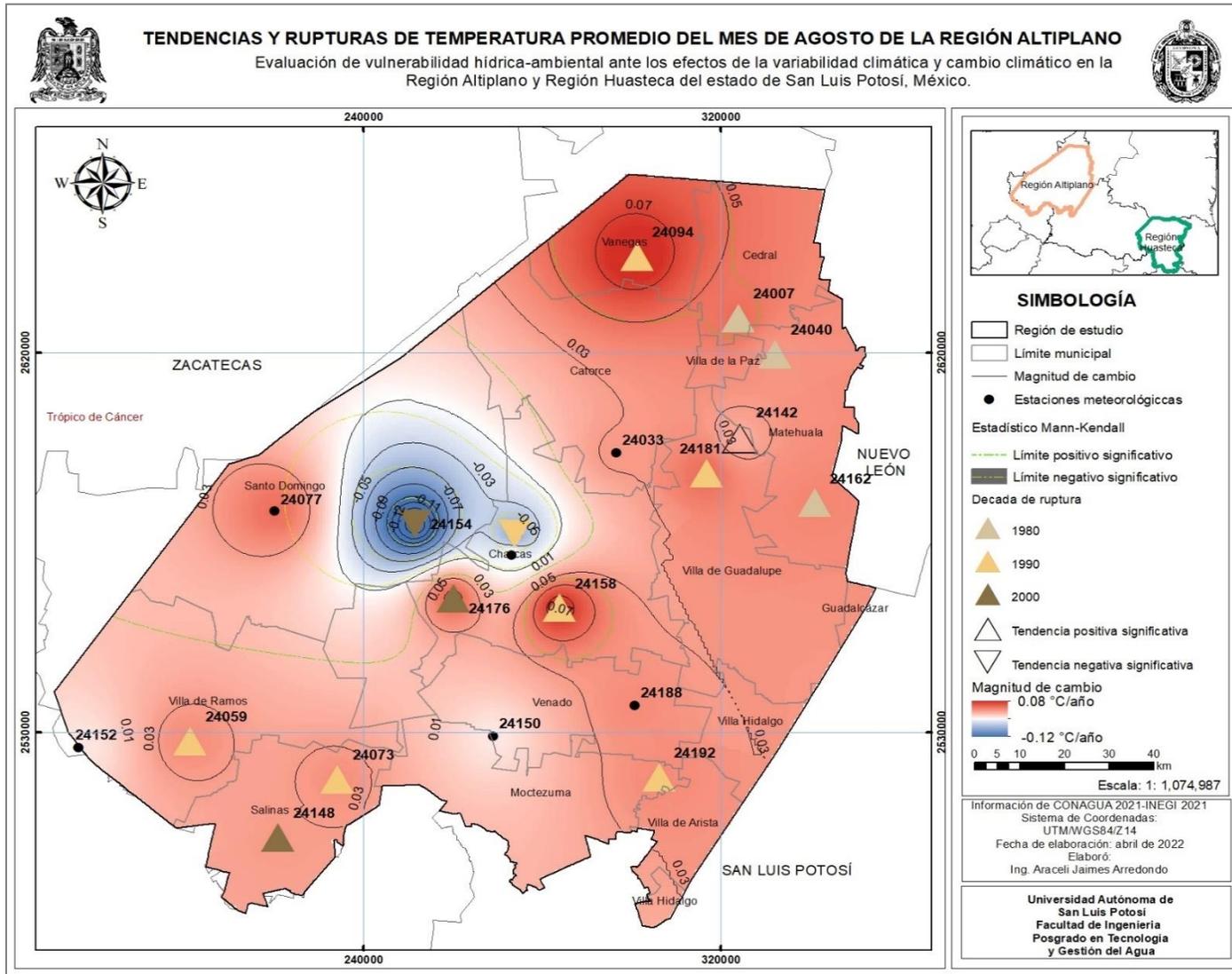


Figura 24. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio del mes de agosto de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

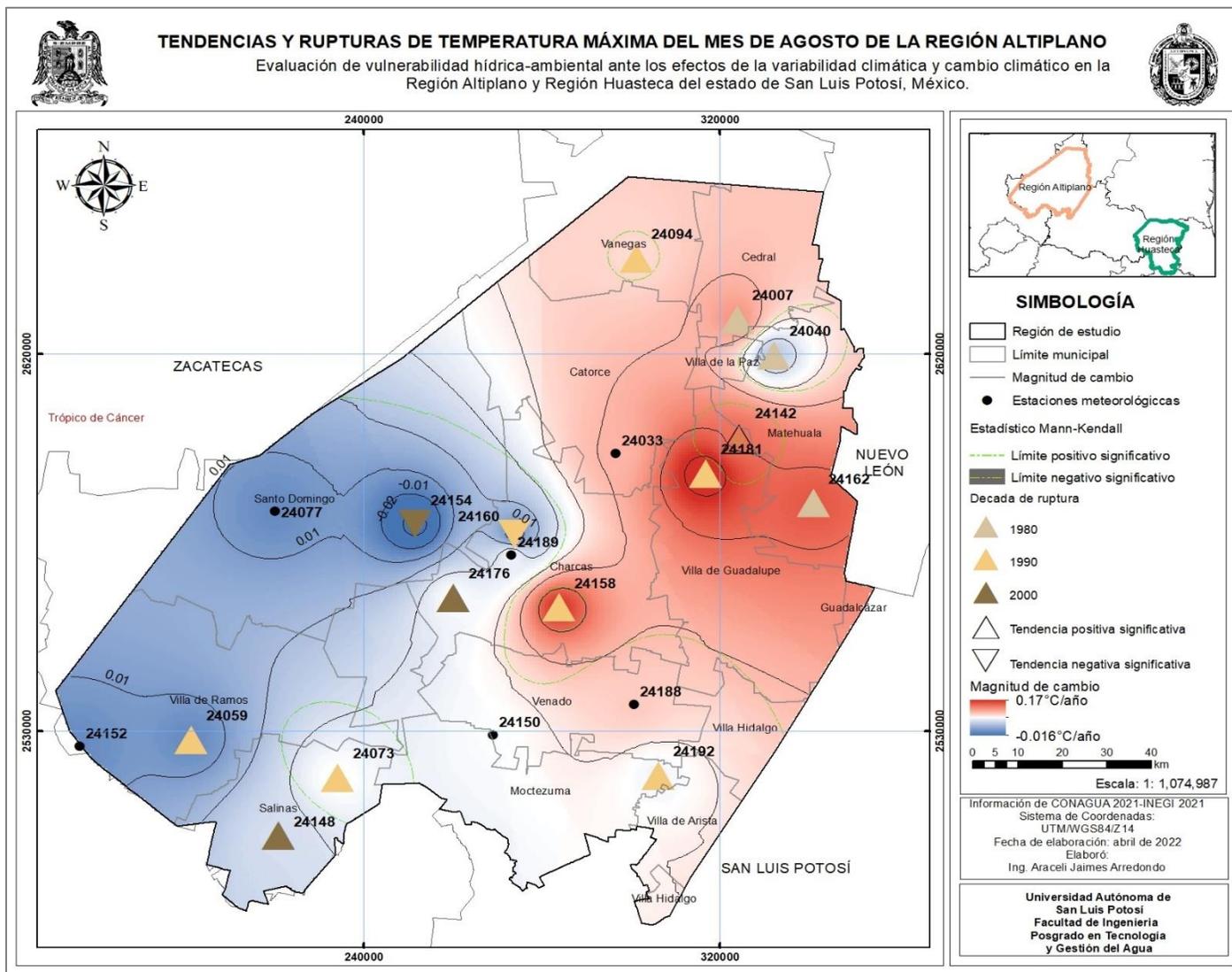


Figura 25. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima del mes de agosto de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

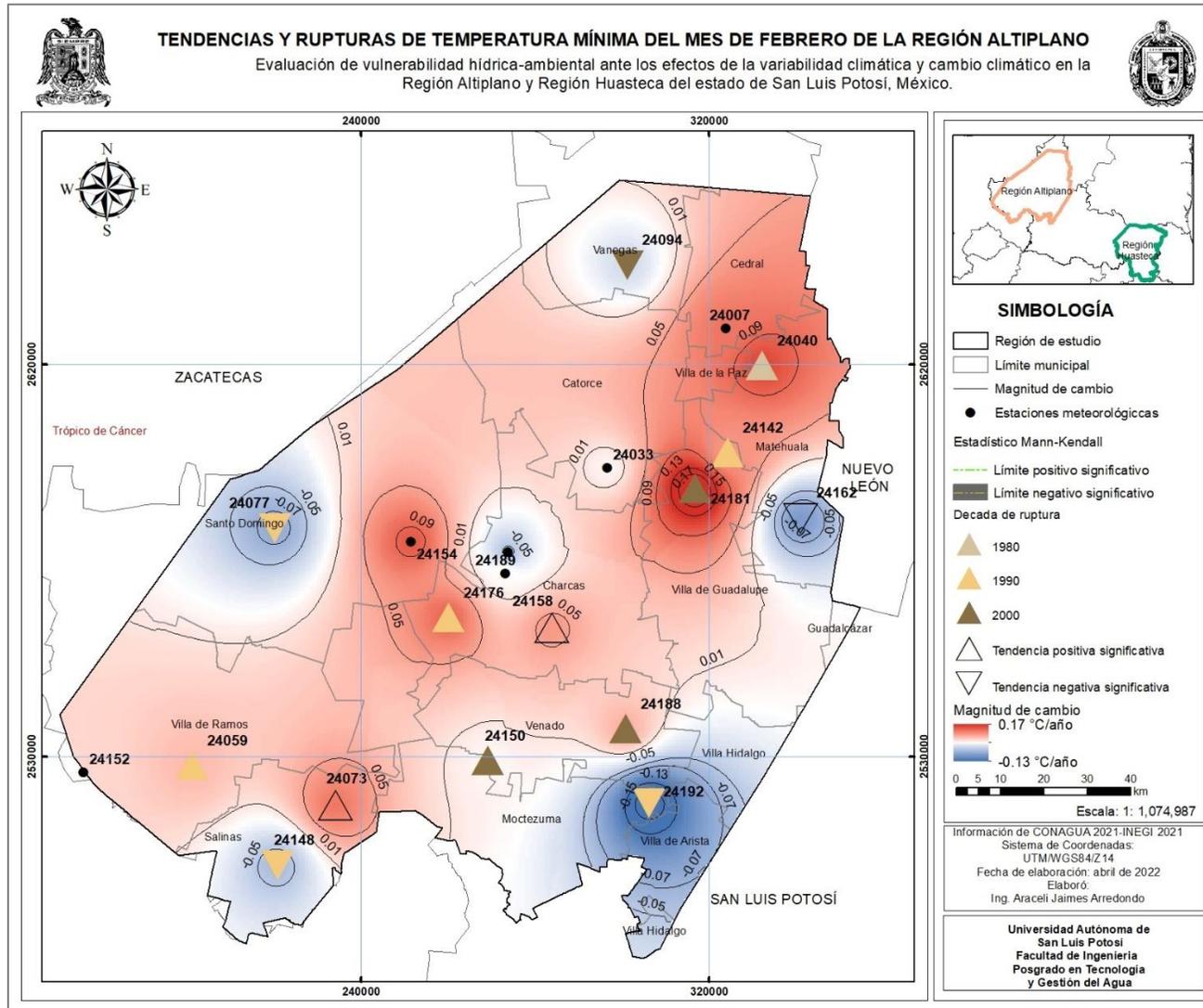


Figura 26. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima del mes de febrero de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

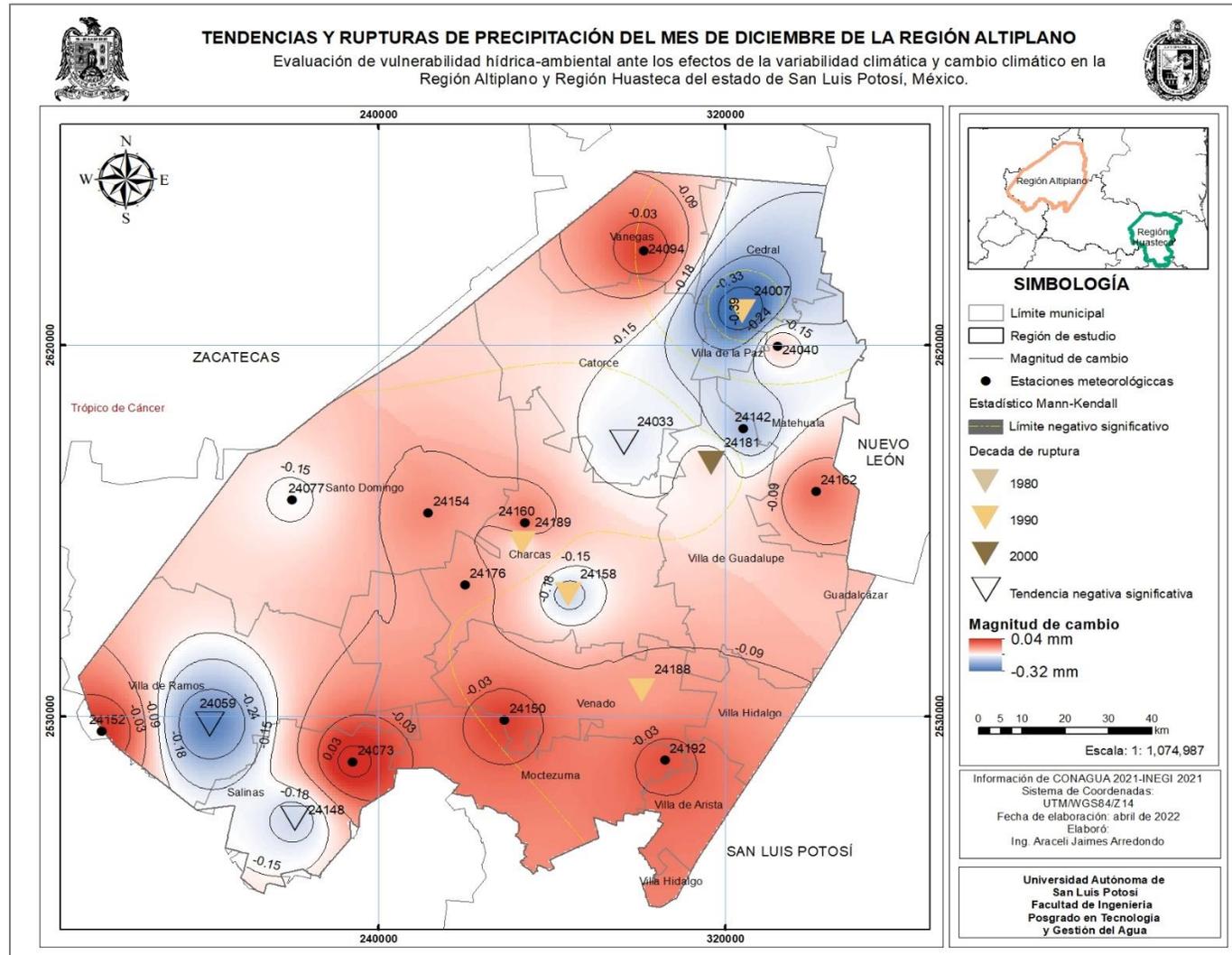


Figura 27. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación del mes de diciembre de la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

En la Figura 28. se presentan los resultados de temperatura promedio anual de la RH. Se evidencia cambio climático, ya que ocurre una tendencia estadísticamente significativa al cambio de incremento en 14 estaciones, en los municipios de Tamasopo, Aquismón, Tamazunchale, Ébano, Tamuín, Ciudad Valles, Tanlajás, Axtla de Terrazas y Xilitla, con valores de magnitud de cambio que van desde los $0.016^{\circ}\text{C}/\text{año}$ hasta los $0.088^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Y en dos municipios se encuentra una estación con tendencia al decremento, la primera con clave 24005 en el municipio de Tanlajás con un valor de $-0.017^{\circ}\text{C}/\text{año}$ y la segunda con clave 24107 en el municipio de Tamuín con una magnitud de $-0.031^{\circ}\text{C}/\text{año}$. En el mapa se presentan 18 triángulos equiláteros que indican rupturas de incremento en 18 estaciones en las décadas de 1990 y 2000. Y también 5 triángulos invertidos que denotan las estaciones que presentan una ruptura de decremento en la década de los años 2000.

En la Figura 29. se representaron los resultados de temperatura máxima anual de la RH, el mapa presenta que la mayor tendencia al cambio de incremento está ocurriendo en la parte norte de la RH en el municipio de Ciudad Valles, con una figura circular en diferentes tonos de color rojo. Se encontraron 6 estaciones con tendencia de incremento en los municipios de Tamasopo, Ciudad Valles, San Martín Chalchicuátla, Tanquián de Escobedo y Tamazunchale; con valores de $0.032^{\circ}\text{C}/\text{año}$ a $0.0122^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Así como 3 estaciones con tendencia al decremento en los municipios de Tamazunchale, Aquismón y Tamuín. Las rupturas que se presentan en el mapa son en 8 estaciones con incrementos y en 5 con decrementos, todas ellas en las décadas de 1990 y los 2000.

En la Figura 30. se presentan los resultados de temperatura mínima anual de la RH, los resultados con estadística significativa se presentaron solo para la tendencia al cambio de incremento tanto local como regionalmente, y la mayoría de estos ocurrieron en la parte oeste y sur de la RH. En 13 estaciones se presentó esta tendencia al cambio de incremento de temperatura mínima anual en estaciones de los municipios de Tamasopo, Aquismón, Tamazunchale, Ciudad Valles, Axtla de Terrazas, Tanlajás, Tanlú y Tamuín. Con valores de magnitud de cambio desde los $0.031^{\circ}\text{C}/\text{año}$ a $0.07^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Y regionalmente la magnitud de cambio tiene un valor de $0.022^{\circ}\text{C}/\text{año}$. También se presentaron rupturas de los valores medios de forma local y regional, en 16 estaciones con valores de incremento en años de las décadas de 1980, 1990 y 2000. Y en la estación 24020 en el municipio de San Vicente Tancuayalab se presentó una ruptura de decremento en el año de 2005. Para los valores medios de la región la ruptura de incremento ocurrió en 1996.

En la Figura 31. se presentan los resultados de precipitación anual de la RH. Solo se presentaron tendencias significativas al cambio de forma local en dos estaciones, las dos de decremento, la primera es la estación con clave 24003 en el municipio de Aquismón con una magnitud de cambio de $-6.607\text{ mm}/\text{año}$ y la segunda con clave 24107 en el municipio de Tamuín con una magnitud de cambio de -8.849 . Y para la prueba de Pettit solo hubo ruptura de decremento en la estación 24003 en el año de 1993.

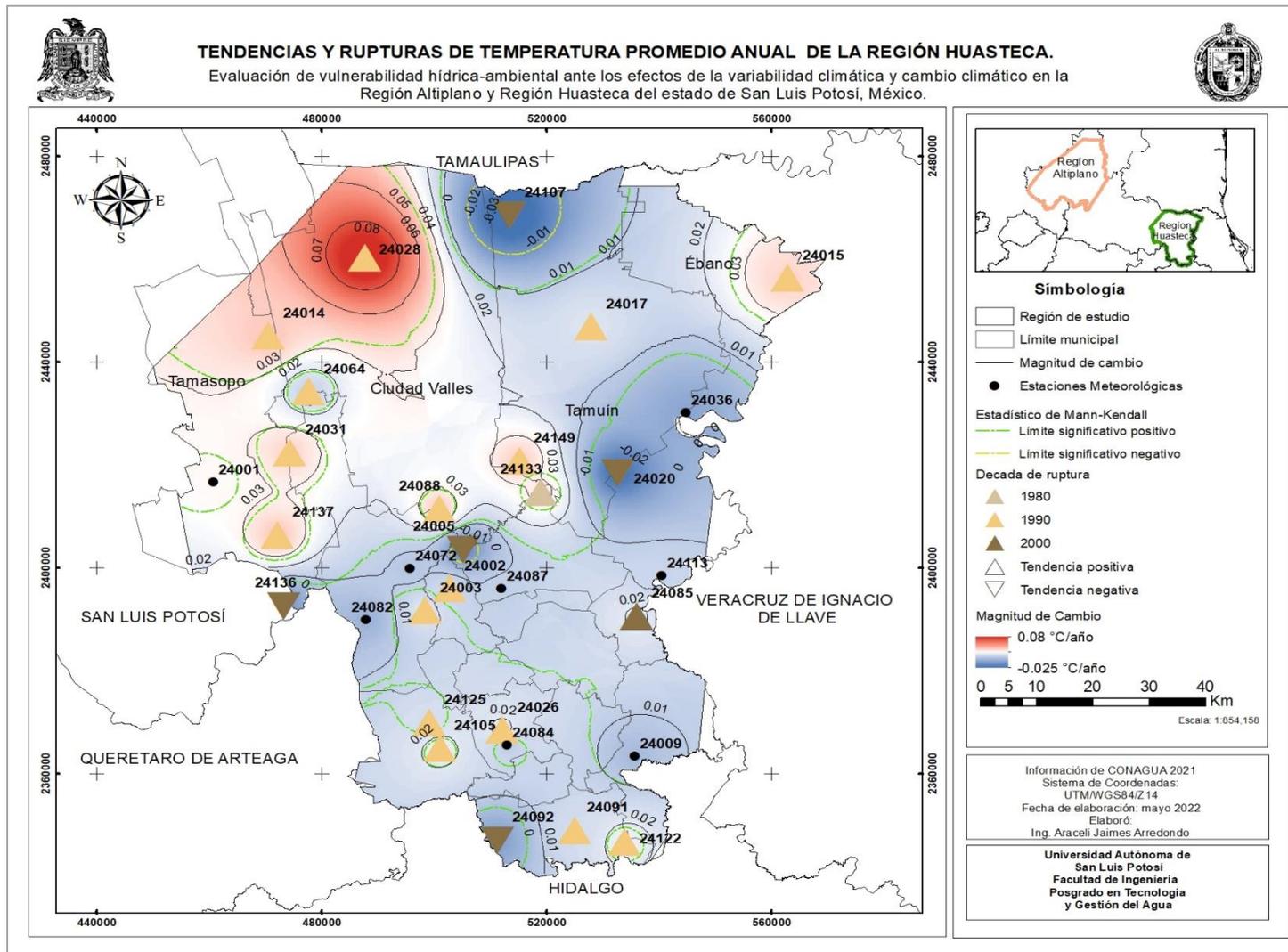


Figura 28. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

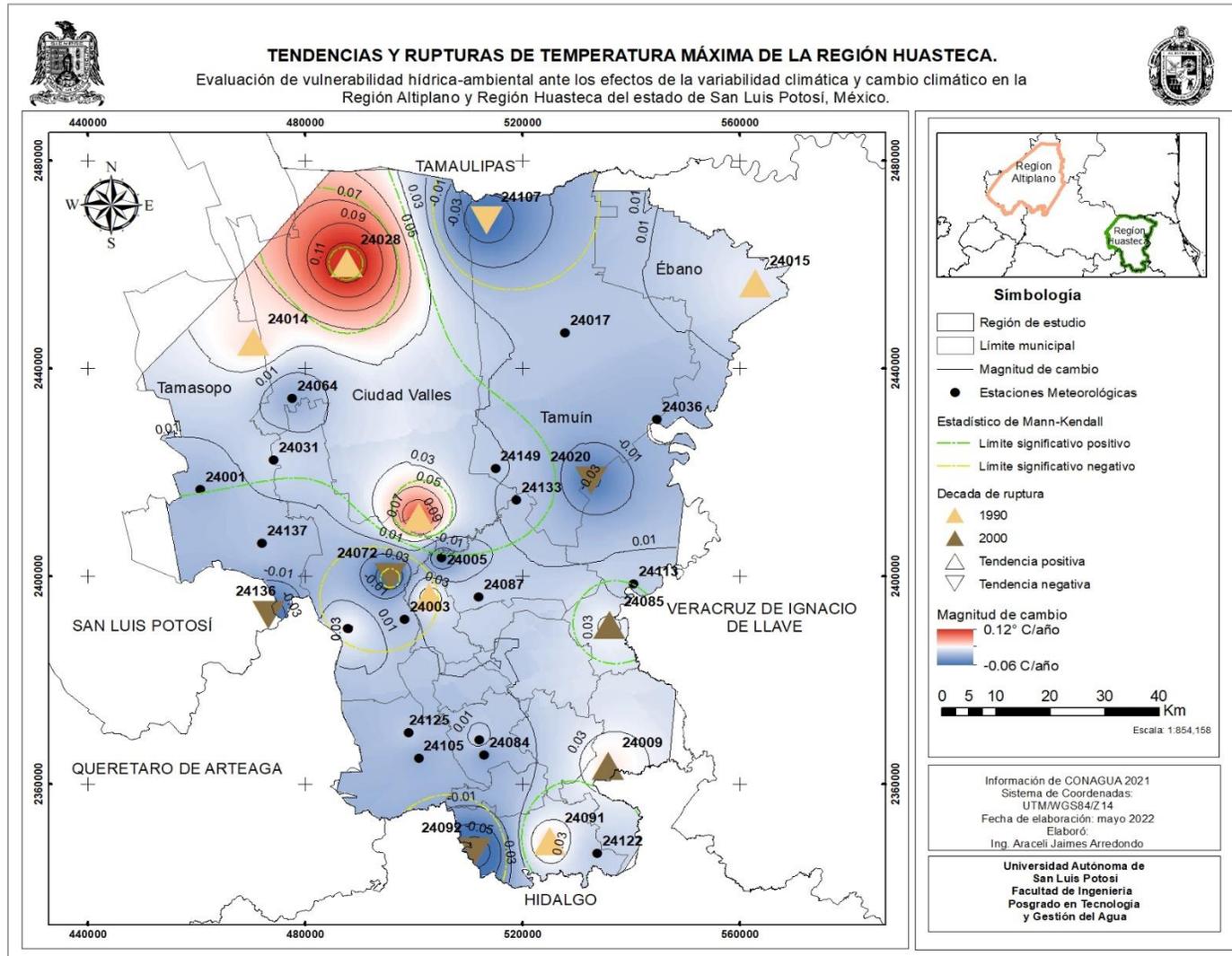


Figura 29. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

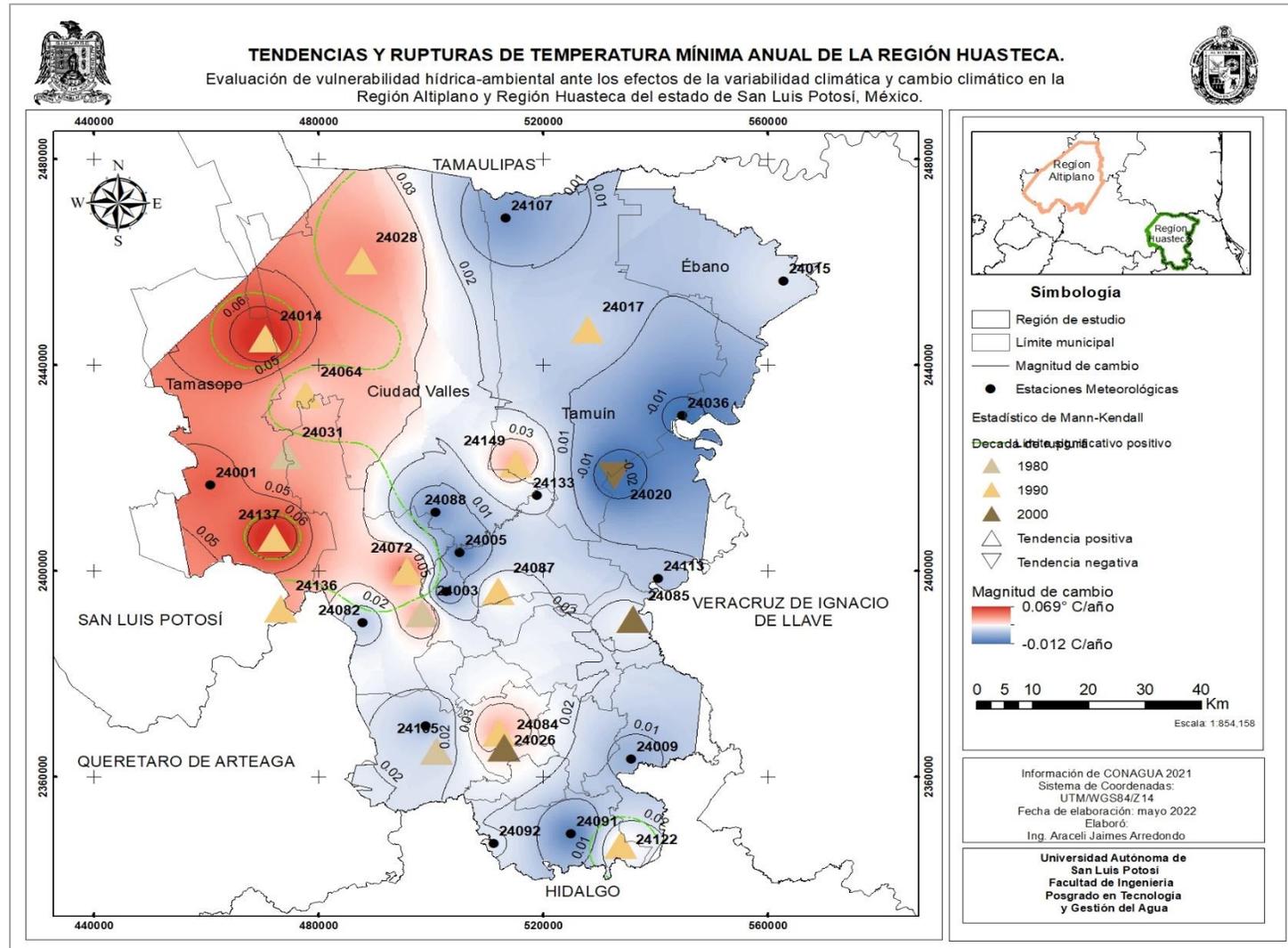


Figura 30. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

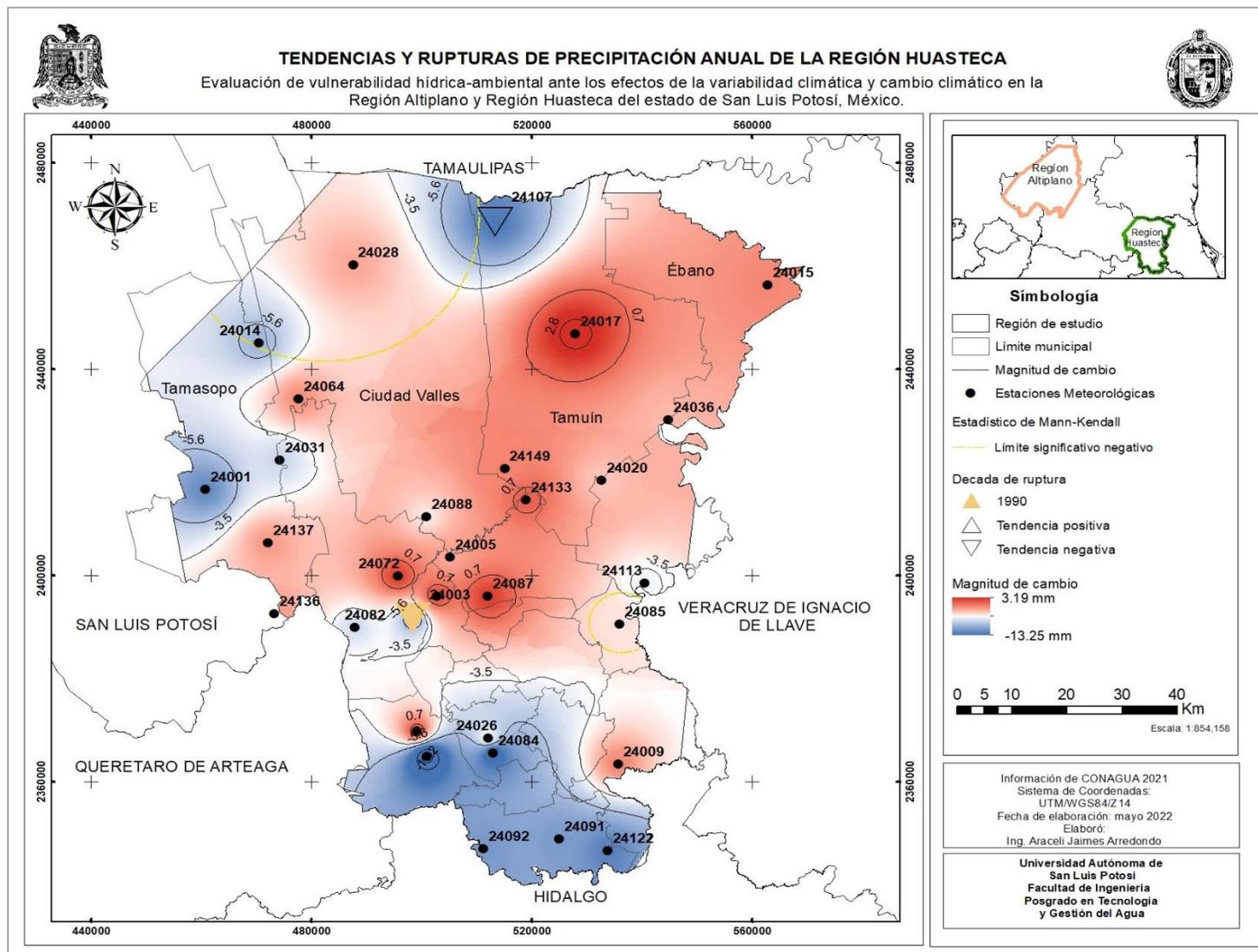


Figura 31. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación anual de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

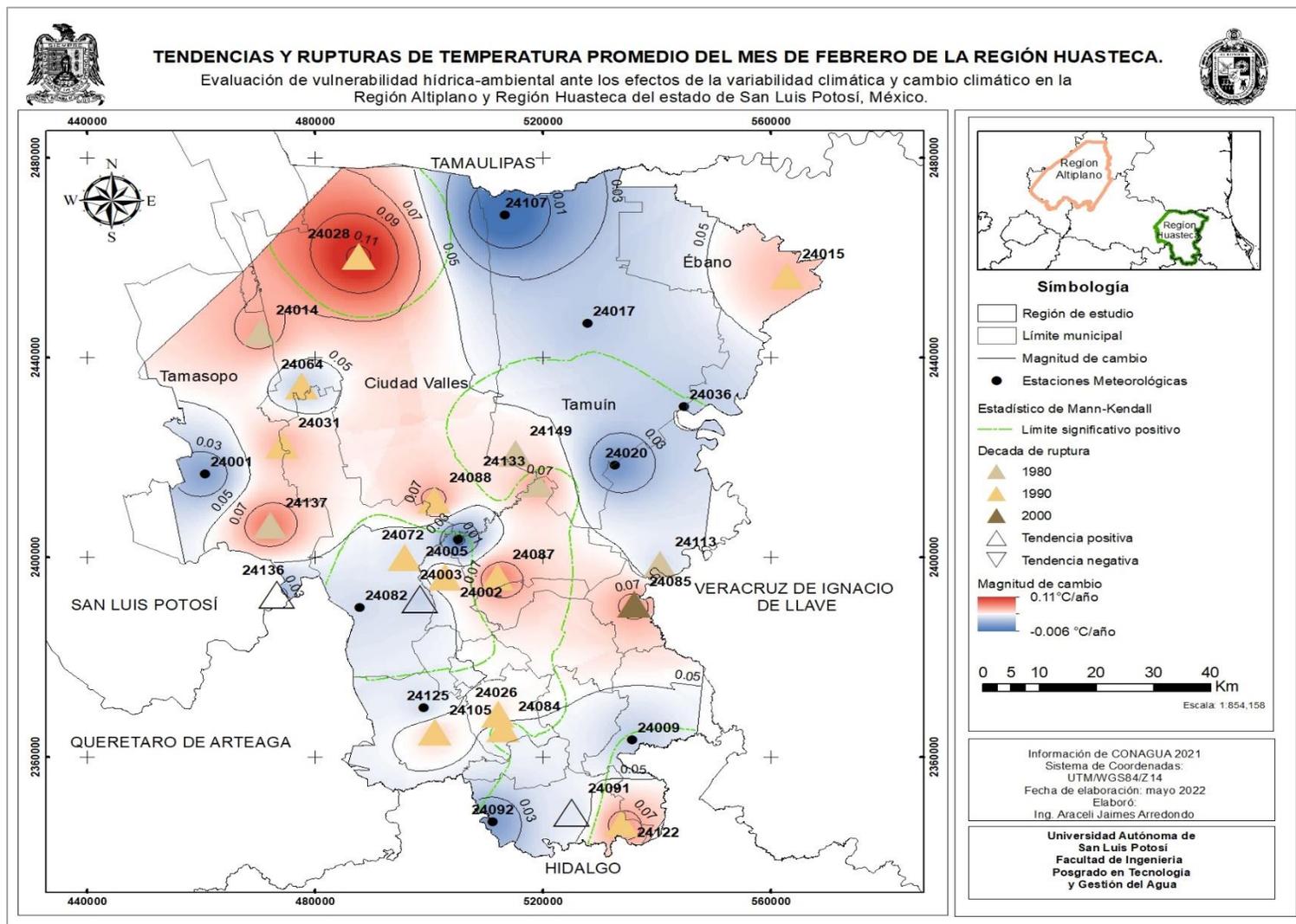


Figura 32. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura promedio del mes de febrero de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

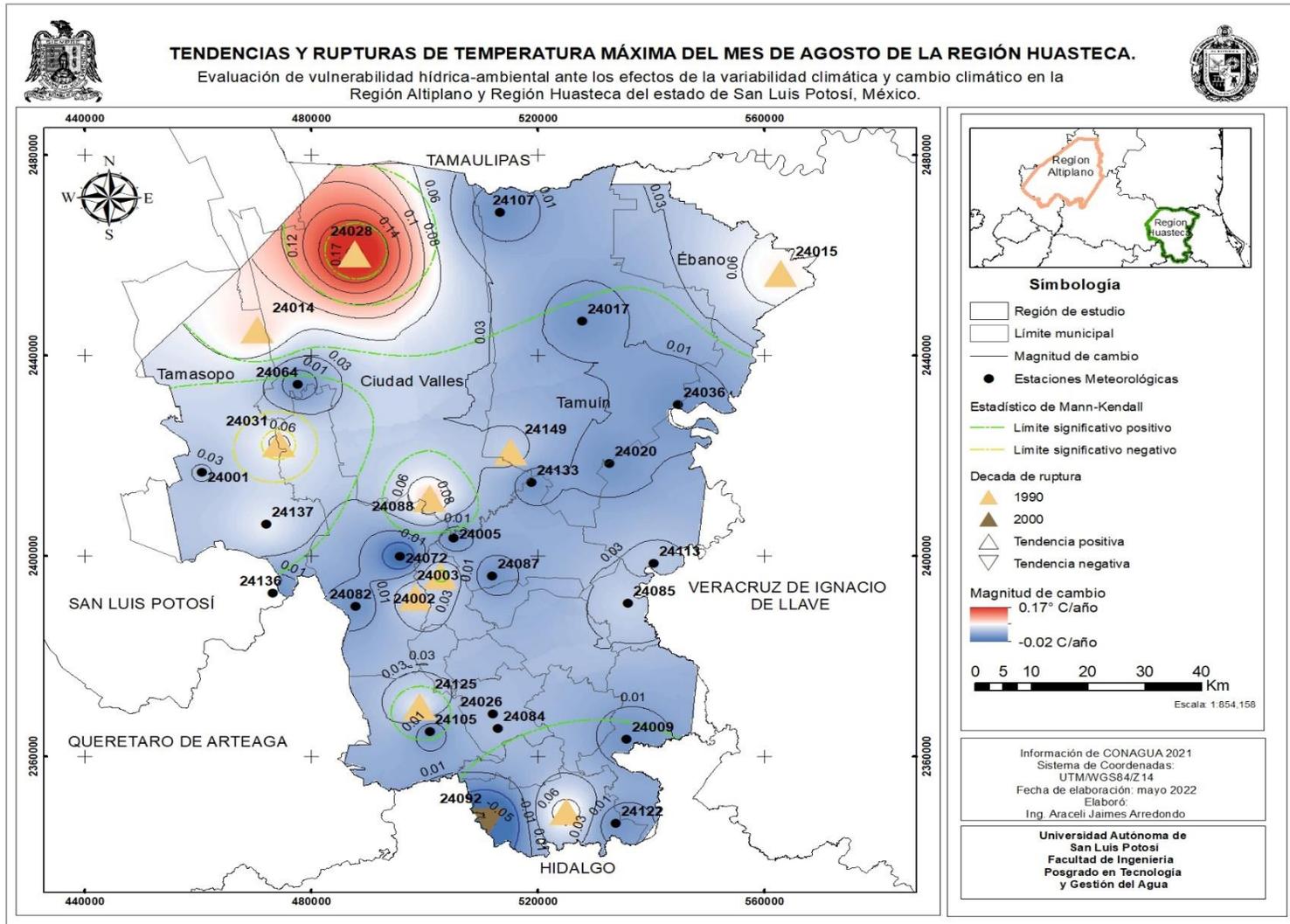


Figura 33. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura máxima del mes de agosto de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

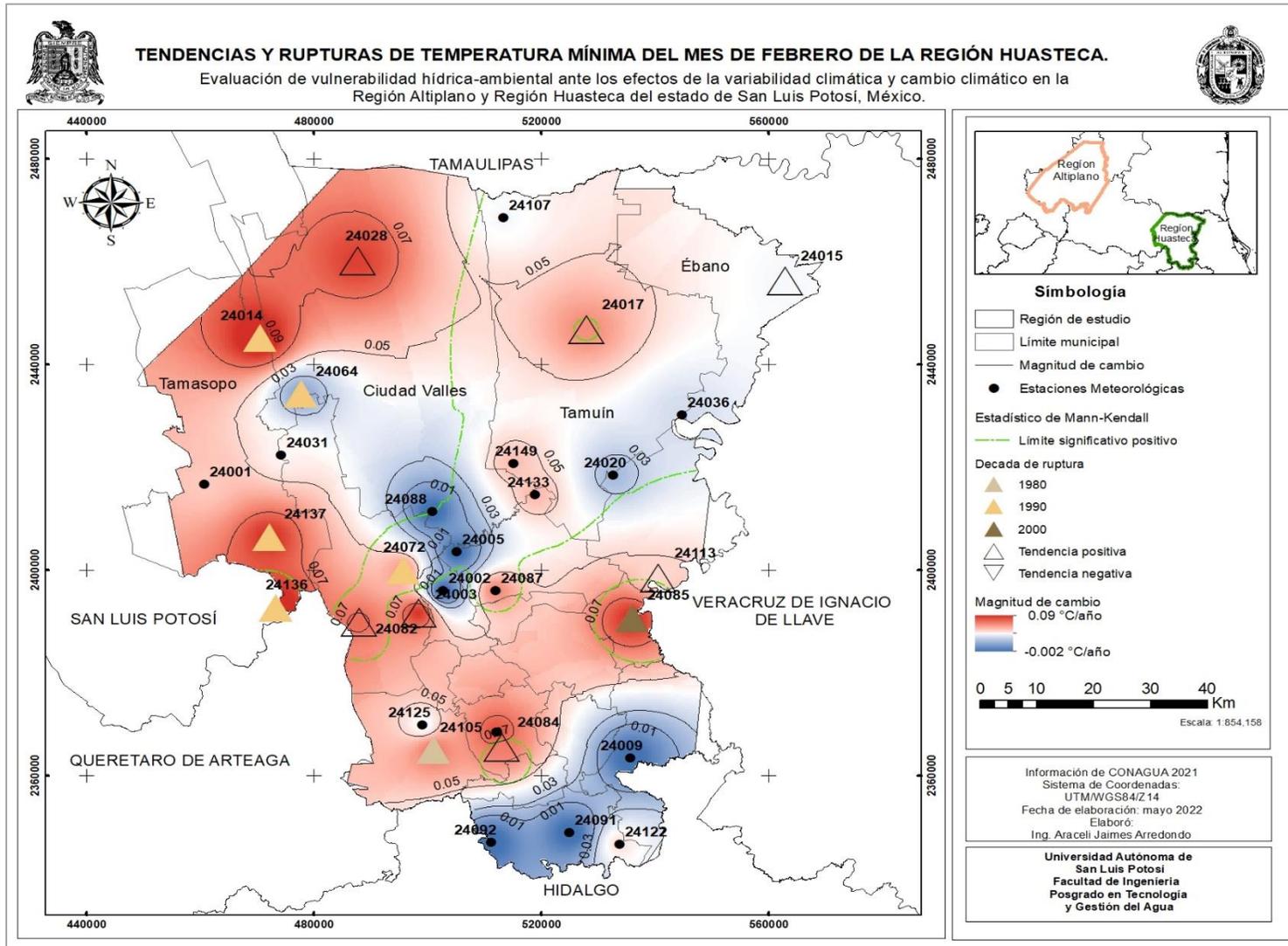


Figura 34. Resultados de tendencias y rupturas de temperatura mínima del mes de febrero de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

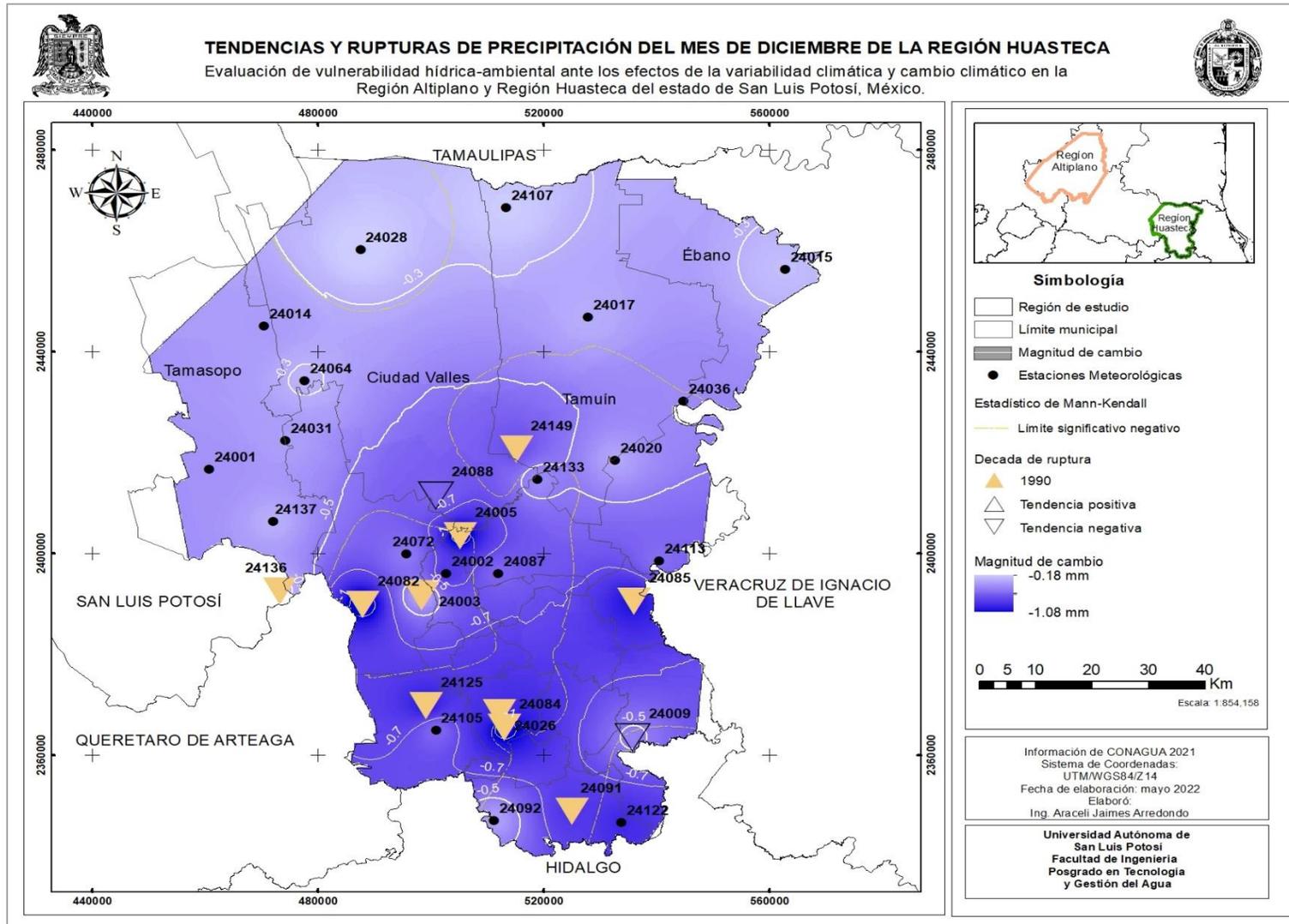


Figura 35. Resultados de tendencias y rupturas de precipitación del mes de diciembre de la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

2.3 Sequía

Existen diferentes tipos de sequía, los cuales están determinados por los tipos de impactos que trae como consecuencia el fenómeno. Así, se habla de sequía desde los puntos de vista meteorológico, agrícola e hidrológico. La sequía meteorológica se caracteriza por una ausencia prolongada, un déficit marcado o una débil distribución de precipitaciones con relación a la considerada como normal, y puede producir serios desbalances hidrológicos; la sequía agrícola es ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce significativamente la producción agrícola con relación a la considerada como normal o a los valores esperados para una región dada; la sequía hidrológica hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, acuíferos, lagos, etc.) con respecto a los niveles considerados como normales (Wilhite, 2000). En la Figura 36. se presenta un resumen con la secuencia de sucesos de los diferentes tipos de sequías y de sus efectos.

Las sequías tienen graves efectos directos e indirectos en los sectores ecológico, agrícola y económico, como los daños a los hábitats de vida silvestre y los cultivos. Las sequías meteorológicas son una anomalía natural recurrente y regional, que ocasiona falta de precipitación, lo cual origina escasez en los recursos hídricos, generando las sequías hidrológicas y también las sequías agrícolas, cuando se conjuga el déficit por lluvia con el de abastecimiento y se produce una deficiencia en la humedad del suelo para los cultivos. Los déficits hidrológico y agrícola crean las sequías económicas, que finalmente desencadenan impactos sociales (Campos A., 2017).

Los principales factores globales que controlan las características de las sequías son: el comportamiento del sistema océano-atmósfera, las anomalías en la temperatura superficial de los océanos, las relaciones clima solar-tiempo atmosférico y los mecanismos de formación de los ciclones. Estos factores no actúan de forma individual, sino que se interrelacionan; por ello, el pronóstico de las sequías está todavía bajo en desarrollo e investigación (Morid, Smakhtin, & Bagherzadeh, 2007; Mishra & Singh, 2011).

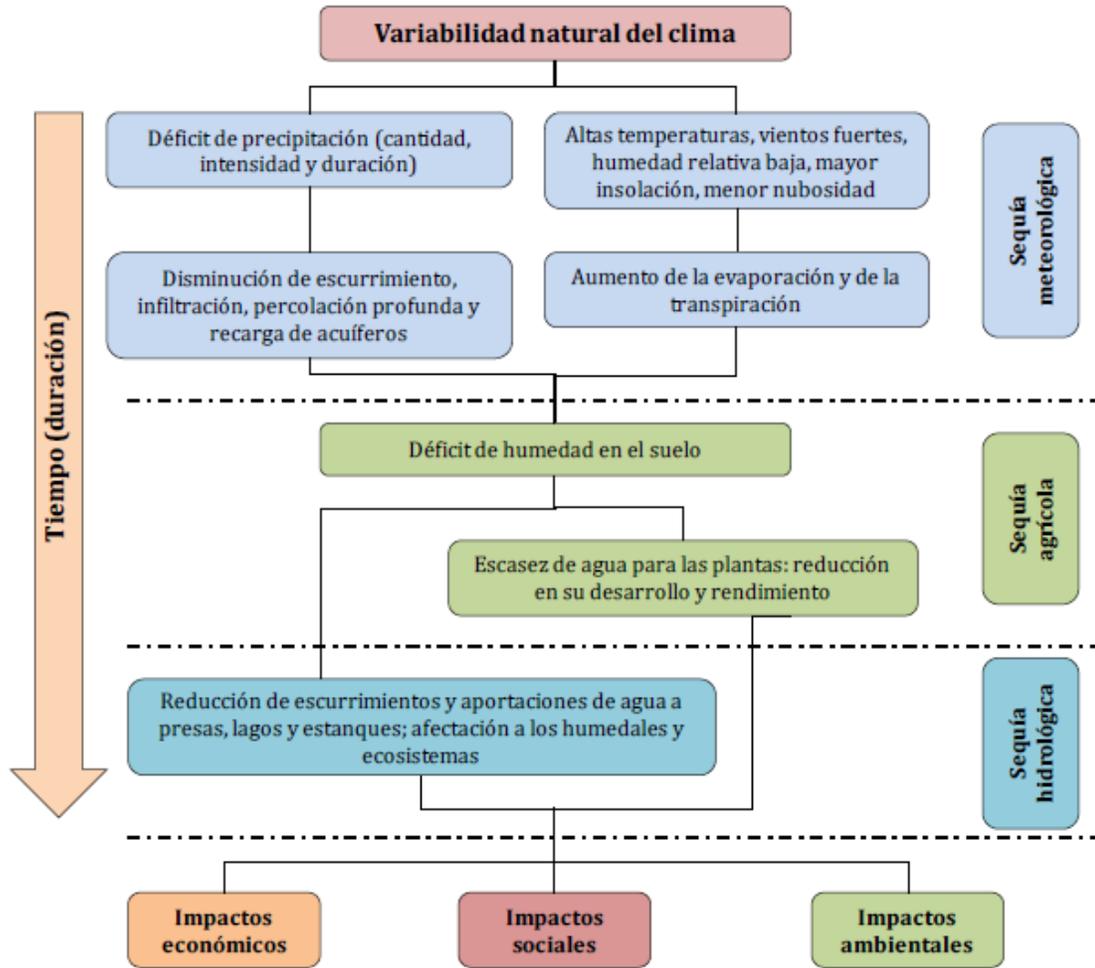


Figura 36. Secuencia de sucesos de los diferentes tipos de sequías y de sus efectos (Tomado de Ortega y Velazco, 2013)

2.3.1 Sequía hidrológica

Es de gran importancia para el manejo y gestión de los recursos hídricos, comprender el fenómeno de sequía hidrológica; Esta se caracteriza por una baja perceptible en caudal o volumen en los niveles de ríos, presas y acuíferos. Esto sucede porque la disminución de lluvia ocasiona la disminución de los volúmenes de escurrimiento, lo que provoca la disminución del nivel de los cuerpos de agua. En casos extremos, llegan a secarse los cuerpos de agua, como lagos y presas, y se disminuye el nivel de los acuíferos. La sequía hidrológica es de largo plazo, lo que significa que puede extenderse por varios años. Por su persistencia, puede causar daños severos a la población, ya que los efectos y la recuperación son a largo plazo y afectan desde los grandes productores hasta los pequeños usuarios de agua (Gutiérrez *et al.*, 2005). Por tanto, se puede decir que esta sequía ocurre cuando hay un déficit de agua en los escurrimientos superficial y subterráneos, este déficit ocurre respecto a la media mensual o anual del sitio (García *et al.*, 2014).

2.3.2 Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

La cuantificación exacta, oportuna y consistente de las sequías hidrológica se puede emplear para minimizar sus daños, lo cual se realiza a través de los llamados índices de sequía (Campos, 2017).

El Índice Estandarizado de Precipitación, propuesto por McKee, Doesken & Kleist (1993), sus siglas proceden de su designación en inglés (Standardized Precipitation Index), destaca por la sencillez, facilidad de cálculo y su significado desde el punto de vista estadístico, además de la relación de los déficits de precipitación con los diferentes impactos en las aguas subterráneas, el almacenamiento de agua en reservorios, en la humedad del suelo, los bancos de nieve y los caudales fluviales que lo hacen altamente aceptado en los estudios de la sequía (SMN, 2022).

El índice estandarizado de precipitación (SPI), tiene una buena aplicabilidad en la distribución de probabilidad de tiempo, espacio y precipitación, y puede detectar las características de la actividad de sequía en una amplia zona en diferentes escalas de tiempo, el SPI determinó que la precipitación es el principal factor que afecta la intensidad y duración de la sequía (Lui *et al.*, 2021).

La sencillez del SPI radica en que utiliza únicamente la precipitación para su cálculo y es efectivo para analizar los períodos y ciclos húmedos y secos, a diferencia de otros como el Índice de Palmer. Los registros de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidades y a continuación se transforman en una distribución normal. Los valores positivos/negativos del SPI indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana. El SPI puede calcularse para distintas escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 24 y 48 meses) lo cual permite evaluar la severidad de la sequía en el corto y largo período, los inconvenientes es que únicamente puede cuantificar el déficit de precipitación (OMM, 2012).

El SPI tiene una escala de intensidad en la que se calculan valores positivos y negativos, que se correlacionan directamente con episodios de humedad y sequía (WMO, 2016).

El SPI es calculado ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación con una función teórica de densidad de probabilidad (Tigkas D. *et al.*, 2018), En la distribución gamma, la función de densidad de probabilidad se define como:

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

Donde α es el parámetro de forma ($\alpha > 0$), β es el parámetro de escala ($\beta > 0$), x es el valor de precipitación efectiva ($x > 0$) y $\Gamma(\alpha)$ es la función gama; expresada como

$$\int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Los parámetros α y β se estimaron a través de la siguiente formulación (Thom, 1958):

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A}, \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

En donde $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$ y n es el número de presentaciones.

La probabilidad acumulada $G(x)$ de un evento de precipitación es:

$$G(x) = \frac{\int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

Para el cálculo de SPI, la distribución de probabilidad acumulada se transforma en distribución normal utilizando la siguiente aproximación (Abramovitz y Stegun 1965):

$$SPI = - \left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$\text{En la cual } t = \sqrt{\ln(1/H(x^2))}$$

$$SPI = t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}, 0.5 < H(x) \leq 1$$

$$\text{En la cual } t = \sqrt{\ln(1/[1 - H(x^2)])}$$

Con los siguientes valores constantes

$$C_0 = 2.515517$$

$$C_2 = 0.010328$$

$$d_2 = 0.189269$$

$$C_1 = 0.802853$$

$$d_1 = 1.43278$$

$$d_3 = 0.001308$$

De esta forma se analizó SPI para la sequía hidrológica de los datos de la Región Altiplano y Región Huasteca, para después determinar si existía alguna tendencia al cambio de los valores obtenidos de SPI siguiendo la siguiente metodología: se obtuvieron los datos de precipitación para cada una de las 51 estaciones meteorológicas de las dos regiones de estudio, se arreglaron los datos en una hoja de cálculo a escala mensual y anual, como siguiente paso se calculó SPI en el programa de cómputo DRINC, para finalizar con las tendencias al cambio, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ en el análisis estadístico de Mann-Kendall empleando una hoja habilitada para macros.

En la Figura 36. se presenta la ventana del programa de cómputo DrinC donde se hicieron los cálculos de SPI para 12 meses.

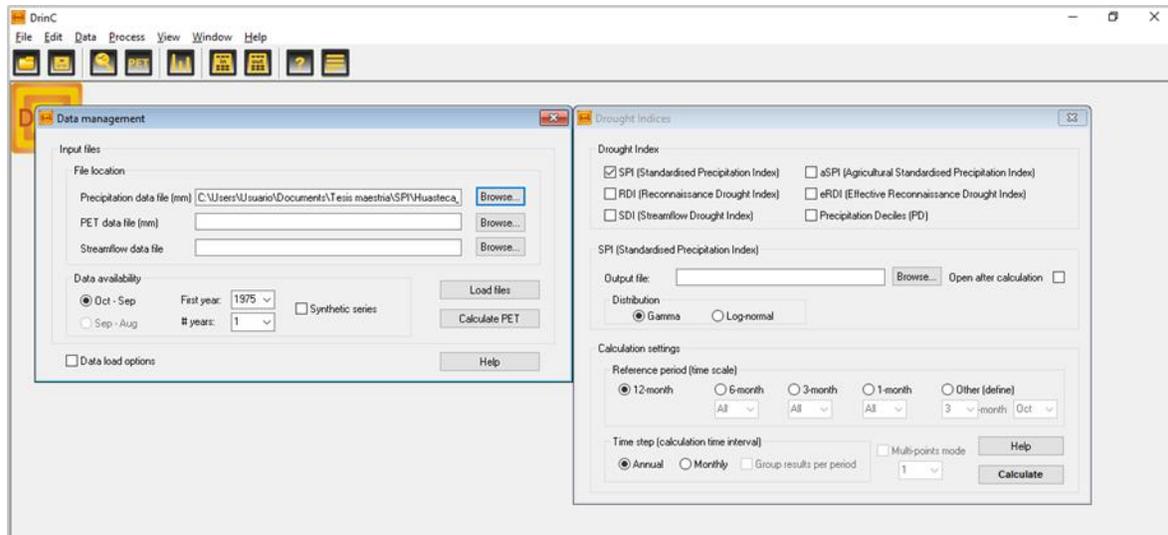


Figura 37. Cálculo de SPI en DrinC

Clasificación de los periodos húmedos y secos (Sequías) con base en el valor de SPI (CONAGUA, 2018).

Valor del índice	Designación
>2.00	Húmedo extremo
1.6 a 1.99	Extremadamente húmedo
1.3 a 1.59	Muy húmedo
0.8 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
-2.00 o menor	Excepcionalmente seco

Cuadro 21. Valores de SPI y su designación conforme a CONAGUA 2021.

Se determino analizar los resultados para la época húmeda y seca de cada región, cada época se estableció dependiendo del régimen pluvial, quedando cada época con los siguientes meses:

- **Época Seca:** Diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre;
- **Época Húmeda:** Junio, julio, agosto, septiembre y octubre.

Los resultados del análisis de tendencias de SPI se presentan a continuación en el Cuadro 22. para las dos regiones de estudio y dividido por épocas.

Cuadro 22. SPI 12 meses, para datos anuales, época seca y húmeda de las regiones de estudio (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

SPI 12M Región Huasteca				SPI 12M Región Altiplano		
Año	Anual	Época Seca	Época Húmeda	Anual	Época seca	Época Húmeda
1976	1.54	1.33	1.83	0.74	0.55	1.00
1977	0.16	0.75	-0.67	0.48	0.81	0.01
1978	-0.52	-0.72	-0.24	-0.78	-0.87	-0.64
1979	0.17	0.23	0.08	-0.24	-0.16	-0.36
1980	-0.91	-0.77	-1.11	-0.03	-0.12	0.09
1981	0.35	-0.29	1.24	0.74	0.67	0.83
1982	-0.43	0.21	-1.31	-0.79	-0.54	-1.13
1983	-0.93	-1.42	-0.25	-0.16	-0.44	0.22
1984	0.94	0.79	1.16	0.10	0.12	0.06
1985	1.16	1.25	1.03	0.08	-0.03	0.23
1986	-0.37	-0.09	-0.75	-0.20	-0.03	-0.45
1987	-0.53	-0.63	-0.39	0.26	0.10	0.50
1988	-0.48	-0.64	-0.27	0.54	0.45	0.68
1989	-0.35	-0.11	-0.70	0.06	0.39	-0.41
1990	-0.16	-0.29	0.03	0.60	0.46	0.80
1991	0.86	0.65	1.16	0.77	0.73	0.83
1992	1.66	1.82	1.43	1.92	1.97	1.85
1993	1.55	1.25	1.97	-0.11	0.03	-0.30
1994	0.75	1.32	-0.04	0.09	-0.09	0.35
1995	-0.30	-0.45	-0.08	-0.22	0.00	-0.53
1996	-0.64	-0.55	-0.77	-0.98	-0.87	-1.15
1997	-0.71	-0.73	-0.68	-0.20	-0.37	0.04
1998	-1.02	-0.97	-1.08	-1.50	-1.25	-1.84
1999	0.23	-0.01	0.55	-1.36	-1.43	-1.26
2000	-0.44	-0.46	-0.41	-1.70	-1.91	-1.42
2001	-0.78	-0.70	-0.89	-1.21	-1.23	-1.18
2002	-0.91	-0.92	-0.91	0.16	-0.05	0.46
2003	-0.54	-0.60	-0.46	0.95	1.05	0.81
2004	0.17	-0.03	0.45	1.06	0.85	1.34
2005	-0.63	-0.45	-0.87	-0.08	0.39	-0.72
2006	-0.68	-0.54	-0.86	-1.06	-1.26	-0.77
2007	0.07	-0.35	0.67	0.62	0.28	1.10
2008	1.28	1.14	1.48	0.29	0.47	0.05
2009	0.64	1.15	-0.07	-0.06	0.14	-0.35
2010	0.55	0.10	1.17	0.96	0.78	1.20
2011	-0.01	0.16	-0.26	-1.64	-1.16	-2.30

SPI 12M Región Huasteca				SPI 12M Región Altiplano		
Año	Anual	Época Seca	Época Húmeda	Anual	Época seca	Época Húmeda
2012	-0.55	-0.47	-0.67	-1.25	-1.43	-0.99
2013	-0.26	-0.27	-0.25	-0.17	-0.43	0.18
2014	1.05	0.99	1.14	1.38	1.43	1.32
2015	0.77	0.84	0.66	1.29	1.06	1.62
2016	-0.25	-0.35	-0.12	0.56	0.96	0.01
2017	-0.01	0.14	-0.21	-0.17	-0.30	0.03
2018	-0.18	-0.12	-0.28	0.34	0.30	0.39
2019	-1.40	-1.39	-1.42	*	*	*

En el Cuadro 22. se presentan los resultados de SPI en las dos regiones de estudio hay años con presencia de sequía, así como años muy húmedos. Los valores de SPI se graficaron para el periodo de 1975 a 2018 en la RA y de 1975 a 2019 a RH. En las Figuras 38 y 39; se presenta el comportamiento de este índice, en dichas figuras el valor 1 representa el valor de SPI del mes de enero de 1975 y el valor final diciembre de 2018 para la RA y diciembre de 2019 para la RH.

La sequía presenta cambios en las dos regiones. Para la Región Altiplano en el periodo analizado de 1975 a 2018, en el **análisis anual** los años 1976, 1981, 1988, 1990, 1991, 1992, 2003, 2004, 2007, 2010, 2014, 2015 y 2016 presentaron SPI con valores de 0.51 a ≥ 2 lo que describe a estos años como periodos húmedos. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RA se presentaron en los años de 1978, 1982, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2006, 2011 y 2012. Para la RA se presentaron más años húmedos que secos.

Para la RA en el periodo analizado de 1975 a 2018, en el análisis de los meses diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre: que se definieron como **época seca** los años 1976, 1977, 1981, 1988, 1991, 1992, 2003, 2004, 2010, 2014, 2015 y 2016 presentaron SPI con valores de 0.51 a ≥ 2 lo que describe a estos años como periodos húmedos. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RA se presentaron en los años de 1978, 1982, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2006, 2011 y 2012.

La RA en el periodo analizado de 1975 a 2018, en el análisis de los meses junio, julio, agosto, septiembre y octubre: que se definieron como **época húmeda** los años 1976, 1981, 1988, 1990, 1991, 1992, 2003, 2004, 2007, 2010, 2014 y 2015 presentaron SPI con valores de 0.51 a ≥ 2 lo que describe a estos años como periodos húmedos. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RA se presentaron en los años de 1978, 1982, 1995, 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2011 y 2012.

Para la RH en el periodo analizado de 1975 a 2019 en el **análisis anual**, los valores de SPI de 0.51 a ≥ 2 que indican periodos húmedos se presentaron en los años 1976, 1984, 1985, 1991, 1992, 1993, 1994, 2008, 2009, 2010, 2014 y 2015. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RH se presentaron en los años de 1978, 1980, 1983, 1987, 1989, 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2012 y 2019.

La RH en el periodo analizado de 1975 a 2019 en el análisis de los meses diciembre, enero, febrero, marzo, abril, mayo, noviembre: que se definieron como **época seca**, los valores de SPI de 0.51 a ≥ 2 que indican periodos húmedos se presentaron en los años 1976, 1977, 1984, 1985, 1991, 1992, 1993, 1994, 2008, 2009, 2014 y 2015. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RH se presentaron en los años de 1978, 1980, 1983, 1987, 1988, 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2003, 2006, y 2019.

La RH en el periodo analizado de 1975 a 2019 en el análisis de los meses junio, julio, agosto, septiembre y octubre: que se definieron como **época húmeda**, los valores de SPI de 0.51 a ≥ 2 que indican periodos húmedos se presentaron en los años 1976, 1981, 1984, 1985, 1991, 1992, 1993, 1999, 2007, 2008, 2010, 2014 y 2015. Y los eventos de sequía con valores de SPI entre -0.79 a ≤ 2 en la RH se presentaron en los años de 1977, 1980, 1982, 1986, 1989, 1996, 1997, 1998, 2001, 2002, 2005, 2006, 2012 y 2019. Para la RH se presentaron más años con sequía que años húmedos.

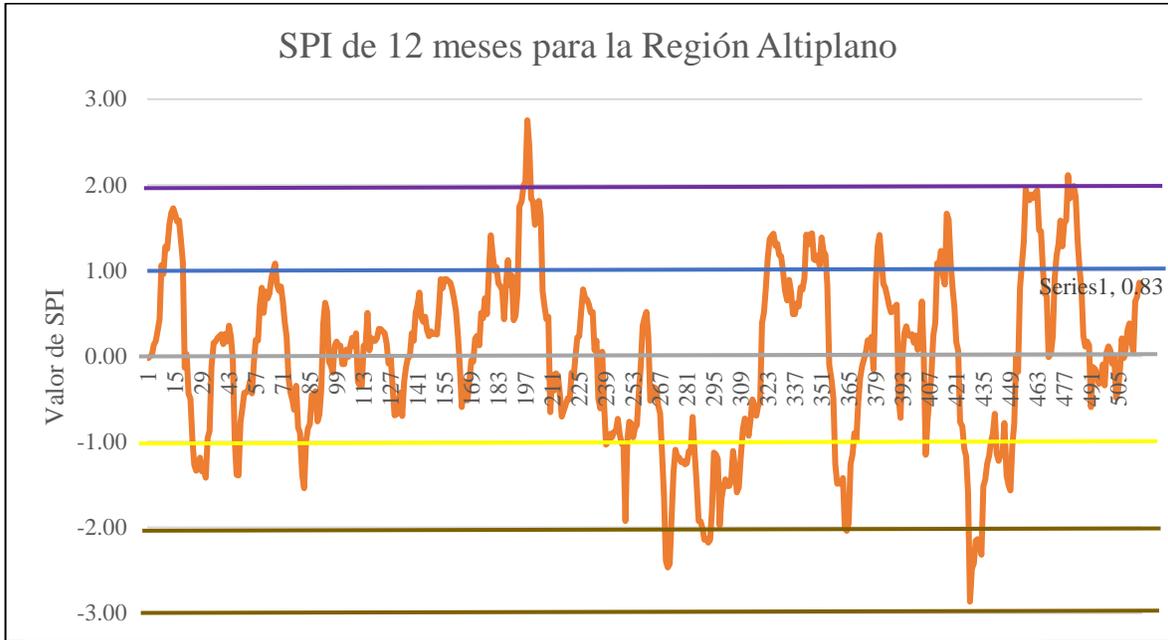


Figura 38. Comportamiento de SPI de 12 meses anual, de la RA (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).

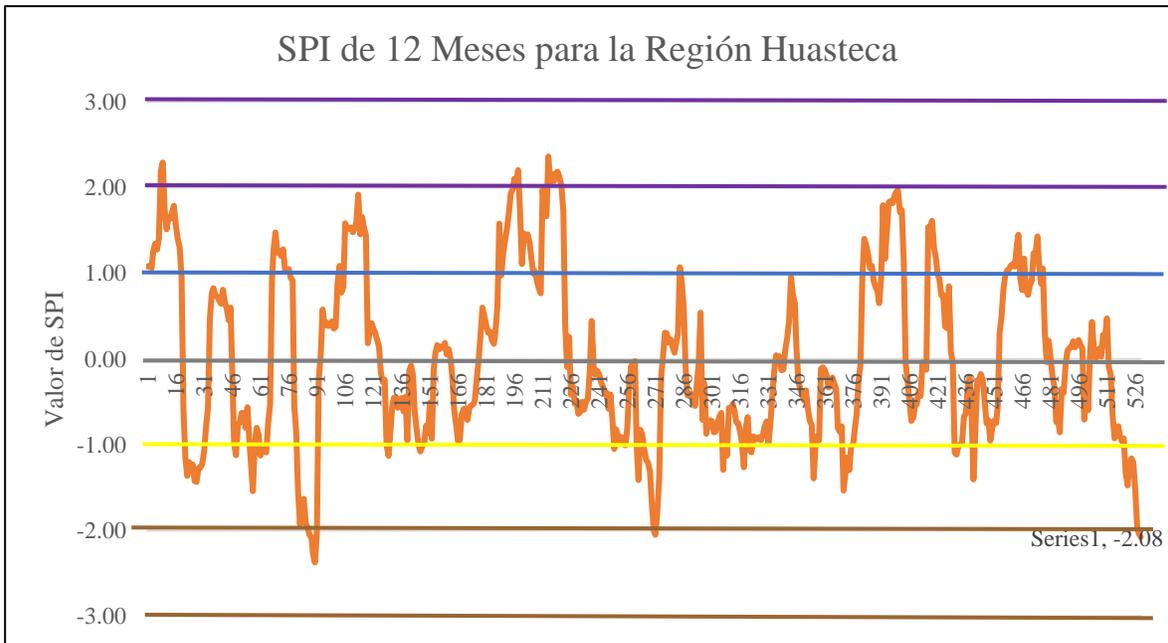


Figura 39. Comportamiento de SPI de 12 meses anual, de la RH (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).

*En la Figura 38 y 39 el valor 1 representa el valor de SPI del mes de enero de 1975 y el valor final diciembre de 2018(RA) y diciembre de 2019 (RH).

Los resultados del análisis de tendencias por la prueba de Mann-Kendall de SPI se presentan a continuación en los Cuadros 23 y 24 para las dos regiones de estudio, los valores en color rojo indican tendencia al incremento y los valores en azul tendencia al decremento de la magnitud de SPI. Los valores de las tendencias de decremento en el SPI (12 meses) indican periodos de sequía.

Los resultados para las estaciones de la RA indican cambios locales, los cambios se presentan tanto en los valores anuales, como en época seca y húmeda; en la Figura 40. se presentan los resultados de los valores medios anuales en 10 estaciones se encontraron incrementos de SPI y para 3 estaciones decrementos. En la Figura 41 se observa los resultados en la época húmeda, donde se encuentran 8 estaciones con tendencia al incremento y 3 estaciones tendencia al decremento. En la época seca Figura 42. se indican las 7 estaciones con tendencia al incremento y 3 estaciones tendencia al decremento. Las tendencias de incremento ya sea en escala anual, de época seca y húmeda ocurrieron en los municipios de Charcas, Catorce, Villa de Guadalupe, Salinas y Villa de Ramos. Las tendencias de decremento ya sea en escala anual, de época seca y húmeda ocurrieron en los municipios de Moctezuma. Santo Domingo y Cedral.

Cuadro 23. Resultados de tendencias de SPI para la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Tendencias significativas en el SPI-12				
Estación meteorológica	Clave	ANUAL	ÉPOCA SECA	ÉPOCA HÚMEDA
Buena vista	24181	0.00	-0.01	0.01
Cedral	24007	-0.22	-0.22	-0.21
Charcas	24158	0.18	0.20	0.16
Coronado	24188	0.11	0.08	0.11
Coyotillos	24160	0.10	0.10	0.10
El Carmen	24612	0.02	0.02	0.02
El Hospital	24189	0.16	0.16	0.16
Guanamé	24150	-0.04	-0.03	-0.06
La Maroma	24033	0.12	0.11	0.12
La Presa	24142	0.14	0.14	0.15
Matehuala	24040	0.01	0.00	0.00
Moctezuma	24192	0.01	0.02	0.00
Reforma	24073	0.14	0.14	0.14
Salinas	24148	0.07	0.05	0.08
San Francisco	24154	-0.30	-0.30	-0.30
Santo Domingo	24077	-0.12	-0.12	-0.12
Sauz de Calera	24152	0.23	0.22	0.24
Tuzal	24176	-0.02	-0.02	-0.01
Vanegas	24094	0.06	0.07	0.04
Villa de Ramos	24059	-0.02	-0.02	-0.03
Región Altiplano		0.01	0.01	0.01

Los resultados para la RH (Cuadro 24) indican cambios locales, los cambios se presentan tanto en escala anual como en la época seca y húmeda; se presentan mayormente cambios de decremento de SPI, en la Figura 43. se presentan los resultados para escala anual donde hay 11 estaciones con decremento de los valores de SPI, aun así, en 3 estaciones se presenta tendencia al incremento. En la RH predominan los valores de decremento en las tendencias de SPI lo que indica sequía. En la Figura 44. se presentan los resultados para la época húmeda con 8 estaciones con tendencia al decremento, y en la Figura 45. Se presentan los resultados para la época seca con 9 estaciones con tendencia al decremento y 1 estaciones con tendencia al incremento. Las tendencias de decremento se presentaron en los municipios de Tamasopo, Aquismón, Tamuín, San Vicente Tancuayalab, Tamazunchale, Tanquián de Escobedo y Xilitla. Las tendencias de incremento se presentaron en los municipios de Tamuín, Aquismón y Tanlajás.

Cuadro 24. Resultados de tendencia de SPI para la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2020).

Tendencias significativas en el SPI-12				
Estación	Clave	ANUAL	ÉPOCA SECA	ÉPOCA HÚMEDA
Agua Buena	24001	-0.10	-0.13	-0.08
Altamira	24002	0.03	0.02	0.05
Aquismón	24003	-0.29	-0.28	-0.29
Ballesmí	24005	-0.01	-0.01	-0.02
Chapuluacanito	24122	-0.15	-0.14	-0.14
Damián Carmona	24014	-0.11	-0.11	-0.10
Ébano	24015	-0.02	-0.03	0.00
El coco	24017	0.10	0.11	0.08
El Peñón	24107	-0.21	-0.21	-0.21
El tigre	24028	-0.01	-0.01	-0.01
Gallinas	24031	-0.02	-0.03	-0.01
La Gloria	24133	0.05	0.06	0.04
Las adjuntas	24036	-0.02	-0.01	-0.03
Requetemu	24026	-0.05	-0.05	-0.04
San Dieguito	24064	0.03	0.03	0.03
San Martín	24009	0.03	0.03	0.03
Santa Cruz	24072	0.07	0.07	0.07
Santa Elena	24149	0.00	0.01	-0.02
San Vicente	24113	-0.10	-0.10	-0.09
Tamapatz	24082	-0.05	-0.05	-0.04
Tancuilin	24084	-0.13	-0.13	-0.13
Tanlajás	24087	0.07	0.07	0.07
Tanlu	24136	-0.01	-0.01	-0.01
Tanquián	24085	-0.07	-0.07	-0.07
Tantizohuiche	24088	-0.01	-0.02	-0.01
Temamatla	24091	-0.12	-0.11	-0.13
Tierra Blanca	24092	-0.06	-0.07	-0.05
Tlamaya	24125	0.03	0.03	0.03
Veinte de Nov	24137	0.03	0.02	0.05
Xilitla	24105	-0.16	-0.16	-0.16
Región Huasteca		-0.04	-0.04	-0.04

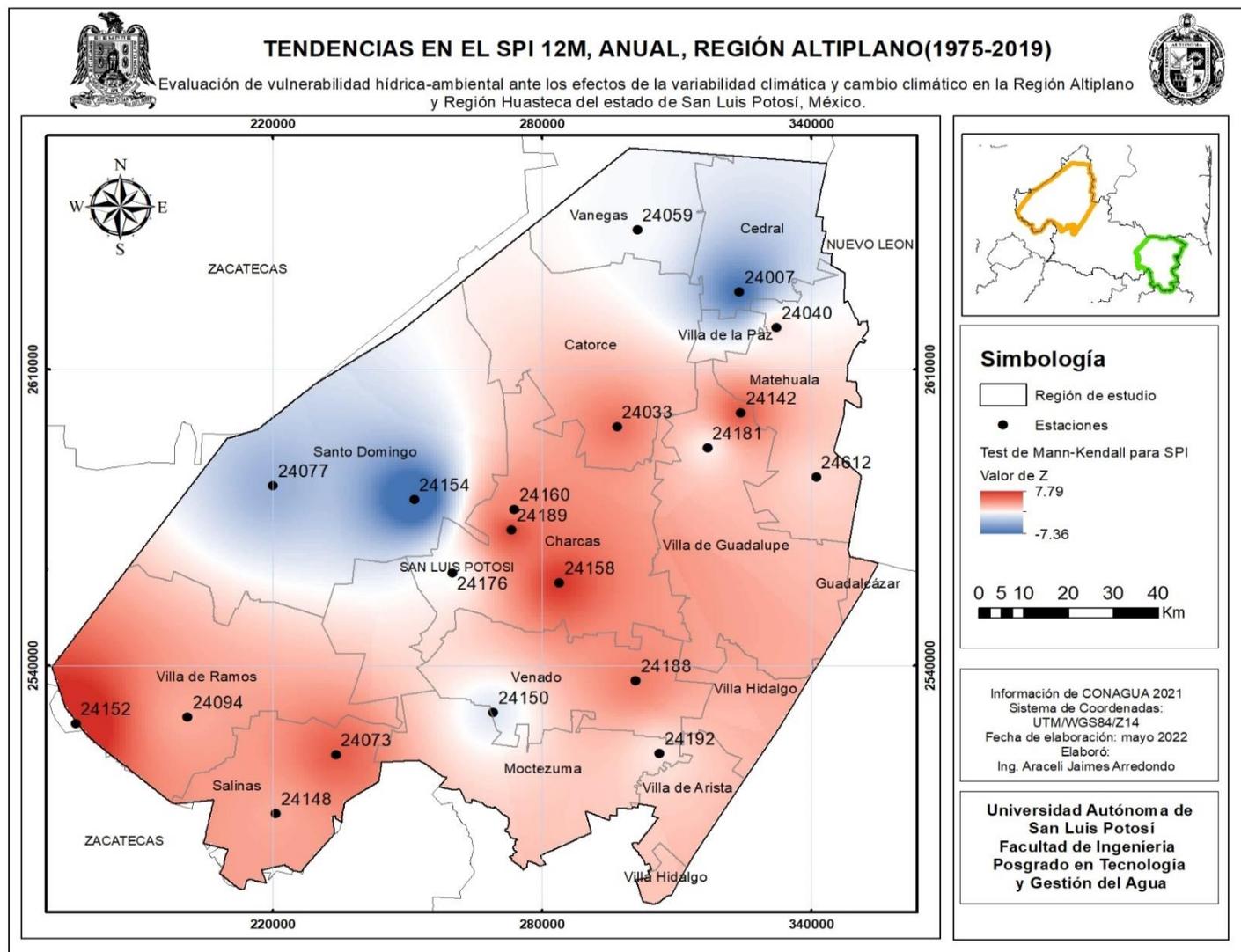


Figura 40. Tendencias en el SPI 12M, anual de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

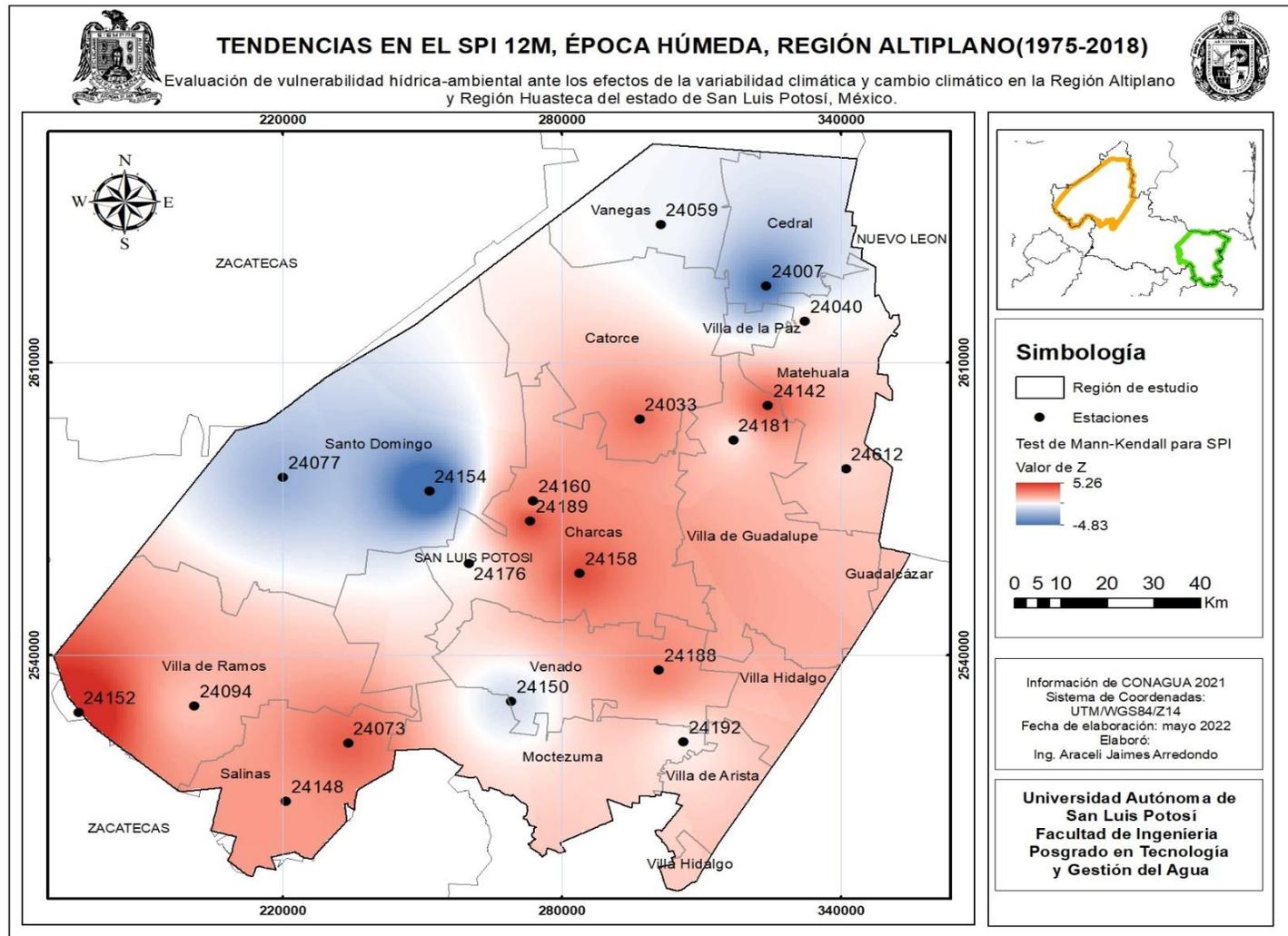


Figura 41. Tendencias en el SPI 12M, época húmeda de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

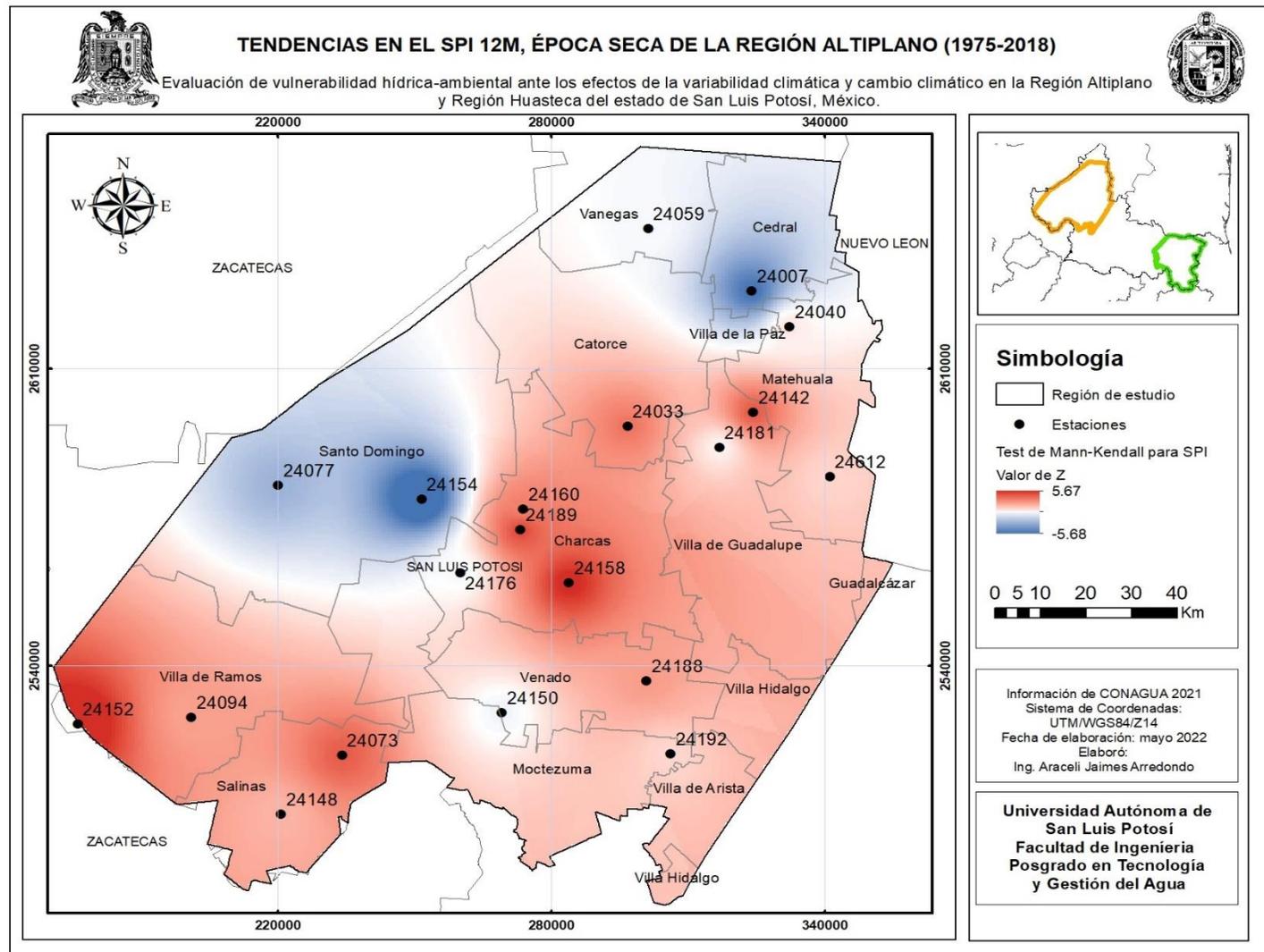


Figura 42. Tendencias en el SPI 12M, época seca de la Región Altiplano (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

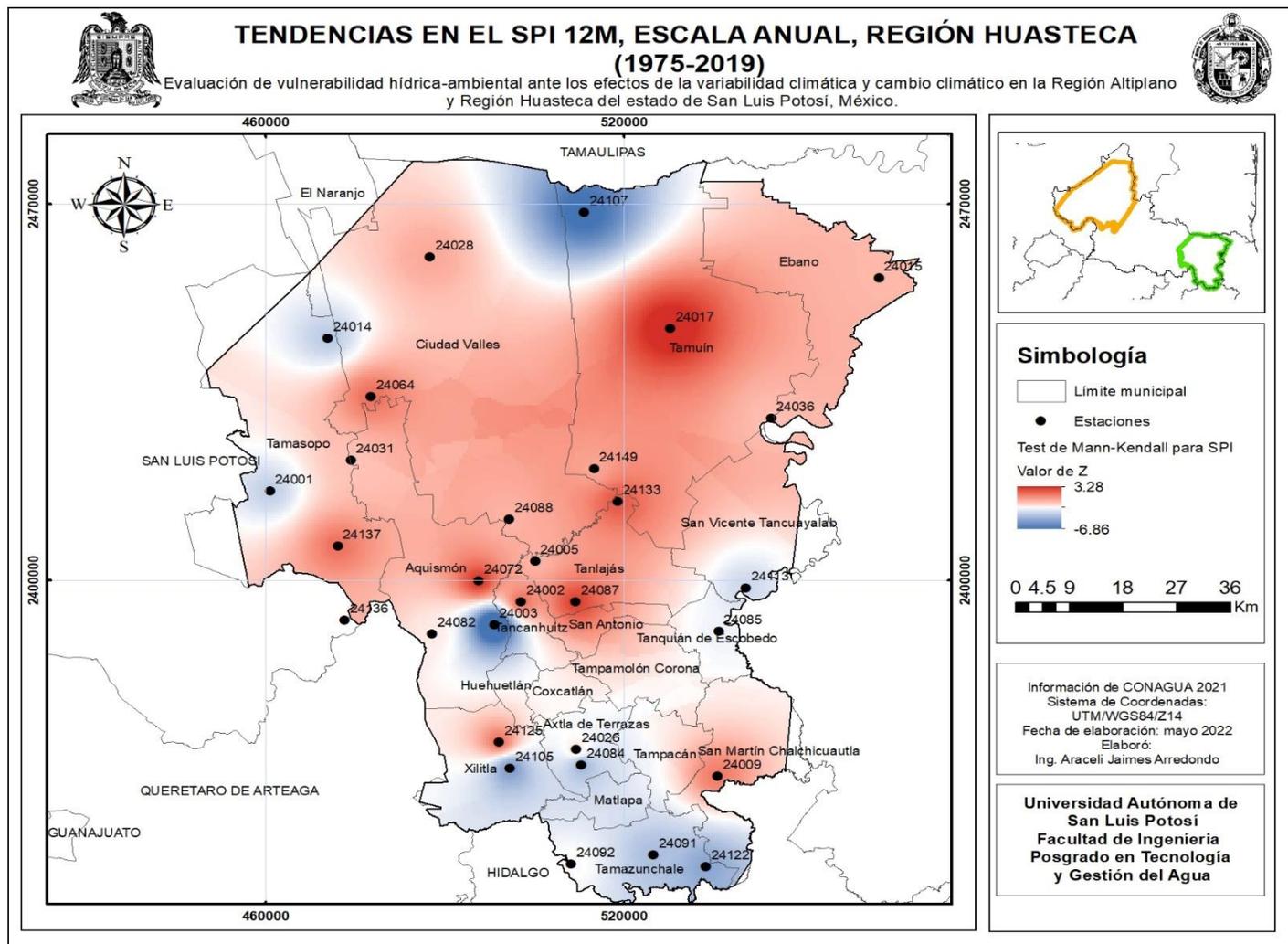


Figura 43. Tendencias en el SPI 12M, anual de la Región Huasteca (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

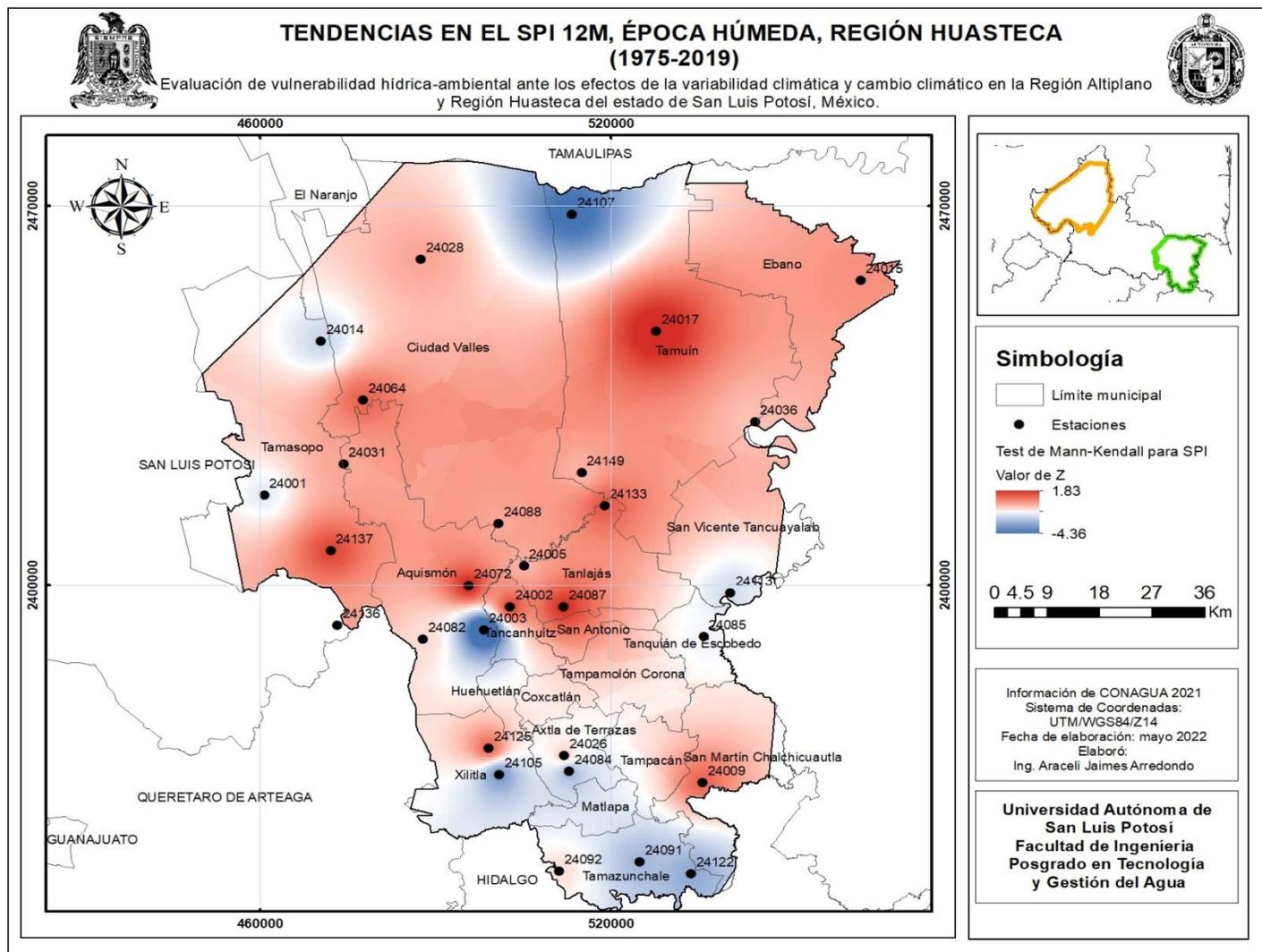


Figura 44. Tendencias en el SPI 12M, época húmeda de la Región Huasteca (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

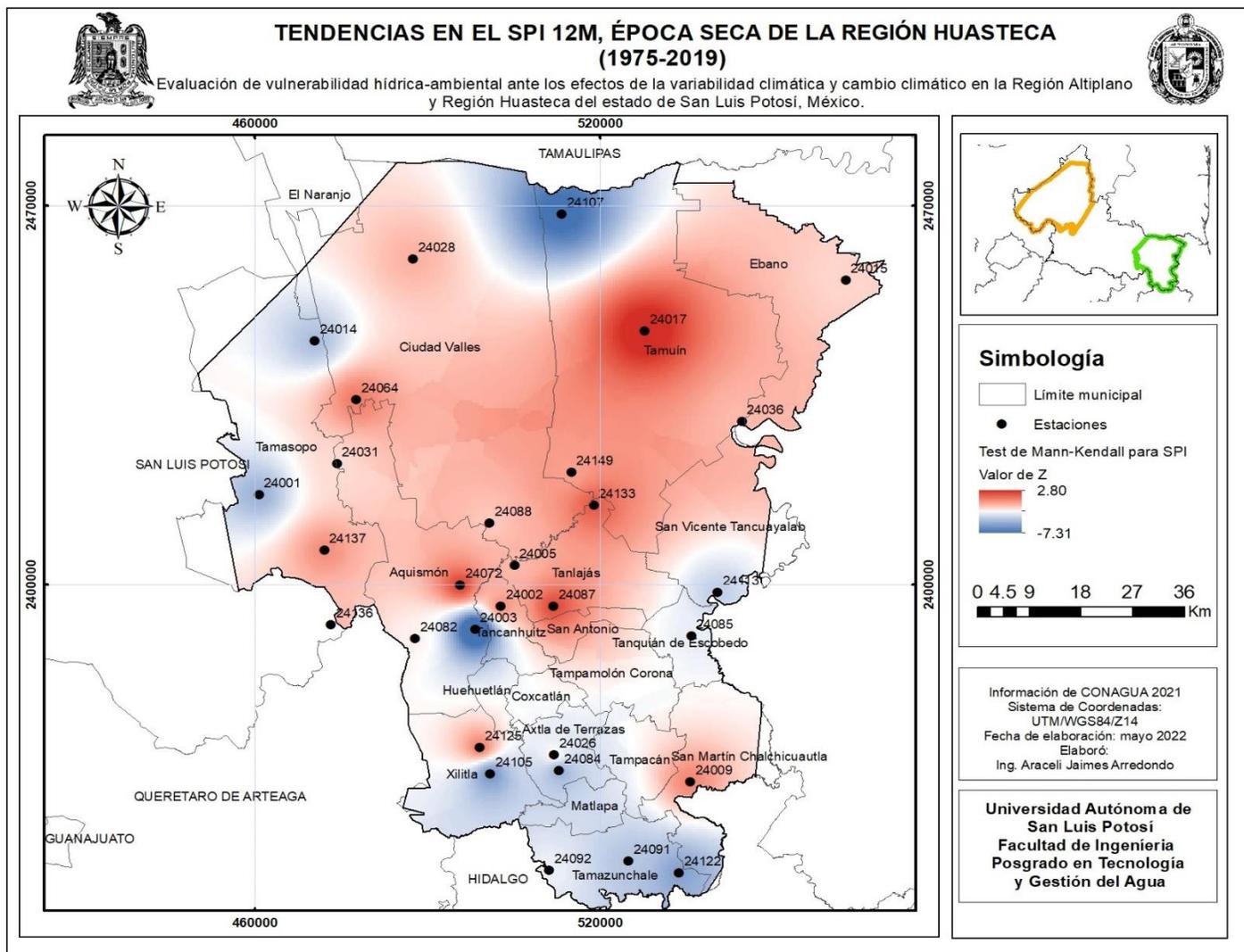


Figura 45. Tendencias en el SPI 12M, época seca de la Región Huasteca. (Elaboración propia, con información de CONAGUA 2021).

CAPITULO 3: EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

3.1 Aspectos generales del cambio climático

Se define como Cambio Climático a la alteración del clima, el cual cambia la composición de la atmósfera del planeta y aumenta la variable del clima presentado durante períodos comparables (LGCC, 2012).

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima presentada durante períodos de tiempo comparables”, así la CMNUCC diferencia, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (IPCC, 2014).

El cambio climático se presenta como una amenaza al pleno disfrute de los derechos humanos. Varios de sus efectos impactan sobre el medio ambiente y provocan situaciones ambientales, sociales y económicas desfavorables para el desarrollo pleno de las sociedades, tales como:

- Reducción del rendimiento en las cosechas o pérdida de éstas.
- Reducción en la disponibilidad del agua para consumo y servicios sanitarios.
- Inundaciones en comunidades (vivienda, caminos, escuelas, hospitales, comercios).
- Migraciones forzadas por la pérdida de las condiciones necesarias para la subsistencia (alimentos, vivienda, empleo, carreteras, fuentes de agua potable).
- Aumento de enfermedades transmitidas por vectores como dengue, malaria, zika, chikungunya y enfermedades relacionadas con la calidad del aire como las ocasionadas por el ozono y las PM2.5.

3.2 Índices de cambio climático (ICC)

Formado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el proyecto de Variabilidad Climática (CLIVAR, por sus siglas en ingles) y la Comisión Conjunta de Oceanografía (JCOMM, por sus siglas en ingles), el Grupo de Expertos en Detección e índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en ingles), ha impulsado a escala global el cálculo de índices de cambio climático a partir de datos diarios. El uso sistemático de estos índices ha permitido mejorar el diagnostico global de cambios en los extremos de temperatura y precipitación (Alexander *et al.*, 2006). Estos índices proveen una base teórica común de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del mundo con la finalidad de comparar e/o integrar los resultados de diversas regiones (Karl, Nicholls, y Ghazi, 1999).

El Cuadro 25. presenta el resumen de los 27 índices del ETCCDI y su descripción.

Cuadro 25. Resumen de los 27 índices del ETCCDI. (Pita-Díaz, 2018).

Código	Descripción	Código	Descripción
CDD	Días secos consecutivos	R5day	Precipitación máxima en 5 días
CSDI	Duración de los periodos fríos	SDII	Índice simple de intensidad diaria
CWD	Días húmedos consecutivos	SU	Días de verano
DTR	Rango diurno de temperatura	TN10p	Noches frías
FD	Días con helada	TN90p	Noches cálidas
GSL	Estación de crecimiento	TNn	Temperatura mínima extrema
ID	Días con hielo	TNx	Temperatura mínima más alta
PRCPTOT	Precipitación total anual	TR	Noches tropicales
R10mm	Días con lluvia mayor a 10mm	TX10p	Días frescos
R20mm	Días con lluvia mayor a 20mm	TX90p	Días calurosos
R95p	Días muy húmedos	TXn	Temperatura máxima más baja
R99p	Días extremadamente húmedos	TXx	Temperatura máxima extrema
Rnnmm	Días con lluvia mayor a nn	WSDI	Duración de los periodos cálidos
RX1day	Precipitación máxima en un día		

3.2.1 Disponibilidad y homogenización de datos diarios

Como ya se mencionó en el capítulo 2, para el análisis de variabilidad climática, la selección de los registros históricos es un requisito para poder realizar adecuadamente el cálculo de pruebas estadísticas, y de igual forma para los índices de cambio climático (ICC). Los ICC se calcularon en el programa R, y fueron necesarios datos diarios, que fueron obtenidos de la página oficial de CONAGUA denominada “Información Estadística Climatológica” disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.

Diferentes autores (Guijarro, 2018; Pita-Díaz, 2018) proponen el paquete de homogeneización de datos climáticos Climatol, desarrollado en el Lenguaje R. Las funcionalidades implementadas incluyen la comparación de cada serie original con una de referencia, así como la inspección gráfica de los datos y sus anomalías. Los errores puntuales, saltos en las medias y tendencias se pueden detectar en las series de diferencias entre los datos originales y los estimados mediante las pruebas paramétricas habituales. Climatol normaliza los datos mediante la división por sus valores medios, además de restar las medias o mediante una estandarización completa.

Las series estimadas a partir de las demás sirven como referencias para sus correspondientes series presentadas, por lo que el siguiente paso es obtener series de anomalías restando valores estimados a los presentados, estas series permitirán:

- Controlar la calidad de las series y eliminar aquellas anomalías que superen n umbral prefijado.
- Comprobar su homogeneidad mediante la aplicación del Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), (Pita-Diaz, 2018)

Para la homogenización de los registros históricos de las estaciones meteorológicas, Climatol necesita dos archivos de entrada, uno con una lista de coordenadas, clave de la estación y nombres de las estaciones enunciados de la siguiente manera: longitud (grados decimales), latitud (grados decimales), elevación (msnm), clave asignado a cada estación y nombre de la estación. El segundo archivo es los datos orden cronológico desde la primera hasta la última estación, (desde el 01 de enero de 1975 al 31 de diciembre del 2016), los datos faltantes se determinan las siglas NA. Estos archivos tendrán distinta extensión: .dat para los datos y .est para las estaciones. Como se presenta en la Figura 46.

x	y	z	code	name
-99.38		21.853	276	SL24001 Agua Buena
-98.973		21.667	60	SL24002 Altamira
-99.016		21.628	33	SL24003 Aquismon
-98.95		21.735	45	SL24005 Ballesmi
-98.655		21.373	212	SL24009 San Martin Chalchicuautla
-99.287		22.11	491	SL24014 Damian Carmona
-98.391		22.21	55	SL24015 Ebano
-98.73		22.126	59	SL24017 El Coco
-98.683		21.87	70	SL24020 El Fiscal
-98.883		21.418	88	SL24026 Requetemu
-99.121		22.247	154	SL24028 El Tigre
-99.249		21.905	314	SL24031 Gallinas
-98.567		21.975	18	SL24036 Las Adjuntas
-99.216		22.012	346	SL24064 San Dieguito
-99.042		21.702	58	SL24072 Santa Cruz
-99.117		21.613	1071	SL24082 Tamapaztl
-98.875		21.392	92	SL24084 Tancuillin
-98.653		21.617	48	SL24085 Tanguian
-98.884		21.667	124	SL24087 Tanlajas
-98.992		21.806	43	SL24088 Tantizohuiche
-98.759		21.241	187	SL24091 Temamatla
-98.892		21.225	398	SL24092 Tierra Blanca
-98.991		21.386	676	SL24105 Xilitla
-98.87		22.322	108	SL24107 El Peñon
-98.609		21.689	45	SL24113 San Vicente Tancuayalab
-98.674		21.22	132	SL24122 Chapulhuacanito
-99.008		21.431	619	SL24125 Tlamaya
-98.817		21.836	33	SL24133 La Gloria
-99.258		21.633	386	SL24136 Tanlu
-99.27		21.76	276	SL24137 Veinte de Noviembre
-98.854		21.89	33	SL24149 Santa Elena

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Date	SL24181	SL24007	SL24158	SL24188	SL24160	SL24162	SL24189	SL24150	SL24033	SL24142	SL24040	
2	01/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
3	02/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
4	03/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
5	04/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
6	05/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
7	06/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
8	07/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
9	08/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
10	09/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
11	10/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
12	11/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
13	12/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
14	13/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
15	14/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
16	15/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
17	16/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
18	17/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
19	18/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA
20	19/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		3	NA	NA
21	20/01/1975	NA		0	NA	NA	NA	NA	NA		0	NA	NA

Figura 46. Archivos de entrada .csv (arriba) y .est (debajo.) para comenzar con la homogeneización en Climatol 3.2.1. (Elaboración propia).

A continuación, en la Figura 47. se presenta un código de programación utilizado en Climatol para determinar los datos faltantes:

```
> library(climatol)
loading required package: maps
loading required package: mapdata
Error in setwd(dir) : cannot change working directory
> setwd("C:/Users/Usuario/Documents/ICC")
> dat<-as.matrix(read.table("datos1_hp_1975_2016.csv",sep=","))
> write(dat,"Ttest_1975-2016.dat")
> estaciones <- read.delim("C:/Users/Usuario/Documents/prueba/estaciones.txt")
> View(estaciones)
> View(dat)
> write.table(estaciones,'Ttest_1975-2016.est',row.names = FALSE, col.names = FALSE)
> homogen('Ttest',1975,2016,expl = TRUE)
> dahstat('Ttest',1975,2016,stat='series')
```

Figura 47. Código de programación para estimar datos faltantes diarios, en Climatol 3.2.1.

Después de analizar la disponibilidad de datos y realizar la homogenización de los datos diarios, se concluyó a analizar los índices de cambio climático de 19 estaciones meteorológicas para la Región Altiplano y 31 para la Región Huasteca para el periodo de 1975 a 2016.

3.2.2 Calculo de índices de Cambio Climático en RCLimDex

ClimDex es un programa basado en Microsoft Excel que proporciona un paquete computacional fácil de usar para el cálculo de Índices de extremos climáticos para monitorear y detectar cambio climático. Fue desarrollado por Byron Gleason del National Climate Data Centre (NCDC) de NOAA, y ha sido usado desde el 2001 (Santos, J.L., 2004). La metodología para calcular los ICC se enlista a continuación:

1. En el prompt de la consola de R ">", digite `source("rclimdex.r")`. Esto cargará RCLimDex en el ambiente R.
2. Los datos ingresados son los datos diarios homogéneos obtenidos de las 50 estaciones de Climatol.
3. Se selecciona "Load Data and Run QC" del Menú RCLimDex para abrir una ventana. Esto permite seleccionar (cargar) el archivo de datos a partir del cual los índices serán calculados. El archivo cargado es de tipo txt. En la primera columna va el año, después el mes, seguido por el día, la precipitación, la temperatura máxima y temperatura mínima; como se presenta en la Figura. 48.

AÑO	MES	DÍA	PREC	TEM MAX	TEM MIN
1975	1	1	6	20	8
1975	1	2	0	19	12
1975	1	3	0	18	8
1975	1	4	0	19	9
1975	1	5	0	19	12
1975	1	6	0	19	11
1975	1	7	0	22	12
1975	1	8	0	26	12
1975	1	9	0	29	12
1975	1	10	0	25	15
1975	1	11	0	19	12
1975	1	12	2	15	12

Figura 48. Archivo de entrada para ingresar los datos diarios a RCLimdex, (Elaboración Propia).

- Se establecen algunos parámetros para el cálculo de los índices, los cuales son: años del periodo, la latitud y longitud de la estación meteorológica analizada, el valor máximo de temperatura máxima, el valor mínimo de temperatura mínima, el valor máximo de temperatura mínima y el valor mínimo de temperatura máxima. Como se presenta en la Figura 49.

Figura 49. Datos complementarios para calcular ICC, en RCLimdex.

- Al finalizar los procesos computacionales tendremos nuevos archivos con los índices generados, cada índice se encontrará individualmente en un archivo.

3.2.3 Tendencias de índices de Cambio Climático

Fueron analizados los 27 ICC para las dos regiones de estudio, los cuales se presentan con nombre, código y definición en el Cuadro 26.

Después de calcular los 27 ICC se llevó a cabo el cálculo de tendencias utilizando la prueba estadística de Mann-Kendall descrita en el capítulo 2, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. En los Cuadros 27 y 28 se exponen los resultados; con color rojo las tendencias estadísticamente significativas de incremento y con azul de decremento, además se encuentran valores de NA (no aplica), donde los valores de los índices mostraban imposibilidad de calcular tendencias.

A continuación, se describen los resultados de las tendencias significativas en los índices de cambio climático. Para la RA en los índices climáticos de **temperatura** se registraron tendencias al cambio significativas en mayor porcentaje en los índices de: TXx con un 78%, Tx90p con un 78%, TNn con una 42% y DTR con un 47%. Y para la RH los índices climáticos de **temperatura** que mayor presentan tendencia al cambio son: SU25 con un 54%, TXn con un 87%, TNn con un 48% y DTR con 45% del total de las estaciones analizadas.

El índice de días de verano (SU25), indica el número de días en un año en que $TX > 25^{\circ}C$. presentó tendencias significativas de incremento en 5 estaciones: 24033, 24059, 24094, 24152, 24158 de los municipios de Catorce, Villa de Ramos, Vanegas, Charcas, al centro y norte de la RA.

El índice de días con helada (FD0) indica el número de días en un año que la temperatura mínima en menor a $0^{\circ}C$. este índice presentó tendencias significativas de incremento en 9 estaciones: 24007, 24033, 24073, 24077, 24094, 24148, 24150, 24610 y 24189 de los municipios de Cedral, Catorce, Salinas, Santo Domingo, Vanegas, Salinas, Charcas y Venado de la RA.

El índice de temperatura máxima extrema (TXx), que se define como el valor máximo anual de la temperatura máxima diaria; es uno de los dos índices que más presentan tendencia significativa al cambio de esta región seca (Figura 51). En el 78% de las estaciones analizadas de la RA se encontraron tendencias significativas al cambio de incremento, en la mayoría superficie (15 estaciones) de la RA se está incrementando la temperatura máxima extrema con una magnitud de cambio desde 0.045 a 0.209 $^{\circ}C/año$.

El índice de temperatura máxima más baja (TXn) que se define como el valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria, presentó tendencias significativas de decremento en un 37% de las estaciones analizadas, las 7 estaciones que presentan decrementos son: 24040, 24073, 24148, 24150, 24158, 24189 y 24192 de los municipios de Matehuala, Salinas, Venado, Charcas y Moctezuma. Con una magnitud de cambio promedio negativa de -0.15 $^{\circ}C/año$.

Para la RA el índice de temperatura mínima más alta (TNx), es el valor máximo anual de la temperatura mínima diaria, presentó tendencias significativas contrastantes de incremento en las estaciones 24040, 24059, 24158, 24188 y 24192 de los municipios de Villa de Ramos, Matehuala, Charcas, Venado y Moctezuma; con una magnitud de cambio positiva promedio

de $0.095^{\circ}\text{C}/\text{año}$ y de decremento en las estaciones 24152 en Villa de Ramos y 24160 en Charcas; con una magnitud de cambio negativa promedio de $-0.03^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

El índice denominado temperatura mínima extrema (TNn) que registra el valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria, presenta tendencias significativas al cambio de decremento en el 42% de las estaciones de la RA. Como se presenta en la Figura 53. Los cambios de decremento ocurren principalmente en el suroeste y centro de la RA, en 8 estaciones: 24077, 240148, 24158, 24160, 24162, 24188, 24189 y 24192; de los municipios de Santo Domingo, Salinas, Charcas, Matehuala, Venado y Moctezuma. Con valores de magnitud de cambio que van desde los -0.092 hasta $-0.217^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

El índice denominado frecuencia de días frescos (Tx10p) es el porcentaje de días en que la temperatura máxima es menor al percentil 10; presentó tendencias significativas al cambio de incremento en las estaciones 24148, 24150, 24154 y 24160 de los municipios de Salinas, Venado, Santo Domingo y charcas respectivamente. No obstante, también presentó tendencias significativas de decremento en las estaciones 24033 en el municipio de Catorce y en la 24094 en el municipio de Vanegas, lo que anomalías en los días frescos en estas zonas de la RA.

Las tendencias de la Frecuencia de días calurosos (Tx90p), que describe el porcentaje en días en que la temperatura máxima es mayor al percentil 90. Es el segundo índice donde más se registran tendencias al cambio de incremento de la RA. Como se presenta en la Figura. 52, en el 78% de las estaciones de la RA, se registraron tendencias significativas con valores de 0.193 a 0.623 días/año. Lo que indica mayor frecuencia de días calurosos en la RA en la mayoría de la superficie de la RA.

El índice denominado frecuencia de noches frías (Tn10p) es el porcentaje de días en que la temperatura mínima es menor al percentil 10. Para la RA presentó tendencias significativas de incremento en un 37% de las estaciones analizadas, las siete estaciones que presentan incrementos son 24003, 24148, 24154, 24158, 24160, 24188 y 24192 en los municipios de Catorce, Salinas, Santo Domingo, Charcas, Venado y Moctezuma.

El índice de frecuencia de noches cálidas (Tn90p) es el porcentaje de días en que la temperatura mínima es mayor al percentil 90. Este índice presentó tendencias positivas y negativas; significativas de incremento en las estaciones 24007, 24040, 24158 y 24192 en los municipios de Cedral, Matehuala, Charcas y Moctezuma respectivamente. Las tendencias significativas de decremento se presentaron en las estaciones 24033 en el municipio de Catorce y en la 24160 en Charcas.

El índice de duración de los periodos cálidos (WSDI) cuantifica el número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con temperatura máxima mayor que el percentil 90, no presentó ninguna tendencia significativa al cambio en la RA.

El índice de duración de los periodos fríos (CSDI) cuantifica el número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con temperatura mínima menor al percentil 90, presentó tendencias significativas de incremento en las estaciones 24154 en Santo Domingo y en la 24192 del municipio de Moctezuma.

Para el rango diurno de temperatura (DTR) cuantifica la media anual de la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, presentó tendencias significativas en 47%

de las estaciones analizadas y todas de incremento, estas anomalías se presentaron en las estaciones 24007, 24033, 24094, 24142, 24148, 24154, 24158, 24162 y 2481 de los municipios de Cedral, Catorce, Vanegas, Villa de Guadalupe, Salinas, Santo Domingo, Matehuala, y Charcas.

Para la RA en los índices climáticos de **precipitación** se registraron tendencias al cambio significativas en mayor porcentaje en los índices de Rx1day, SDII y R10 con cambios en 52%, 42% y 47% de las estaciones analizadas. Para la RH los índices climáticos de precipitación no presentaron tendencias significativas al cambio.

Para la RA el índice de precipitación máxima en un día (Rx1day), se define como el valor máximo anual de la precipitación diaria, presentó tendencias significativas de incremento en las estaciones 24040, 24059, 24152, 24158, 24160, 24162, 2481 y 24192 de los municipios de Matehuala, Villa de Ramos, Charcas, Villa de Guadalupe y Moctezuma; con un valor promedio de 0.53 mm/año. También se presentaron tendencias significativas de decremento en las estaciones 24154 y 24188 en los municipios de Santo Domingo y Venado con una magnitud de cambio de -0.42 mm/año.

El índice de precipitación máxima en cinco días (Rx5day) cuantifica el valor máximo anual de la precipitación registrada en cinco días consecutivos presentó tendencias positivas y negativas, de incremento en las estaciones 24059, 24158 y 24192 en los municipios de Villa de Ramos, Charcas y Moctezuma de la RA con una magnitud de cambio promedio de 0.82 mm/año. Las tendencias significativas de decremento ocurrieron en las estaciones 24142, 24154 y 24181 en los municipios de Villa de Guadalupe y Santo Domingo con una magnitud de cambio promedio de -0.64 mm/año.

Las tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII), se define como la precipitación total anual dividida entre el número de días con precipitación igual o mayor que 1 mm. Como se presenta en la Figura 50. de manera general las tendencias significativas ocurren en la parte suroeste y noroeste de la RA, con tendencia significativa en las estaciones 24040, 24059, 24148, 24158, 24160, 24162 y 24192; con registros de magnitud de cambio desde 0.075 a 0.282 mm/año, en los municipios de Matehuala, Villa de Ramos, Salinas, Charcas y Moctezuma. No obstante, también en el municipio de Villa de Guadalupe se encuentra la estación 24142 con una tendencia significativa al decremento con una magnitud de -0.02mm/año.

El índice de días con lluvia mayor a 10 mm (R10) cuantifica el número anual de días en que la precipitación es igual o mayor a 10 mm presentó cambios tanto positivos como negativos. Las tendencias significativas de incremento se presentaron en las estaciones 24040, 24059, 24158 y 24192 de los municipios de Matehuala, Villa de Ramos, Charcas y Moctezuma con un valor de magnitud de cambio de 0.21 días/año. Las tendencias significativas de decremento se presentan en las estaciones 24007, 24142, 24154, 24181 y 24188 en los municipios de Cedral, Villa de Guadalupe, Santo Domingo y Venado de la RA con un valor de magnitud de cambio de -0.21 días/año.

El índice de días con lluvia mayor a 20 mm (R20) cuantifica el número anual de días en que la precipitación es igual o mayor a 20 mm presentó cambios principalmente positivos en las estaciones 24040, 24148, 24158 y 24162 de los municipios de Matehuala, Salinas y Charcas, con un valor de magnitud de cambio de 0.72 días/año, lo que exhibe que las precipitaciones

son mayores en un periodo menor. En la estación 24154 de Santo Domingo al oeste de la RA se presentó tendencia significativa de decremento.

El índice de días secos consecutivos (CDD), cuantifica el máximo número en un año de días consecutivos con precipitación menor a 1 mm. Presentó tendencias significativas de incremento en las zonas centro, este y norte de la RA, en las estaciones 24040, 24158 y 24192 en los municipios de Matehuala, Charcas y Moctezuma con una magnitud de cambio de 1.48 días/año lo que indica que los días secos consecutivos están aumentando para estas zonas.

El índice de días húmedos consecutivos (CDW) cuantifica el máximo número en un año de días consecutivos con precipitación mayor o igual a 1 mm. Presentó solo tendencias de decremento en la RA, en la parte oeste, este, suroeste y centro, en las estaciones 24040, 24059, 24154, 24158 y 24162 en los municipios de Matehuala, Villa de Ramos, Santo Domingo y Charcas; con una magnitud de cambio de -0.13 días/año.

El índice denominado precipitación total (PRCPTOT), cuantifica la precipitación total anual en días en que la precipitación es igual o mayor a 1 mm. Presentó tendencias significativas de decremento en la parte este y oeste, por debajo del Trópico de Cáncer, y en la parte norte de la RA, en las estaciones 24007, 24142, 24154 y 24181 en los municipios de Cedral, Villa de Guadalupe y Santo Domingo, con una magnitud de cambio negativa de -5.4 mm/año.

Cuadro 26. Índices de cambio climático definidos por el ETCCDI (Vázquez, 2010; Figueroa, 2017).

N°	Nombre	Definición	Código
1	Días de verano	Número de días en un año en que $TX > 25^{\circ}C$	SU25
2	Días con helada	Número de días en un año en que $TN < 0^{\circ}C$	FD0
3	Temperatura máxima extrema	Valor máximo anual de la temperatura máxima diaria	TXx
4	Temperatura máxima más baja	Valor mínimo anual de la temperatura máxima diaria	TXn
5	Temperatura mínima más alta	Valor máximo anual de la temperatura mínima diaria	TNx
6	Temperatura mínima extrema	Valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria	TNn
7	Frecuencia de días frescos	Porcentaje de días en que $TX <$ percentil 10	Tx10p
8	Frecuencia de días calurosos	Porcentaje de días en que $TX >$ percentil 90	Tx90p
9	Frecuencia de noches frías	Porcentaje de días en que $TN <$ percentil 10	Tn10p
10	Frecuencia de noches cálidas	Porcentaje de días en que $TN >$ percentil 90	Tn90p
11	Duración de los periodos cálidos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TX >$ percentil 90	WSDI
12	Duración de los periodos fríos	Número de días en un año que, como mínimo, hay seis días consecutivos con $TN <$ percentil 90	CSDI
13	Rango diario de temperatura	Media anual de la diferencia entre TX y TN	DTR
14	Precipitación máxima en un día	Valor máximo anual de la PPT diaria	Rx1day
15	Precipitación máxima en cinco días	Máxima anual de la PPT registrada en cinco días consecutivos	Rx5day
16	Índice simple de intensidad diaria	PPT total anual dividida entre el número de días con $PPT \geq 1mm$	SDII
17	Días con lluvia mayor a 10 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 10 mm$	R10
18	Días con lluvia mayor a 20 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 20 mm$	R20
19	Días con lluvia mayor a 25 mm	Número anual de días en que $PPT \geq 25 mm$	R25
20	Días secos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT < 1mm$	CDD
21	Días húmedos consecutivos	Máximo número en un año de días consecutivos con $PPT \geq 1mm$	CWD
22	Días de hielo	Número de días en un año en que $TX < 0^{\circ}C$	IDO
23	Duración de la estación de crecimiento	Número de días en un año entre la primera racha de, como mínimo, seis días con $TG > 5^{\circ}C$ y la primera racha después del 1° de julio con, como mínimo, seis días con $TG < 5^{\circ}C$	GSL
24	Días muy húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1 mm$) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 95	R95P
25	Días extremadamente húmedos	PPT total anual (en días en que $PPT \geq 1 mm$) cuando la PPT diaria acumulada es superior al percentil 99	R99P
26	Noches tropicales	Número de días en un año en que $TN > 20^{\circ}C$	TR20
27	Precipitación total	PPT total anual en días en que $PPT \geq 1 mm$	PRCPTOT

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

Cuadro 27. Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de temperaturas extremas (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022).

Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas															
N°	Nombre	Clave	SU25	FD0	T Xx	TXn	TNx	TNn	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p	WSDI	CSDI	DTR
1	Cedral	24007	0.15	0.57	0.13	-0.02	0.03	-0.03	-0.13	0.46	0.10	0.30	NA	NA	0.06
2	La Maroma	24033	1.48	0.30	0.10	0.00	0.00	-0.02	-0.13	0.39	0.11	-0.11	NA	NA	0.07
3	Matehuala (SMN)	24040	-0.36	0.00	0.07	-0.17	0.08	-0.03	0.00	0.13	-0.06	0.25	NA	NA	0.00
4	Villa de Ramos	24059	3.28	0.00	0.14	-0.04	0.12	0.00	-0.01	0.29	NA	NA	NA	NA	0.00
5	Reforma	24073	0.97	0.44	0.05	-0.09	0.00	0.00	-0.05	0.19	-0.03	0.08	NA	NA	0.03
6	Santo Domingo	24077	-0.93	1.84	0.00	-0.10	0.00	-0.20	0.04	0.00	NA	NA	NA	NA	-0.06
7	Vanegas	24094	2.24	0.62	0.11	0.00	0.05	-0.07	-0.23	0.30	0.11	0.06	NA	NA	0.06
8	La Presa	24142	1.96	0.00	0.12	0.00	0.02	0.05	-0.04	0.44	0.05	0.35	NA	NA	0.05
9	Salinas	24148	-0.30	1.00	0.02	-0.13	0.00	-0.13	0.09	0.04	0.22	-0.10	NA	NA	0.04
10	Guanamé	24150	0.85	0.14	0.10	-0.15	0.04	-0.08	0.20	0.23	0.07	0.06	NA	NA	0.01
11	Sauz de Calera	24152	2.01	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.01	0.21	0.15	0.07	NA	NA	0.03
12	San Francisco	24154	-0.14	0.00	0.08	-0.10	-0.02	-0.10	0.42	0.33	0.53	NA	NA	NA	0.04
13	Charcas	24158	1.89	0.00	0.21	-0.22	0.06	-0.16	0.03	0.62	0.24	0.35	NA	NA	0.06
14	Coyotillos	24160	-0.15	1.33	0.00	-0.08	-0.03	-0.14	0.18	0.04	0.27	-0.34	NA	NA	0.05
15	El Carmen	24162	1.96	0.00	0.17	-0.10	0.00	-0.15	-0.18	0.30	0.21	-0.04	NA	NA	0.11
16	Buena Vista	24181	1.96	0.00	0.12	0.00	0.02	0.05	-0.04	0.44	0.05	NA	NA	NA	0.05
17	Coronado	24188	1.96	0.00	0.14	-0.05	0.08	-0.10	0.04	0.28	0.38	NA	NA	NA	0.05
18	El Hospital	24189	0.75	0.46	0.13	-0.13	0.02	-0.07	0.08	0.20	0.07	0.10	NA	NA	0.02
19	San Francisco II	24192	-0.11	1.23	0.11	-0.18	0.14	-0.25	0.17	0.38	0.32	0.47	NA	NA	0.02
20	Agua Buena	24001	0.00	NA	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.12	0.02	NA	NA	0.01
21	Altamira	24002	0.82	NA	0.08	0.07	0.00	0.06	-0.15	SN	0.07	-0.02	NA	NA	0.08
22	Aquismón	24003	0.68	NA	0.06	0.11	0.00	0.09	-0.25	0.11	-0.12	0.07	NA	NA	0.02
23	Ballesmí	24005	0.15	NA	0.00	0.06	-0.07	0.02	-0.02	-0.13	0.21	-0.29	NA	NA	0.04

Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas															
N°	Nombre	Clave	SU25	FD0	T Xx	TXn	TNx	TNn	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p	WSDI	CSDI	DTR
24	San Martín Chalchicuautla	24009	-0.10	NA	0.04	0.10	0.00	0.00	-0.06	-0.02	0.07	-0.02	NA	NA	0.02
25	Damián Carmona	24014	0.55	NA	0.00	0.18	0.00	0.13	-0.23	0.08	-0.16	0.03	NA	NA	0.02
26	Ébano	24015	0.67	NA	0.00	0.18	0.00	0.06	-0.20	0.13	-0.03	0.05	NA	NA	0.03
27	El Coco	24017	0.41	NA	0.06	0.13	0.00	0.05	-0.12	0.08	-0.04	-0.05	NA	NA	0.02
28	El Fiscal	24020	0.29	NA	0.04	0.13	0.00	0.03	-0.05	-0.03	0.11	0.08	NA	NA	0.01
29	Requetemu	24026	0.41	NA	0.01	0.15	0.00	0.10	-0.15	-0.02	-0.12	-0.01	NA	NA	0.01
30	El Tigre	24028	1.04	NA	0.14	0.19	0.04	0.07	-0.28	0.51	-0.29	0.28	NA	NA	0.05
31	Gallinas	24031	0.56	NA	0.00	0.13	0.02	0.07	-0.17	0.09	-0.20	0.27	NA	NA	0.00
32	Las Adjuntas	24036	0.23	NA	0.04	0.10	-0.02	0.03	-0.06	-0.09	0.15	-0.12	NA	NA	0.02
33	San Dieguito	24064	0.09	NA	0.05	0.12	0.00	0.08	-0.10	-0.02	-0.06	0.07	NA	NA	0.00
34	Santa Cruz	24072	0.17	NA	-0.02	0.13	0.03	0.11	-0.09	-0.17	-0.21	0.22	NA	NA	-0.05
35	Tamapazt	24082	0.00	NA	0.03	0.04	-0.04	0.00	-0.13	0.04	0.13	-0.07	NA	NA	0.02
36	Tancuilin	24084	-0.13	NA	0.05	0.10	0.00	0.05	-0.06	-0.20	0.02	-0.03	NA	NA	-0.01
37	Tanquián	24085	0.64	NA	0.06	0.19	0.03	0.10	-0.14	0.10	-0.05	0.13	NA	NA	0.01
38	Tanlajás	24087	0.40	NA	0.04	0.08	0.00	0.08	-0.04	0.01	-0.17	0.19	NA	NA	-0.02
39	Tantizohuiche	24088	0.75	NA	0.09	0.14	0.00	0.08	-0.20	0.36	-0.02	0.05	NA	NA	0.08
40	Temamatla	24091	0.95	NA	0.06	0.10	-0.02	0.02	-0.23	0.15	0.17	-0.18	NA	NA	0.07
41	Tierra Blanca	24092	0.33	NA	0.00	0.08	-0.04	0.00	-0.05	-0.10	0.06	0.03	NA	NA	0.02
42	Xilitla	24105	1.33	NA	0.00	0.14	0.00	0.06	-0.30	0.11	-0.05	-0.09	NA	NA	0.06
43	El Peñon	24107	-0.13	NA	0.00	0.09	0.00	0.06	0.03	-0.18	0.00	-0.10	NA	NA	-0.02
44	San Vicente Tancuayalab	24113	0.62	NA	0.04	0.14	-0.03	0.06	-0.17	-0.06	0.00	-0.12	NA	NA	0.02
45	Chapulhuacanito	24122	0.38	NA	0.00	0.13	0.00	0.07	-0.20	-0.08	-0.13	0.13	NA	NA	-0.01
46	Tlamaya	24125	0.55	NA	0.00	0.14	0.00	0.08	-0.21	0.07	0.03	-0.02	NA	NA	0.03
47	La Gloria	24133	1.00	NA	0.11	0.14	0.00	0.03	-0.24	0.11	-0.09	0.08	NA	NA	0.05

Tendencias de Índices de cambio climático de temperaturas extremas															
N°	Nombre	Clave	SU25	FD0	T Xx	TXn	TNx	TNn	Tx10p	Tx90p	Tn10p	Tn90p	WSDI	CSDI	DTR
48	Tanlú	24136	-0.20	NA	0.00	0.14	0.00	0.13	-0.12	-0.14	-0.12	0.06	NA	NA	-0.03
49	Veinte de Noviembre	24137	1.00	NA	0.06	0.17	0.03	0.12	-0.32	0.20	-0.28	0.22	NA	NA	0.03
50	Santa Elena	24149	0.73	NA	0.02	0.17	0.00	0.08	-0.29	0.26	-0.15	0.03	NA	NA	0.05

Donde NA significa que los datos no aplican para hacer estadístico de Mann-Kendall.

Cuadro 28. Resultados de tendencias de Mann-Kendall, para los ICC de precipitación (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022).

Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación													
N°	Nombre	Clave	Rx1day	Rx5day	SDII	R10	R20	CDD	CWD	R95P	R99P	PRCPTOT	
1	Cedral	24007	-0.25	-0.57	-0.05	-0.19	-0.04	1.08	0.00	-1.13	NA	-5.42	
2	La Maroma	24033	0.00	-0.33	0.01	0.07	0.00	0.65	0.00	0.00	NA	0.34	
3	Matehuala (SMN)	24040	0.43	0.07	0.12	0.17	0.13	1.22	-0.18	2.87	NA	-0.53	
4	Villa de Ramos	24059	0.44	0.40	0.21	0.17	NA	1.14	-0.14	0.96	NA	0.94	
5	Reforma	24073	-0.22	-0.48	0.05	0.09	0.00	0.98	0.00	-0.60	NA	0.26	
6	Santo Domingo	24077	0.00	-0.09	-0.11	-0.14	0.00	-0.07	0.00	0.00	NA	-2.07	
7	Vanegas	24094	-0.14	-0.15	-0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	NA	0.85	
8	La Presa	24142	-0.08	-0.42	-0.02	-0.50	NA	0.00	0.41	-5.61	NA	-8.31	
9	Salinas	24148	0.17	0.50	0.08	0.13	0.08	-0.04	0.00	1.37	NA	1.64	
10	Guanamé	24150	0.20	-0.04	0.02	0.00	0.00	0.27	0.00	1.30	NA	0.02	
11	Sauz de Calera	24152	0.40	0.40	0.06	0.13	0.00	0.49	0.00	1.80	NA	1.71	
12	San Francisco	24154	-0.46	-1.19	-0.05	-0.19	0.01	0.39	-0.08	-1.30	NA	-5.00	
13	Charcas	24158	0.98	1.22	0.21	0.33	0.24	1.00	-0.20	9.03	NA	3.69	
14	Coyotillos	24160	0.73	0.44	0.08	0.00	0.00	0.70	0.00	2.47	NA	-0.53	
15	El Carmen	24162	0.44	0.46	0.28	0.11	0.11	1.31	-0.07	2.21	NA	0.57	
16	Buena Vista	24181	0.44	-0.33	-0.01	-0.07	NA	0.46	0.13	-0.99	NA	-2.87	

Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación												
N°	Nombre	Clave	Rx1day	Rx5day	SDII	R10	R20	CDD	CWD	R95P	R99P	PRCPTOT
17	Coronado	24188	-0.43	-0.43	-0.02	-0.10	NA	0.33	0.13	-1.94	NA	-3.34
18	El Hospital	24189	-0.10	-0.40	0.01	-0.13	NA	0.74	0.07	-1.29	NA	-1.24
19	San Francisco II	24192	0.39	0.85	0.16	0.17	NA	2.22	0.00	2.14	NA	1.05
20	Agua Buena	24001	1.03	0.46	0.21	0.09	0.22	0.30	-0.12	9.67	NA	6.48
21	Altamira,	24002	0.28	-0.14	0.03	-0.07	-0.13	0.07	0.00	-0.38	0.00	-0.95
22	Aquismon	24003	-0.50	-1.74	0.12	0.00	0.10	0.08	0.00	-2.15	-0.56	2.34
23	Ballesmí	24005	-0.16	-0.73	0.06	0.09	0.00	0.18	0.00	-3.02	0.00	-0.88
24	San Martín Chalchicuautla	24009	0.14	0.51	0.08	0.14	0.24	0.00	0.06	2.44	0.00	7.29
25	Damián Carmona	24014	-0.25	-0.40	0.00	0.18	0.00	0.09	0.04	-5.83	0.00	-1.25
26	Ébano	24015	-0.05	0.57	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	0.00	1.35
27	El Coco	24017	0.17	0.41	0.09	0.08	0.16	0.32	0.00	3.35	NA	3.64
28	El Fiscal	24020	0.13	0.62	0.09	0.03	0.00	0.25	0.00	2.14	0.00	2.61
29	Requetemu	24026	-0.31	-1.37	-0.03	0.11	0.00	-0.09	0.00	-6.09	0.00	-2.53
30	El Tigre	24028	-0.12	-0.46	-0.07	-0.17	-0.05	-0.18	0.00	0.36	0.00	-1.12
31	Gallinas	24031	0.11	-0.29	0.04	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.81	0.00	-1.81
32	Las Adjuntas	24036	0.23	0.64	0.04	-0.06	0.00	0.28	0.00	0.96	0.00	0.59
33	San Dieguito	24064	0.07	-0.51	-0.06	0.05	0.00	-0.25	0.00	-3.28	0.00	0.45
34	Santa Cruz	24072	0.00	-0.43	-0.06	0.00	0.05	0.00	0.00	-0.85	0.00	2.05
35	Tamapazt	24082	-0.25	0.83	0.02	0.00	-0.07	0.05	0.06	-1.25	0.00	-3.87
36	Tancuilin	24084	0.35	-2.14	0.01	-0.26	-0.20	-0.05	-0.05	0.40	0.02	-10.82
37	Tanquián	24085	0.13	-0.22	-0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	-1.66	0.00	-0.95
38	Tanlajás	24087	0.69	-0.37	0.08	0.10	0.00	0.11	0.00	3.17	0.00	3.72
39	Tantizohuiche	24088	0.00	-0.35	0.05	0.00	0.03	0.36	0.00	-0.25	0.00	1.00
40	Temamatla	24091	0.05	-0.33	0.02	-0.09	0.00	-0.06	0.04	-0.32	0.00	-2.91
41	Tierra Blanca	24092	-0.18	-0.28	0.06	-0.03	0.04	-0.04	0.00	2.62	0.00	3.07

Tendencias de Índices de cambio climático de precipitación												
N°	Nombre	Clave	Rx1day	Rx5day	SDII	R10	R20	CDD	CWD	R95P	R99P	PRCPTOT
42	Xilitla	24105	0.00	-1.99	0.03	-0.20	-0.09	0.00	-0.03	-1.37	0.00	-8.30
43	El Peñon	24107	-0.28	-0.24	0.05	-0.04	0.00	0.44	0.00	1.15	0.00	-1.36
44	San Vicente Tancuayalab	24113	0.40	0.46	0.05	-0.07	0.00	0.15	0.00	0.77	0.00	-0.20
45	Chapulhuacanito	24122	-0.27	-0.91	0.04	-0.11	-0.13	-0.10	0.00	-2.36	0.00	-7.35
46	Tlamaya	24125	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.04	0.00	4.57	0.00	0.23
47	La Gloria	24133	0.63	-0.30	0.08	0.00	0.00	0.16	0.00	2.55	0.00	-0.03
48	Tanlu	24136	0.68	1.10	0.10	0.11	0.06	0.36	0.00	2.17	0.00	1.39
49	Veinte de Noviembre	24137	0.30	-0.38	0.17	0.00	-0.12	0.09	0.00	3.71	0.00	-1.60
50	Santa Elena	24149	0.34	-0.05	0.11	0.08	0.00	0.44	0.00	-0.21	NA	1.04

Donde NA significa que los datos no aplican para hacer estadístico de Mann-Kendall

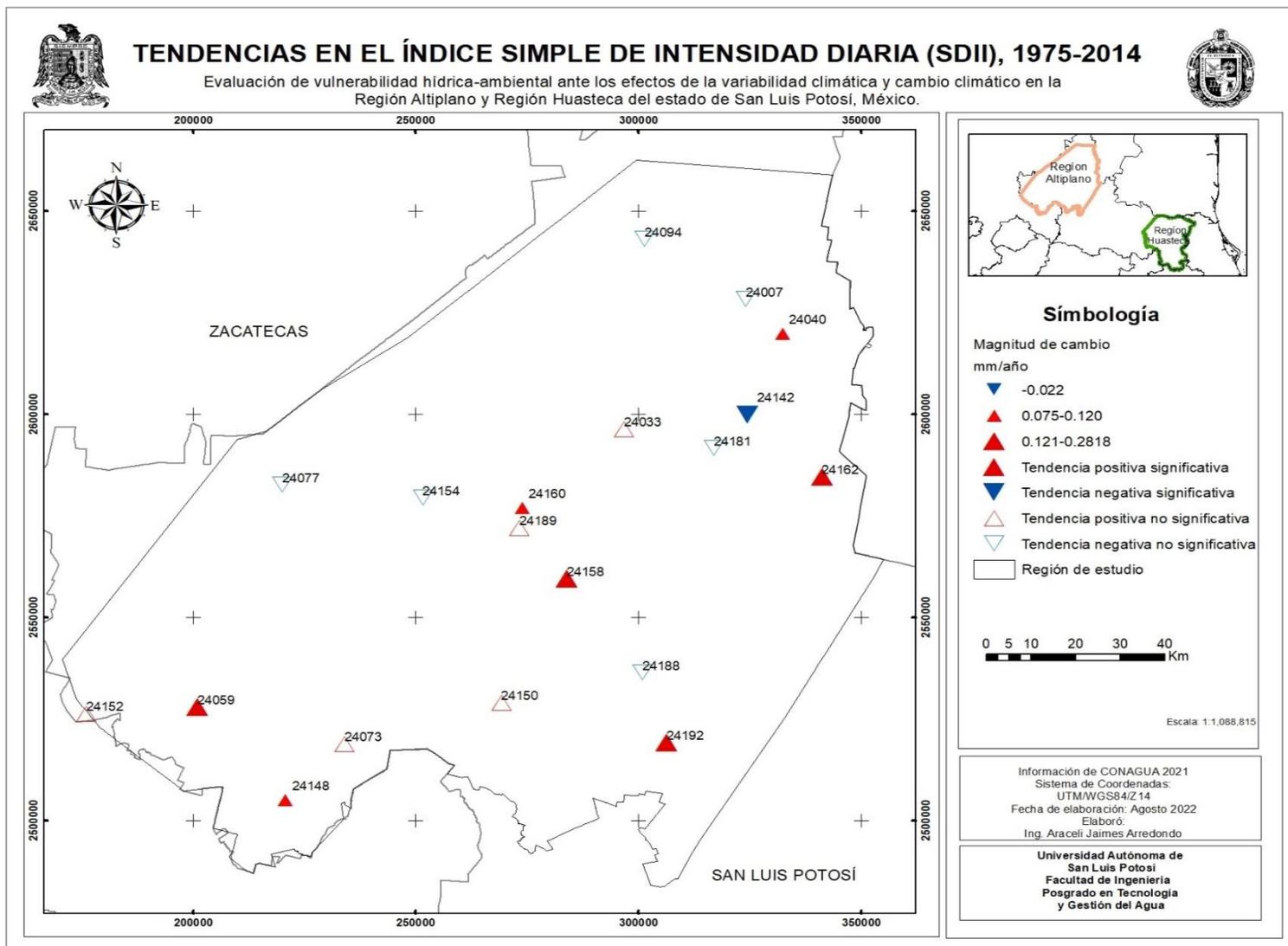


Figura 50. Tendencias en el Índice simple de intensidad diaria de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).

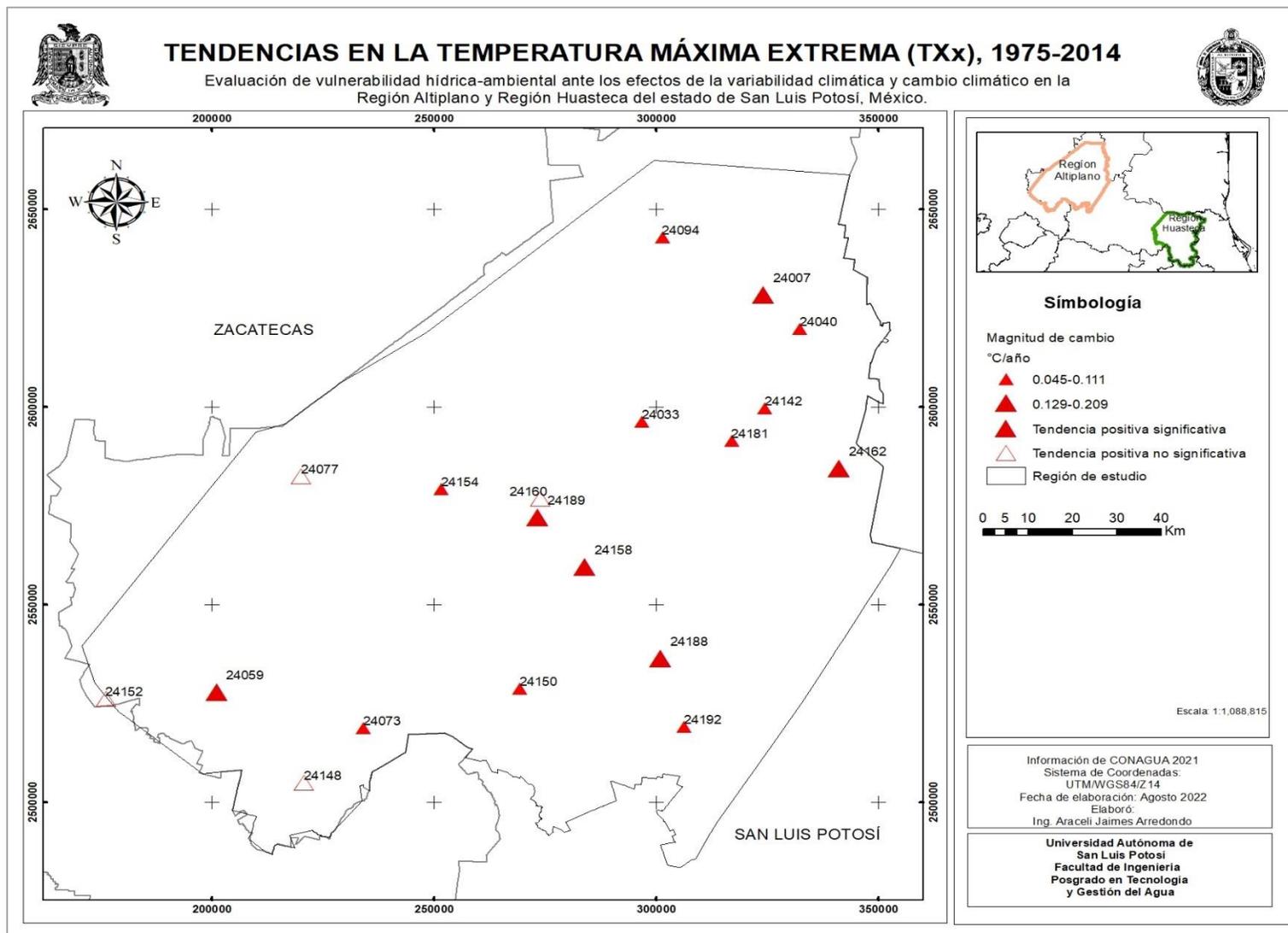


Figura 51. Tendencias en la temperatura máxima extrema de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).

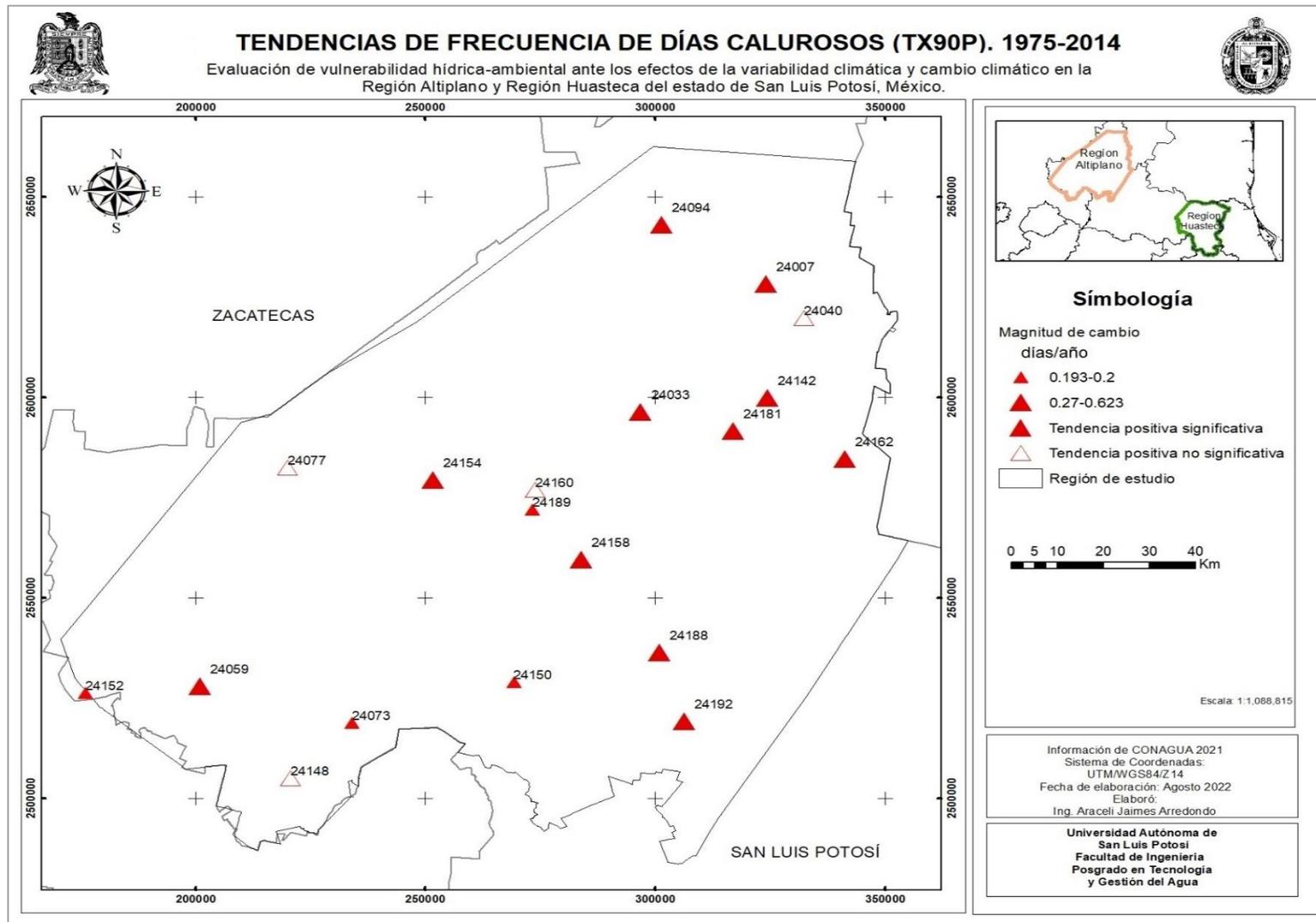


Figura 52. Tendencias en la frecuencia de días calurosos de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).

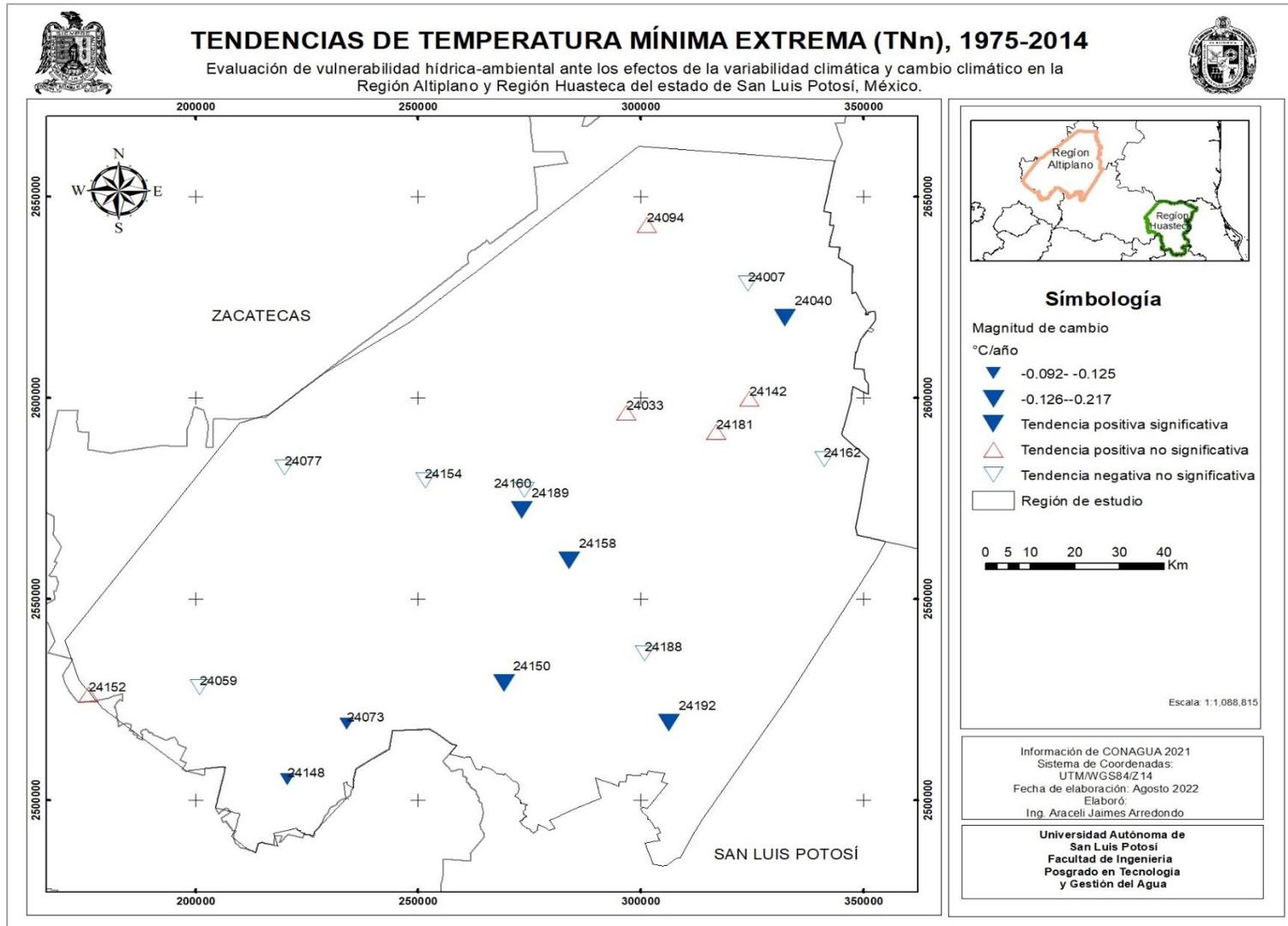


Figura 53. Tendencias en la temperatura mínima extremas de la RA. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2022).

El índice de días de verano (SU25) de la RH se presenta en la Figura 55. e indica el número de días en un año en que la temperatura máxima es mayor a 25°C. En esta región húmeda de San Luis Potosí, se presentaron tendencias significativas de incremento en un 54% de las 31 estaciones analizadas, lo que indica que en más de la mitad de la región hay un incrementando de los días con temperaturas mayores a 25° de temperatura máxima, con valores desde 0.4 a 1.3 días/año. Las estaciones que presentan tendencia significativa al incremento significativa de días de verano son las denominadas con clave: 24002, 24003, 24014, 24015, 24017, 24026, 24028, 24031, 24085, 24087, 24088, 24091, 24105, 24113, 24133, 24137, 24149, de los municipios de Tanchuítz, Aquismón, Tamasopo, Ébano, Tamuín, Axtla de Terrazas, Cd. Valles, Tanquián de Escobedo, Tanlajás, Tamazunchale, Xilitla y San Vicente Tancuayalab.

El índice de temperatura máxima extrema (TXx) cuantifica el valor máximo anual de la temperatura máxima diaria, presentó tendencias significativas de incremento en la parte oeste de la RH, en las estaciones 24028, 24088, 24133 y 24137 de los municipios de Ciudad Valles, Tanlajás y Tamasopo con una magnitud de cambio de 0.80 °C/año.

El índice de días con helada (FD0) indica el número de días en un año que la temperatura mínima en menor a 0°C. no presenta tendencias significativas al cambio para la RH.

En la Figura 56. los resultados indican que las tendencias en el índice de temperatura máxima más baja (TXn), se presentaron tendencias significativas en 87% de las 31 estaciones analizadas, con una magnitud de cambio de 0.083 a 0.19°C/año. De manera general esto indica cambio en la mayor superficie de la RH en los valores mínimos anuales de la temperatura máxima más baja diaria.

Para la RH el índice de temperatura mínima más alta (TNx), es el valor máximo anual de la temperatura mínima diaria, presentó tendencias significativas contrastantes de incremento en las estaciones 24028, 24031, 24072, 2408 y 24137 en los municipios de Ciudad Valles, Aquismón, Tanquián de Escobedo y Tamasopo (centro y oeste de la RH) con una magnitud e cambio de 0.031°C/año, y de decremento en las estaciones 24005, 24036, 24064, 24082, 24091, 24092, 24105, 24107, y 24113 en los municipios de Tanlajás, Tamuín, Ciudad Valles, Aquismón, Tamazunchale, Xilitla y San Vicente Tancuayalab, con una magnitud de cambio promedio de -0.027 °C/año.

Las tendencias en el índice de temperatura mínima extrema (TNn) se presentan en la Figura 57. se encontraron tendencias en 48% de los registros analizados de la RH. De manera general todos estos cambios ocurren en la parte noroeste y suroeste; este índice indica que el valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria está aumentando, con una magnitud de cambio de entre 0.06 a 0.13°C/año; esto se presentó en las estaciones 24003, 24014, 24015, 24026, 24028, 24031, 24064, 24072, 24085, 24087, 24088, 24152, 24136, 24137 y 24149, pertenecientes a los municipios de Aquismón, Tamasopo, Ébano, Axtla de Terrazas, Cd. Valles, Tanquián de Escobedo, Tanlajás, Xilitla y Tamuín.

El índice denominado frecuencia de días frescos (Tx10p) es el porcentaje de días en que la temperatura máxima es menor al percentil 10; presentó solamente tendencias significativas de decremento en las estaciones 24002, 24003, 24014, 24015, 24017, 24026, 24028, 24031, 24064, 24088, 24091, 24105, 24113, 24122, 24125, 24133, 24137 y 24149 en los municipios de Tancanhuitz, Aquismón, Tamasopo, Ébano, Tamuín, Axtla de Terrazas, Ciudad Valles, Tamazunchale, Xilitla, San Vicente Tancuayalab y Tanlajás. Lo que exhibe que en la mayor parte de la RH se están decrementando los días frescos.

Las tendencias de la frecuencia de días calurosos (Tx90p) describe el porcentaje en días en que la temperatura máxima es mayor al percentil 90, presentó tendencias contrastantes, significativas de incremento en las estaciones 24088, 24091, 24137 y 24149 en los municipios de Ciudad Valles, Tamazunchale, Tamasopo y Tamuín. Mientras que de decremento en las estaciones 24005, 24072, 24084, 24107 y 24136 en los municipios de Tanlajás, Aquismón, Tamazunchale y Tamuín.

El índice denominado frecuencia de noches frías (Tn10p) es el porcentaje de días en que la temperatura mínima es menor al percentil 10. En la RH este índice presentó tendencias contrastantes ya que en varios municipios se presentan tendencias positivas y negativas. Las tendencias significativas de incremento se presentan en las estaciones 24005, 24036, 24082, 24091 y 24136 en los municipios de Tanlajás, Tamuín, Aquismón y Tamazunchale. Las tendencias significativas de decremento se presentaron en las estaciones 24003, 24014, 24026, 24028, 24031, 24072, 24087, 24107, 24122, 24137 y 24149 en los municipios de Aquismón, Tamasopo, Axtla de Terrazas, Ciudad Valles, Tanlajás, Tamuín y Tamazunchale.

El índice de frecuencia de noches cálidas (Tn90p) es el porcentaje de días en que la temperatura mínima es mayor al percentil 90. Este índice presente tendencias contrastantes tanto positivas como negativas. Presenta tendencias significativas de incremento en las estaciones 24028, 24031, 24072, 24087, 24122 y 24137 en los municipios de Ciudad Valles, Aquismón, Tanlajás, Tamazunchale y Tamasopo. Las tendencias significativas de decremento se presentan en las estaciones 24005, 24091, 24107 y 24113 en los municipios de Tanlajás, Tamazunchale, Tamuín y San Vicente Tancuayalab.

Los índices de duración de los periodos cálidos (WSDI) y de duración de los periodos fríos (CSDI) no presentaron tendencias significativas al cambio en la RH.

Para el rango diurno de temperatura (DTR) que cuantifica la media anual de la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, presentó tendencias significativas en el 45% de las estaciones analizadas de la RH. Las tendencias significativas de incremento se presentaron en las estaciones 24001, 24002, 24003, 24005, 24015, 24028, 24088, 24091, 24092, 24105, 24113, 24133 y 24149 de los municipios de Tamasopo, Aquismón, Tanlajás, Ébano, Ciudad Valles, Tamazunchale, Xilitla y San Vicente Tancuayalab.

Como se logra presentar en los resultados de los índices climáticos descritos en los Cuadros 27 y 28, y en las Figuras 50 a la 57, los mayores indicios de anomalías climáticas ocurren para las variables extremas de temperatura, tanto para la Región Huasteca y la Región Altiplano analizadas. Con respecto a la variable precipitación los mayores indicios de cambio climático se presentan para la región seca; la Región Altiplano de San Luis Potosí.

Las tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII) en la RH, que se define como la precipitación total anual dividida entre el número de días con precipitación igual o mayor que 1 mm, como se presenta en la Figura 54. presentó tendencias en un 13% de las estaciones analizadas de la RH; las tendencias significativas ocurren en la parte oeste de la RH, con tendencia significativa en las estaciones 24001, 24020, 24136 y 24137 con registros de magnitud de cambio desde 0.09 a 0.21 mm/año. En los municipios de Tamasopo y San Vicente Tancuayalab.

.

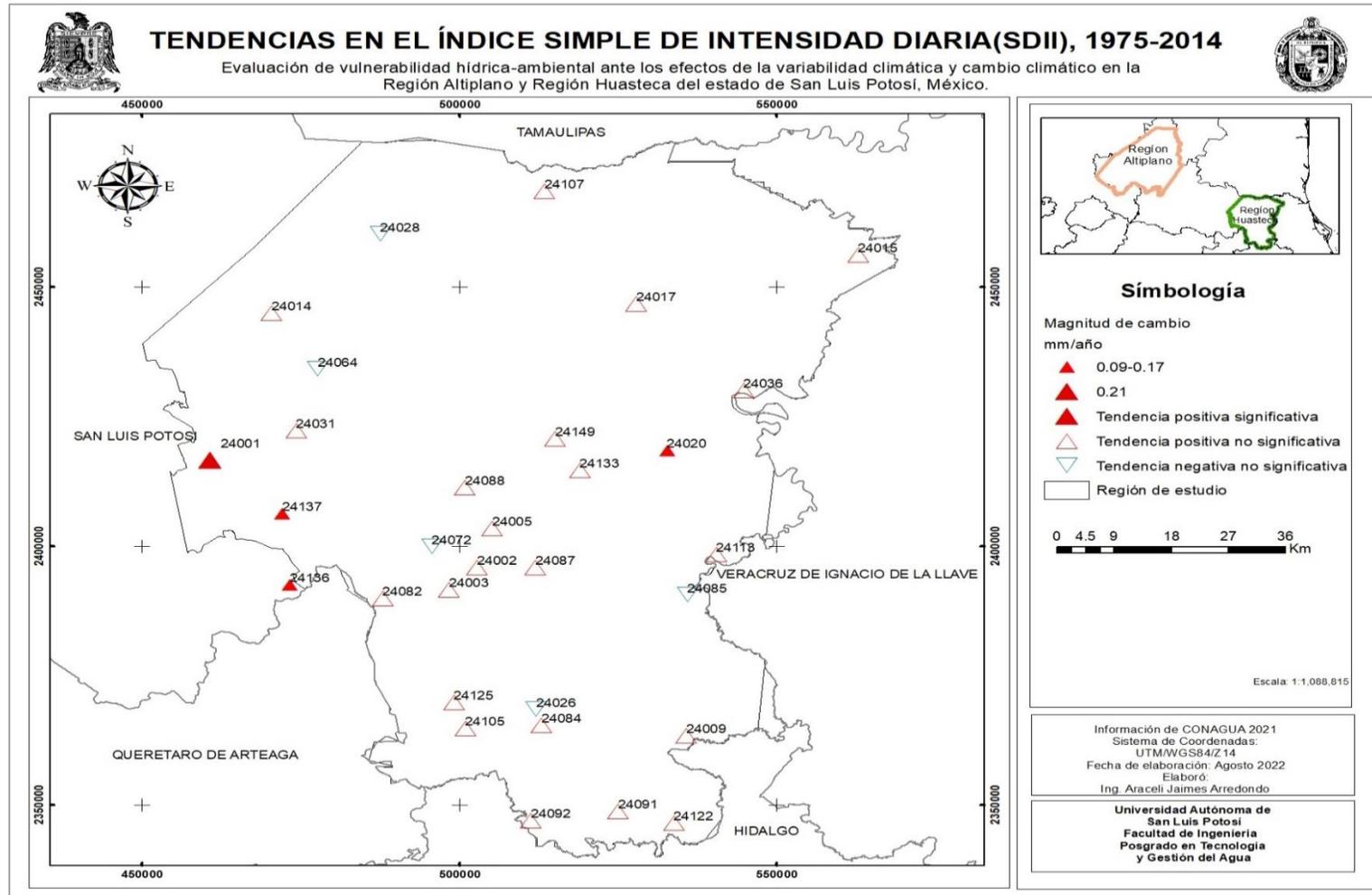


Figura 54. Tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2022).

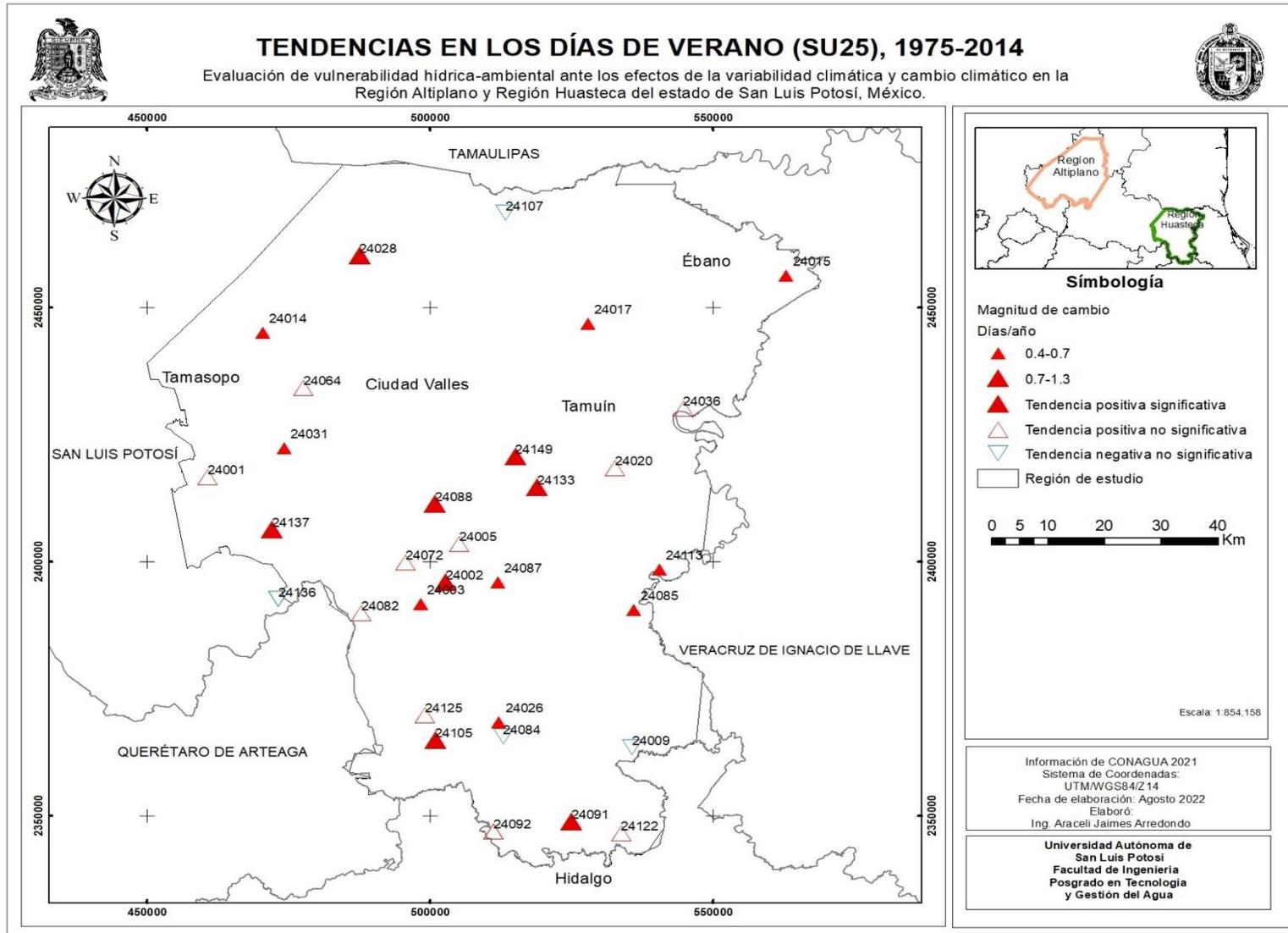


Figura 55. Tendencias en los días de verano (SU25) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).

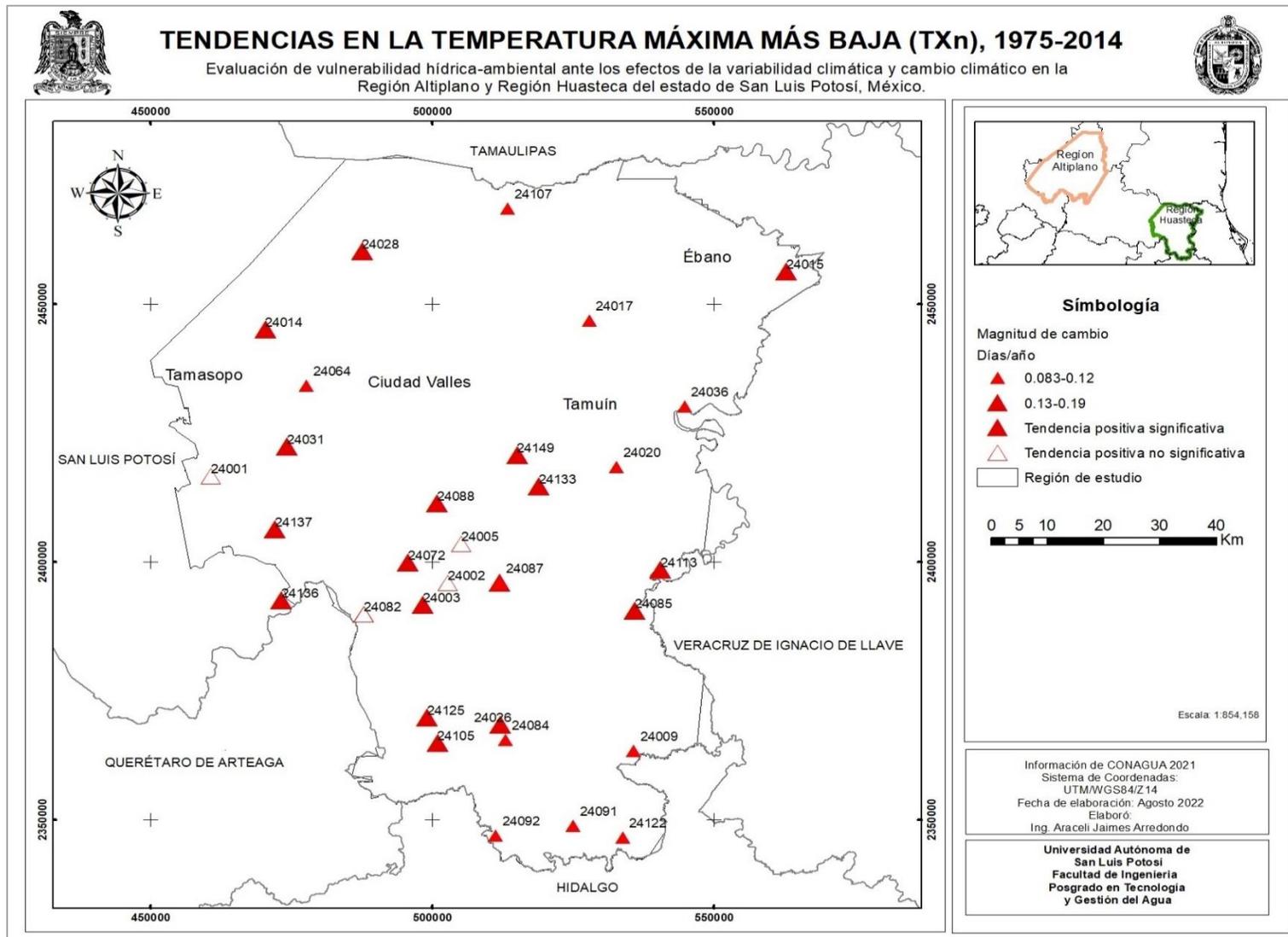


Figura 56. Tendencias de la temperatura máxima más baja (TXn) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).

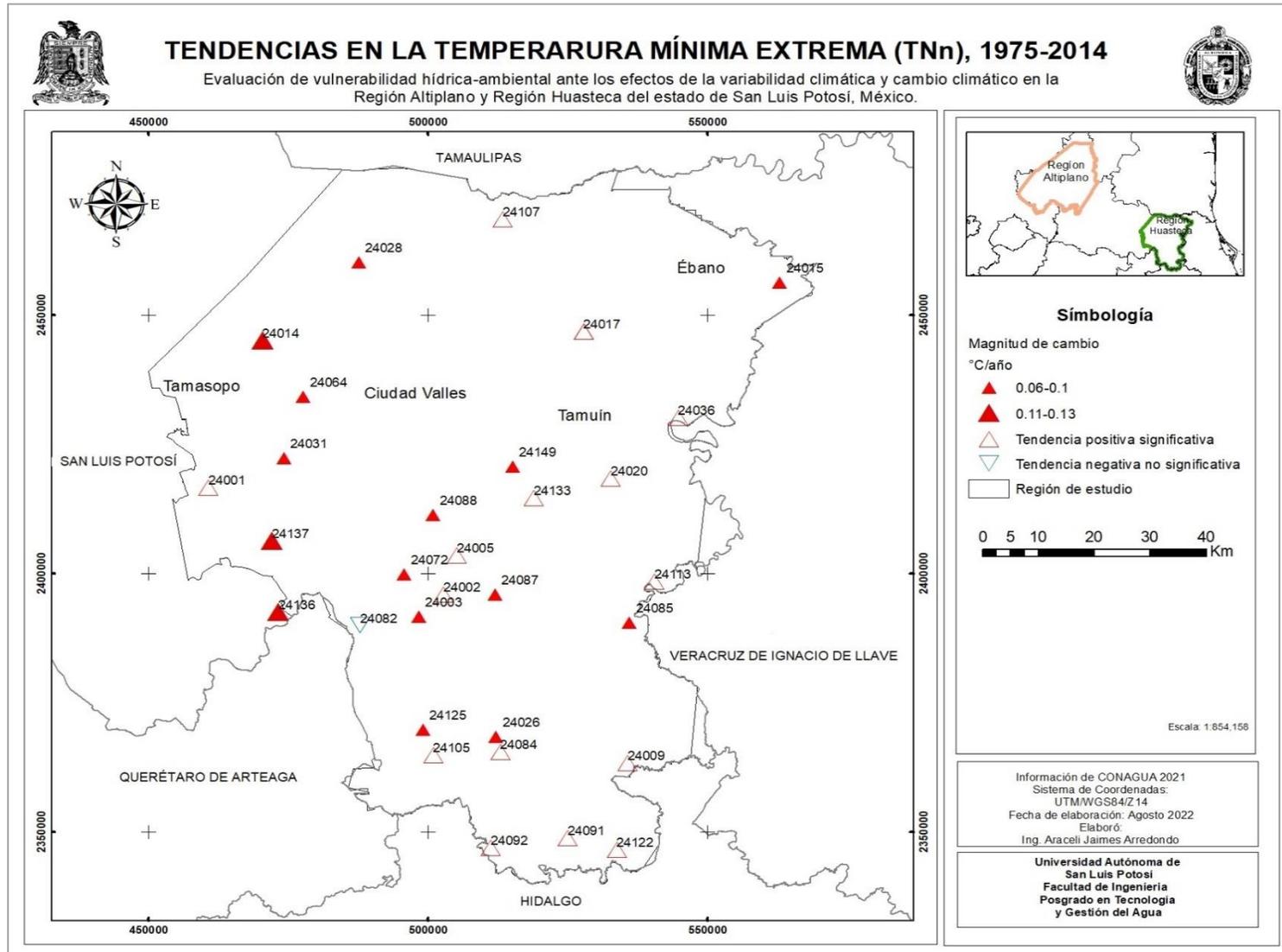


Figura 57. Tendencias de la temperatura mínima extrema (TNn) de la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2021).

3.2.4 Análisis integral de variabilidad climática y cambio climático

Se realizó un análisis integral con los resultados de variabilidad climática e índices de cambio climático. En la Figura 58. se presenta los resultados obtenidos de magnitud de cambio de temperatura promedio anual, con los índices climáticos de TX90P (Frecuencia de días calurosos) y TX10P (Frecuencia de días frescos) de la Región Altiplano y Región Huasteca.

Se evidenció un comportamiento similar en la RA en los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático; las estaciones donde se presenta variabilidad climática (tendencia significativa de incremento) de temperatura promedio (24007, 24040, 24142, 24033, 24181, 24176, 24158 y 24073) localizadas geográficamente en el norte y centro de la RA; presentan indicios de cambio climático en el índice de frecuencia de días calurosos (TX90P).

Las estaciones 24094 en Vanegas y la 24033 en Catorce presentan tendencia significativa al incremento en los valores de temperatura promedio anual, tendencia significativa al incremento en el índice de frecuencia de días calurosos (TX90P) y tendencia significativa al decremento en el índice de frecuencia de días frescos (TX10P), ambos índices se comportan de forma inversamente proporcional en estas dos estaciones. Las estaciones 24154 en Santo Domingo y 24160 en Charcas presentan tendencia significativa al decremento de temperatura promedio e incremento en la frecuencia de días frescos.

En la Figura 59. se presenta los resultados obtenidos de magnitud de cambio de temperatura promedio anual, con los índices climáticos de TX90P (Frecuencia de días calurosos) y TX10P (Frecuencia de días frescos) de la Región Huasteca. Se evidenció un comportamiento similar en la RH en los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático; las estaciones donde se presenta variabilidad climática (tendencia significativa de incremento) de temperatura promedio (24137, 24149, 24088, 24091) localizadas geográficamente en el oeste, centro y sur de la RH; presentan indicios de cambio climático con incremento en la frecuencia de días calurosos (TX90P) y decremento en la frecuencia de días frescos (TX10P).

Las estaciones 24028, 24014, 24015, 24017, 24031, 24133, 24003, 24125, 24105, 24026, 24122; presentan tendencia significativa al incremento de temperatura promedio anual y en cuanto a cambio climático presentan tendencia significativa al decremento de frecuencia de días frescos (TX10P). Lo que evidencia un comportamiento en el sistema de la RH donde está aumentando la temperatura promedio, así como la temperatura máxima más baja.

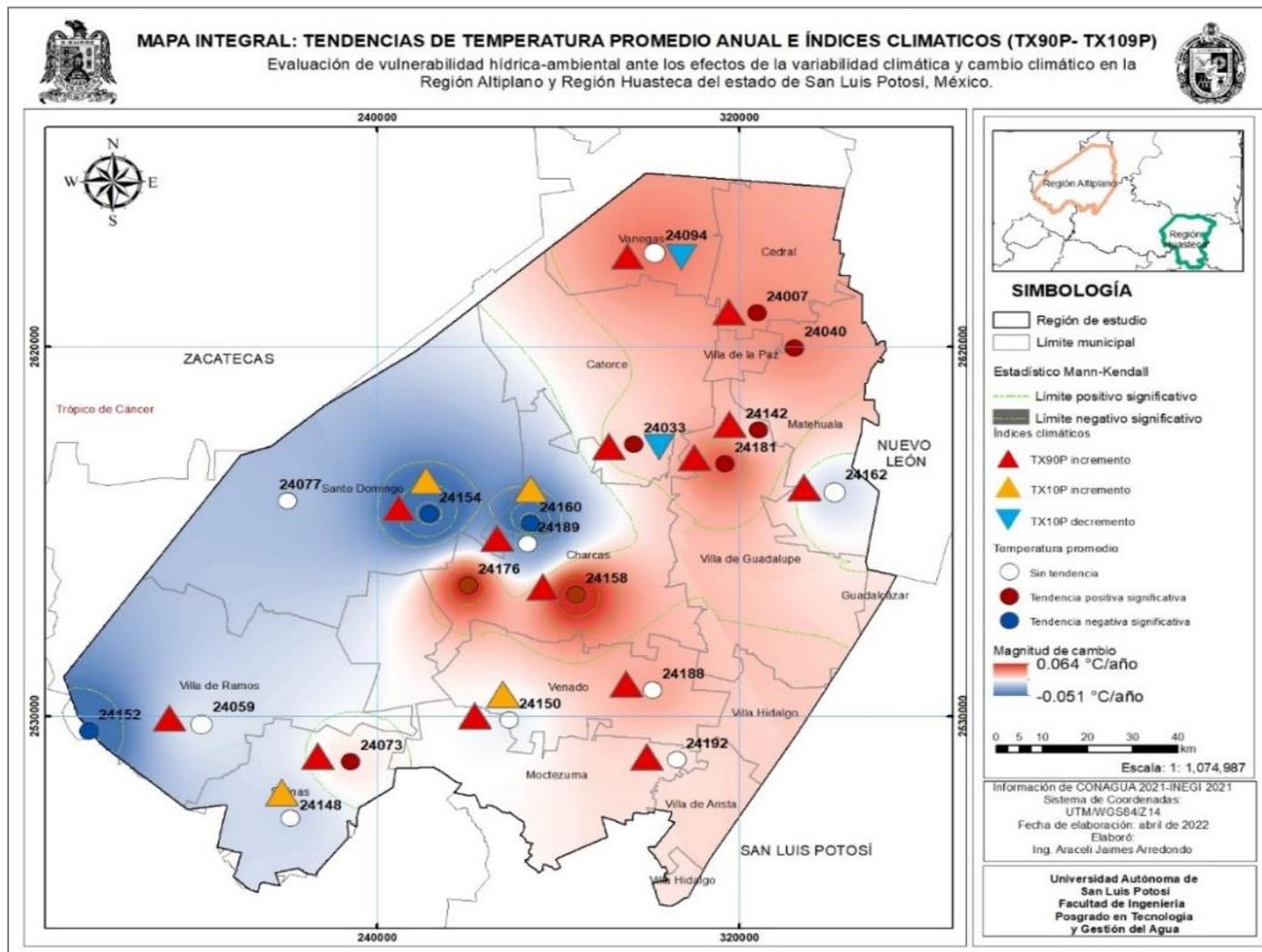


Figura 58. Mapa integral de temperatura promedio anual, TX90P y TX10P en la RA.

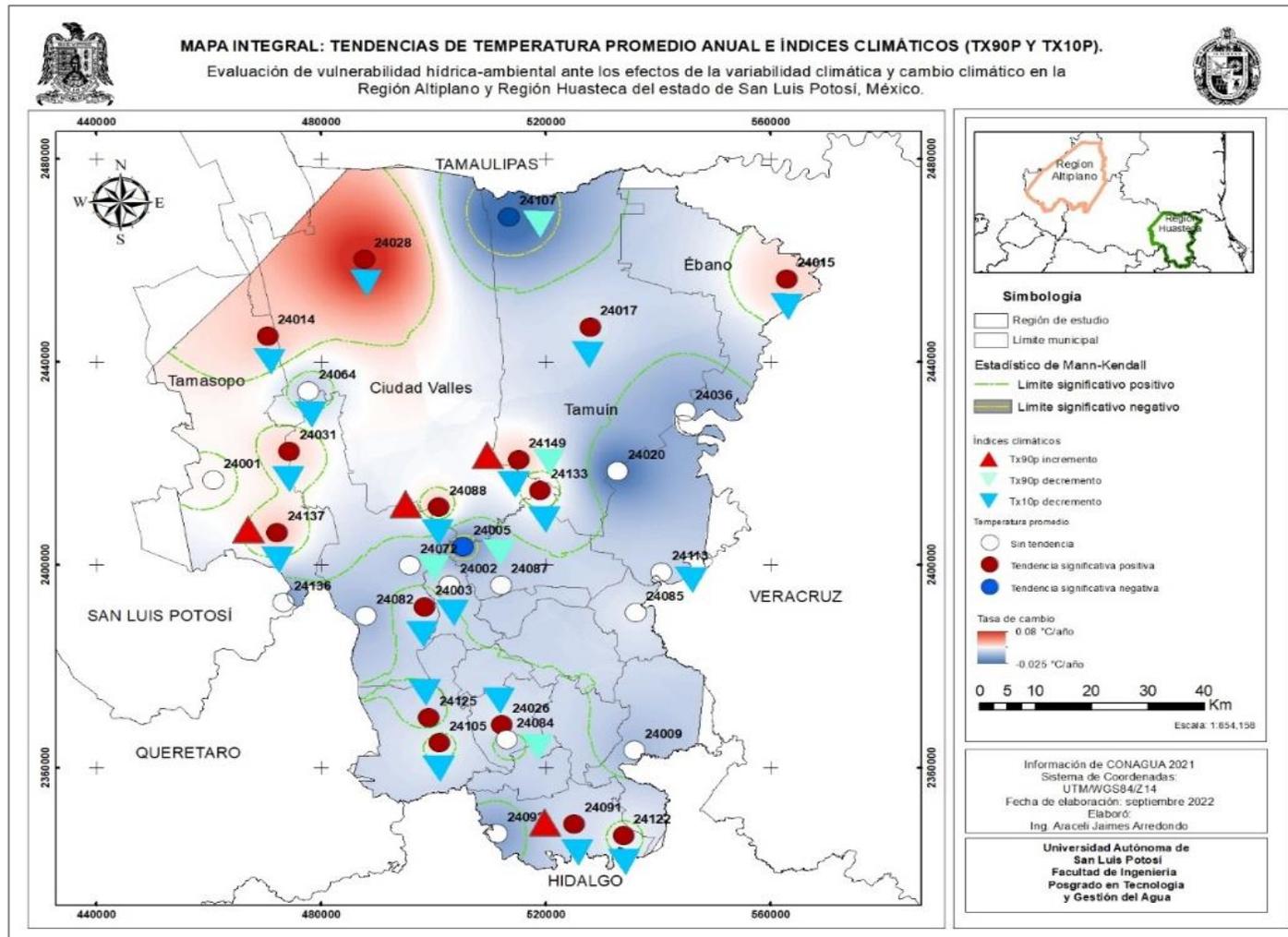


Figura 59. Mapa integral de temperatura promedio anual, TX90P y TX10P en la RH.

CAPITULO 4: EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA-AMBIENTAL ANTE LOS EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS REGIONES DE ESTUDIO

En las últimas décadas, se ha generado importancia creciente a una nueva perspectiva de análisis, basada en el concepto de vulnerabilidad, que traslada la atención principal hacia los grupos o entidades expuestas a cambios ambientales. El análisis de vulnerabilidad considera las diferentes presiones a las que puede verse sometido el grupo y en ese marco se propone, por un lado, determinar el riesgo de sufrir resultados desfavorables y, por otro, identificar aquellos factores que pueden reducir la capacidad de respuesta y adaptación a los cambios (Gómez, 2001).

La vulnerabilidad, definida ampliamente como el potencial de pérdida, es un concepto esencial en la investigación de peligros y es fundamental para el desarrollo de estrategias de mitigación de peligros a nivel local, nacional e internacional. La investigación de vulnerabilidad constituye uno de los esfuerzos internacionales destinados a revertir la espiral descendente de la pobreza, la población, el desarrollo y la degradación ambiental (Gómez, 2001).

4.1 Concepto de vulnerabilidad y componentes

Existen muchas definiciones de vulnerabilidad. Algunas son de carácter general y pueden aplicarse en diferentes contextos mientras que otras solo se aplican en ámbitos muy específicos. A continuación, se enlistan algunas definiciones:

- El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, 2001) define vulnerabilidad como el grado al cual un sistema es susceptible, o incapaz de hacer frente, a efectos adversos del cambio climático, incluyendo variabilidad climática y eventos extremos.
- De acuerdo con la Ley General de Cambio Climático la vulnerabilidad se define como “el grado en que los sistemas pueden verse afectados adversamente por el cambio climático, dependiendo de si éstos son capaces o incapaces de afrontar los impactos negativos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos extremos”. La vulnerabilidad no sólo depende de las condiciones climáticas adversas, sino también de la capacidad de la sociedad de anticiparse, enfrentar, resistir y recuperarse de un determinado impacto.
- **Vulnerabilidad hídrica:** representa la susceptibilidad de que los sistemas hidrológico superficial y subterráneo sufran una disminución significativa o total de las fuentes producto de las alteraciones producidas por el cambio climático afectando todas las componentes del sistema (Orozco *et al.*, 2020).
- La vulnerabilidad es el grado en que un sistema actúa adversamente ante la ocurrencia de un evento peligroso. El grado y la calidad de la reacción adversa están condicionados por la resiliencia de un sistema (una medida de la capacidad del sistema para absorber y recuperarse del evento) (Timmerman, 1981).

- Vulnerabilidad es el potencial de pérdida (Mitchell, 1989).
- Liverman (1990) distingue entre la vulnerabilidad como condición biofísica y la vulnerabilidad definida por las condiciones políticas, sociales y económicas de la sociedad. ella aboga por la vulnerabilidad en el espacio geográfico (donde se encuentran las personas y los lugares vulnerables) y la vulnerabilidad en el espacio social (quién es vulnerable en ese lugar).
- Alexander (1993). menciona que la vulnerabilidad humana es una función de los costos y beneficios de habitar áreas en riesgo de desastres naturales.
- Según Cutter (1993) la vulnerabilidad es la probabilidad de que un individuo o grupo se exponga y se vea afectado adversamente por un peligro. Es la interacción de las amenazas del lugar (riesgo y mitigación) con el perfil social de las comunidades.

Una de las preguntas que se plantean en este trabajo es ¿Qué región presenta mayor vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático?, ¿existe alguna diferencia en cuanto a los efectos de cambio climático en una región húmeda en comparación con una región seca?

El presente estudio se centra en una definición general de vulnerabilidad:

- La vulnerabilidad es el grado de pérdida de un determinado elemento o conjunto de elementos en riesgo como consecuencia de la ocurrencia de un fenómeno natural de determinada magnitud (Undro,1982).
- Vulnerabilidad es la capacidad de sufrir daño y reaccionar adversamente (Kates, 1985).

4.2 Vulnerabilidad hídrica-ambiental y sus componentes

Los principales efectos atribuidos al cambio climático son las afectaciones en el ciclo hidrológico y la consiguiente pérdida de la biodiversidad (INECC, 2019; Magaña, 2011). Por ejemplo, se documentó que el cambio de uso de la Tierra puede alterar procesos climáticos esenciales, como las lluvias de verano en México (PEACC-SLP, 2018). Como se evidenció en los capítulos anteriores de este trabajo: las dos regiones valoradas son susceptibles a la variabilidad climática y cambio climático; es por ello por lo que se eligió evaluar la vulnerabilidad en los sistemas hídricos-ambientales y documentar su comportamiento.

La formulación de la vulnerabilidad debe estar basada en indicadores que reflejen aspectos relevantes del sistema hidrológico, así como las características ambientales. Los indicadores son sumamente útiles cuando se manejan varias fuentes de información y se agregan en un sólo índice adimensional que represente las dimensiones: ambiental y hídrica de esta forma es posible simplificar toda la información y se facilita el proceso de la estimación de la vulnerabilidad de un sistema hidrológico (Martínez, 2021).

Los enfoques metodológicos de la vulnerabilidad son muy variados. Ya que hay poca consistencia en las definiciones de vulnerabilidad, esperaríamos que sea bastante difícil poner en práctica el concepto utilizando variables o indicadores específicos. Afortunadamente, la tarea de medición es algo más fácil que la de definición (Martínez, 2021).

La vulnerabilidad hídrica-ambiental se estimó por medio de un índice que comprendiera 4 componentes, específicos y con información obtenida de páginas oficiales del país. Así fueron determinados 4 indicadores de vulnerabilidad hídrica-ambiental, por su importancia en la descripción de este fenómeno, los cuales son grado de riesgo por sequía, disponibilidad de agua en acuíferos, uso de suelo y vegetación y variabilidad climática. La ecuación propuesta en este trabajo para determinar vulnerabilidad hídrica-ambiental se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Vulnerabilidad hídrica ambiental} \\ & = (\textit{grado de peligro por sequía}) + (\textit{condición de acuífero}) \\ & + (\textit{uso de suelo y vegetación}) + (\textit{variabilidad climática}) \end{aligned}$$

4.2.1 Indicador de grado de riesgo por sequía

El peligro por sequía se refiere a la probabilidad de que ocurra un evento de sequía en un espacio y tiempo determinados con suficiente intensidad como para producir daños; la vulnerabilidad ante la sequía es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos, daños o perjuicios causados por este fenómeno natural; el riesgo por sequía está determinado por la confluencia del peligro y la vulnerabilidad. (Ortega *et al.*, 2018).

La obtención de este indicador fue por parte del Centro Nacional de Prevención de Desastres. El fenómeno de la sequía ha sido analizado en la UNAM de tal manera que se ha hecho una evaluación para cada uno de los municipios del país, tomando en cuenta el déficit de lluvia y la duración de esta. Asimismo (Escalante *et al.*, 2005) ha propuesto una clasificación de acuerdo con lo expuesto anteriormente, la cual se muestra en el Cuadro 29.

Cuadro 29. Clasificación de las sequías (Escalante *et al.*, 2005).

Déficit promedio de lluvia (%) respecto a su lluvia media anual	Duración de la sequía promedio D (años)		
	$1 \leq D < 2$	$2 \leq D < 3$	$3 \leq D < 4$
$0 \leq \text{déficit (\%)} < 10$	Normal	Moderada	Extraordinaria
$10 \leq \text{déficit (\%)} < 20$	Severa	Muy severa	Extremadamente severa
$20 \leq \text{déficit (\%)} < 30$	Vasta	Muy Vasta	Extremadamente Vasta
$30 \leq \text{déficit (\%)} < 40$	Critica	Muy critica	catastrófica

Se determinó clasificar la vulnerabilidad por grado de riesgo por sequía utilizando la información proporcionada por CENAPRED; en el Cuadro 30 se observa la vulnerabilidad para cada riesgo existente por sequía.

Cuadro 30. Clasificación de vulnerabilidad por riesgo de sequía (Elaboración propia).

Grado de peligro por sequía	Vulnerabilidad
Bajo	0.1
Medio	0.5
Alto	0.8
Muy alto	1

En la Figura 57. se presenta el grado de riesgo por sequía en la RA, la mayoría de los municipios muestran un grado alto por riesgo de sequía, y 2 municipios presentan grado riesgo por sequía medio y un municipio presenta grado alto por riesgo de sequía.

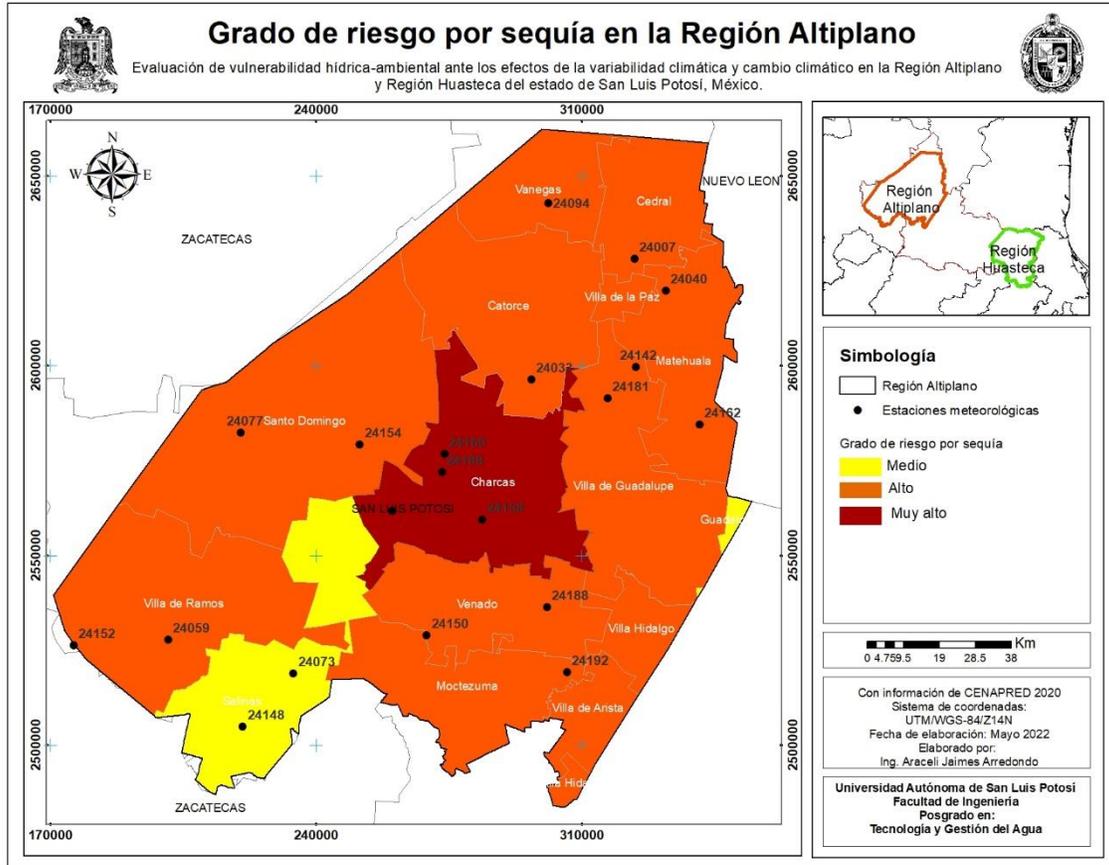


Figura 57. Grado de riesgo por sequía en la RH (Elaboración propia con información de CENAPRED, 2020).

En la Figura 58. se presenta el grado de riesgo por sequía en la RH, la mayoría de los municipios muestran un grado alto por riesgo de sequía, y 4 municipios presentan grado riesgo por sequía medio.

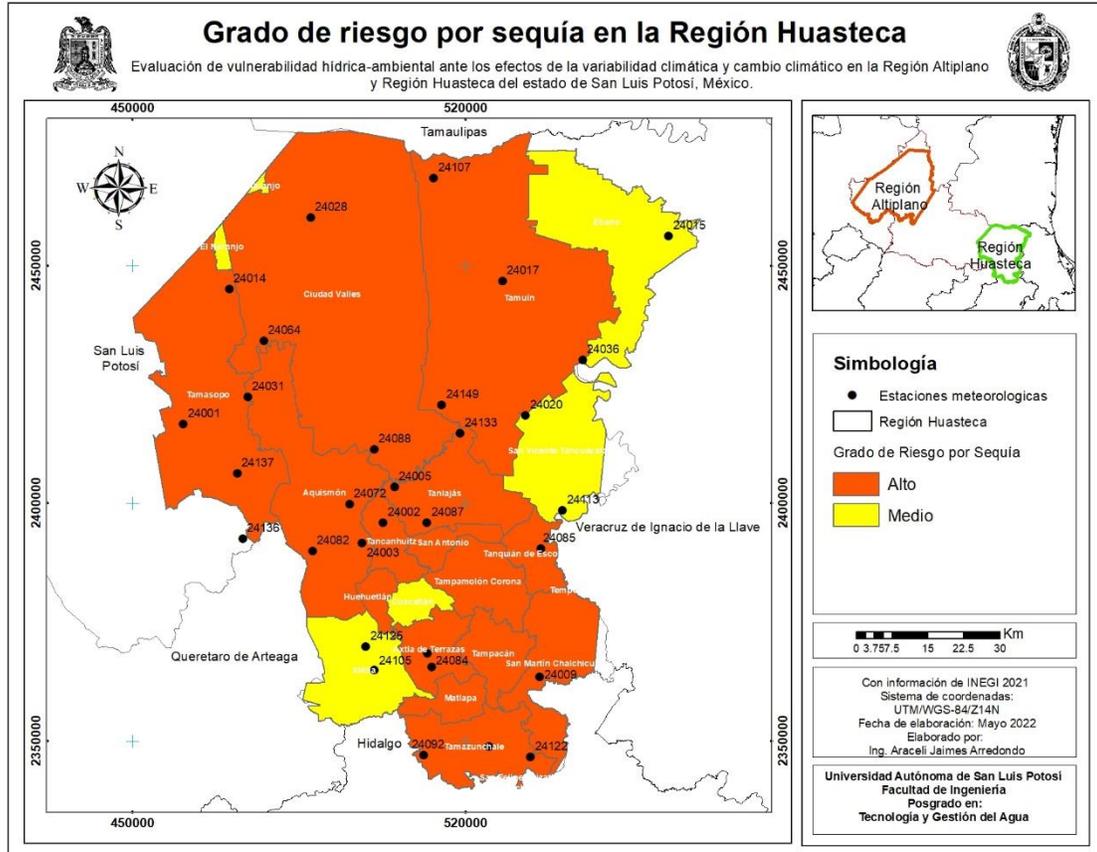


Figura 60. Grado de riesgo por sequía en la RH (Elaboración propia con información de CENAPRED, 2020).

4.2.2 Indicador de condición de acuíferos

La “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales” establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de estas donde se defina la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios (CONAGUA, 2020). En el caso de este estudio sirve como indicador para evaluar la vulnerabilidad hídrica-ambiental. De esta forma se obtuvo la información de disponibilidad de agua en los acuíferos de San Luis Potosí particularmente en los acuíferos de la RA y RH, los cuales se describen en el Cuadro 31. para el indicador de condición de acuíferos se realizó una estimación del porcentaje necesario de hm^3 agua necesarios para que el acuífero fuera considerado como no disponible; en el Cuadro 33. se muestra la clasificación de vulnerabilidad respecto a la condición del acuífero.

Cuadro 31. Disponibilidad de agua en acuíferos de la RA y RH. (Elaboración propia con información de CONAGUA 2020).

	Acuífero	*R (hm ³ /año)	*DNC (hm ³ /año)	*VEAS (m ³ /año)	*DMA (hm ³ /año)	Condición	Vulnerabilidad
RA	El Barril	31.6	0	93.65	-62.05	No disponible	1
	Salinas de Hidalgo	16.7	0	27.47	-10.77	No disponible	1
	Santo Domingo	21.4	0	19.90	1.50	Disponible	0.9
	Vanegas-Catorce	29.3	0	33.95	-4.65	No disponible	1
	Villa de Arista	48.2	0	102.45	-54.245	No disponible	1
	Villa Hidalgo	20.6	0	11.42	9.181	Disponible	0.55
	Matehuala-Huizache	31.5	0	72.54	-41.038	No disponible	1
	Cedral-Matehuala	17.5	1.3	18.48	-2.2833	No disponible	1
RH	Huasteca Potosina	668.2	541.5	43.08	83.6167	Disponible	0.87
	Tamuín	370.1	290.2	14.055	65.84486	Disponible	0.82

En el cuadro 32 se presenta la descripción de cada rubro del Cuadro 31. utilizados para calcular la disponibilidad de agua subterránea en acuíferos de las dos regiones de estudio.

Cuadro 32. Descripción de rubros utilizados en el balance de disponibilidad de agua (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).

*DMA	Disponibilidad media anual de agua subterránea
*VEAS	Volumen de extracción de aguas subterráneas
*DNC	Descarga natural comprometida
*R	Recarga total media anual

Cuadro 33. Clasificación de vulnerabilidad por condición de acuíferos (Elaboración propia).

Condición de acuífero	Vulnerabilidad
Acuífero con agua subterránea disponible	0.1
Acuífero con comprometido con menor porcentaje de agua subterránea disponible	0.5
Acuífero con agua subterránea no disponible	1

En la Figura 59. se presenta la condición de acuíferos, la cual describe la disponibilidad de agua subterránea en la RA, como se presentó en el Cuadro 31. los acuíferos que conforman la RA (El Barril, Salinas de Hidalgo, Santo Domingo, Vanegas-Catorce, Villa de Arista, Villa Hidalgo, Matehuala-Huizache y Cedral-Matehuala) no cuentan con disponibilidad de agua subterránea. Lo mismo ocurre con los acuíferos pertenecientes a la RH (Huasteca Potosina y Tamuín) no cuentan con disponibilidad de agua subterránea, (Figura 60) según el balance elaborado por CONAGUA en 2020.

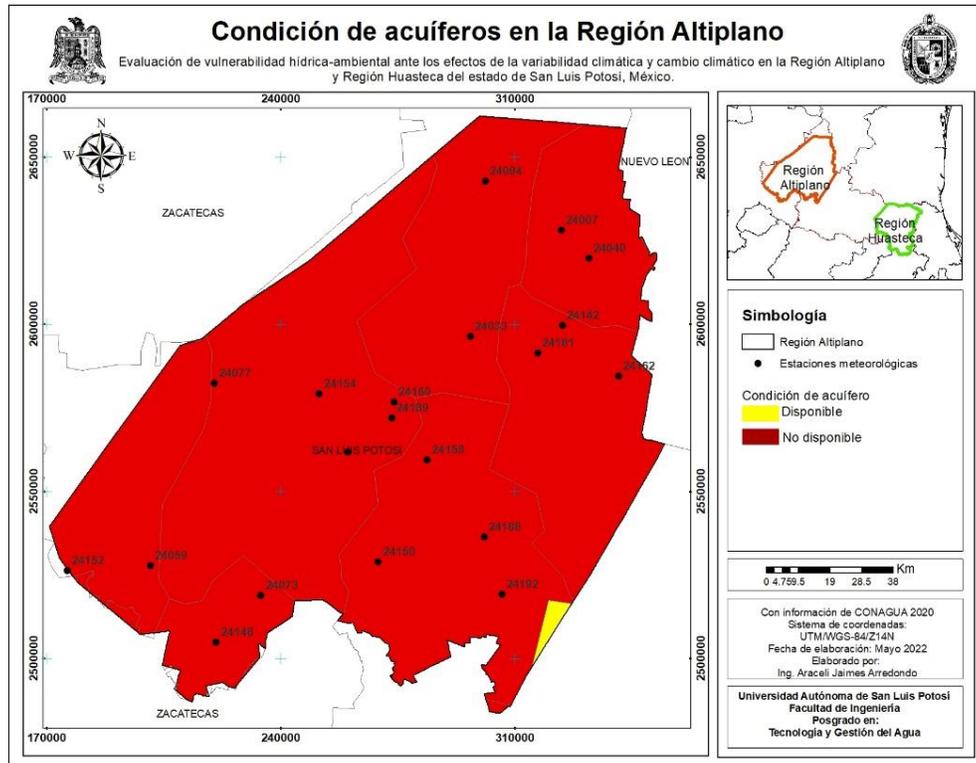


Figura 59. Condición de acuíferos en la RA, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).

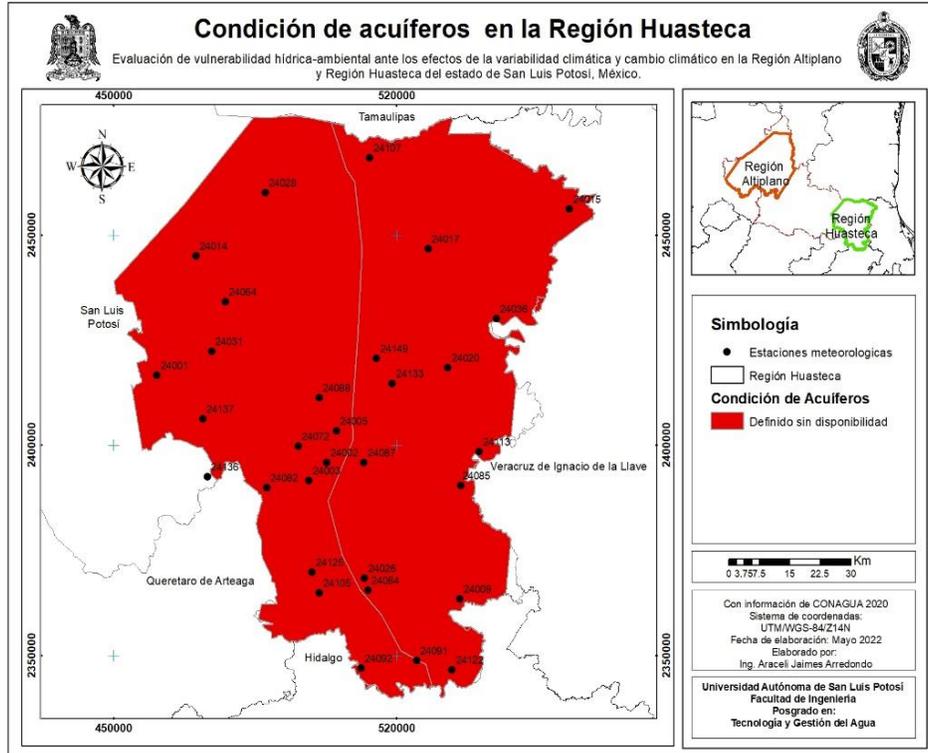


Figura 60. Condición de acuíferos en la RH, (Elaboración propia con información de CONAGUA, 2020).

4.2.3 Indicador de uso de suelo y vegetación

El tercer indicador utilizado para el índice de vulnerabilidad hídrica-ambiental propuesto en este trabajo fue el de uso de suelo y vegetación, para este fin se obtuvo la información de INEGI (2021), serie de datos número VII, a escala 1:250 000.

La cobertura de la tierra y su uso representan los elementos integrantes de los recursos básicos. Los cambios en la cobertura y uso del suelo afectan los sistemas globales (por ejemplo atmósfera, clima y nivel del mar), dichos cambios ocurren en un modo localizado que en su conjunto llegan a sumar un total significativo y se reflejan en buena medida en la cobertura vegetal, razón por la cual se toman como referencia para algunas aplicaciones que van desde el monitoreo ambiental, la producción de estadísticas como apoyo a la planeación, evaluación del cambio climático y la evaluación de los procesos de desertificación, entre otros (INEGI, 2014).

La Serie de datos VII de uso de suelo y vegetación representa los tipos de vegetación por su afinidad ecológica y composición florística, estado sucesional actual de la vegetación según el grado de cambio o alteración de la cubierta vegetal (Vegetación Secundaria), distribución de las comunidades vegetales con base en el reconocimiento de sus variantes definidas por elementos ecológicos, florísticos y fisonómicos distintivos, así como de agricultura (CONABIO, 2021).

En el Cuadro 34. se presentan las hectáreas de cada uso de suelo y vegetación serie VII de INEGI (2021) para la RA y RH. Se determinó elegir las áreas donde existe algún tipo de vegetación como un área de nula vulnerabilidad, y con una vulnerabilidad de 1(muy alta) a los espacios geográficos donde no existe la vegetación y donde el área es utilizada para la agricultura.

Para la RA el tipo de paisaje con agricultura, desprovisto de vegetación, sin vegetación aparente y asentamientos humanos fueron descritos como vulnerabilidad de 1 (muy alta); que en conjunto suman 464131.73 hectáreas. El tipo de paisaje: bosque, chaparral, cuerpo de agua, matorral, mezquital, pastizal y vegetación secundaria fueron descritos como vulnerabilidad de 0 (baja), en conjunto suman 1551248.04 hectáreas.

En la RH el tipo de paisaje con agricultura, zona urbana y desprovisto de vegetación se presentan como vulnerabilidad de 1 (muy alta); que en conjunto suman 371775.16 hectáreas. El tipo de paisaje denominado: bosque, cuerpo de agua, matorral, palmar, pastizal, selva, tular, y vegetación secundaria fueron descritos como vulnerabilidad de 0 (baja), en conjunto suman 629650.05 hectáreas.

Se calculó el porcentaje de área que ocupa la superficie con vulnerabilidad “baja” y vulnerabilidad “muy alta” para las dos regiones de estudio descrita por el indicador de uso de suelo y vegetación (Figura 61). La RA presenta un 77% de su superficie con vulnerabilidad “baja” y un 23% con vulnerabilidad “muy alta”. En contraste la RH presenta 63% con vulnerabilidad “baja” y 37% con un área de vulnerabilidad “muy alta”. Se presenta un mayor porcentaje de área descrita como vulnerabilidad “muy alta” en la RH comparada con el porcentaje descrito de la misma forma para la RA. Lo que indica que en la RH ocurren más eventos de cambio de uso de suelo que afectan la superficie de paisaje que puede proporcionar ventajas de adaptación y mitigación ante el cambio climático.

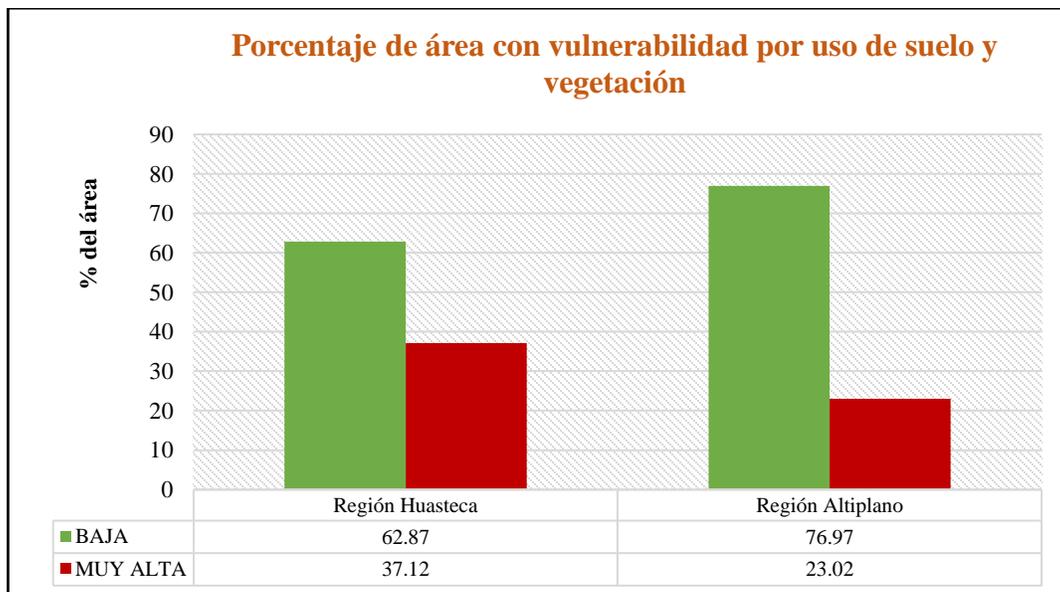


Figura 61. Porcentaje de área con vulnerabilidad por uso de suelo y vegetación para cada región

Cuadro 34. Clasificación de vulnerabilidad de acuerdo con el uso de suelo y vegetación (Elaboración propia, con información de INEGI, 2021).

Uso de suelo y vegetación			
	Descripción	Área de 2021 (hectáreas)	Vulnerabilidad
Región Altiplano	Agricultura	449013.9532	1
	Bosque	7923.241808	0
	Chaparral	35114.35328	0
	Cuerpo de agua	3139.337718	0
	Matorral	1263434.593	0
	Mezquital	8990.256245	0
	Pastizal	105273.9467	0
	Vegetación secundaria	127372.319	0
	Desprovisto de vegetación	439.7597146	1
	Sin vegetación aparente	51.8123931	1
	Asentamientos humanos	14626.20942	1
Región huasteca	Agricultura	359329.5651	1
	Bosque	24527.1337	0
	Cuerpo de Agua	7556.22448	0
	Matorral	225.9433228	0
	Palmar	2415.350146	0
	Pastizal	252484.3141	0
	Selva	97870.62697	0
	Tular	4207.993022	0
	Vegetación Secundaria	240362.4691	0
	Zona Urbana	11999.0901	1
	Desprovisto de vegetación	446.5058996	1

En la Figuras 62 y 63. se presentan los mapas de uso de suelo y vegetación de la RA y RH, conforme a la información obtenida de INEGI (2021). En la RA predominan los Matorrales y en la RH diferentes tipos de vegetación secundaria. Hay que mencionar que en las dos regiones existe una tendencia al incremento de áreas para el uso agrícola y de asentamientos humanos.

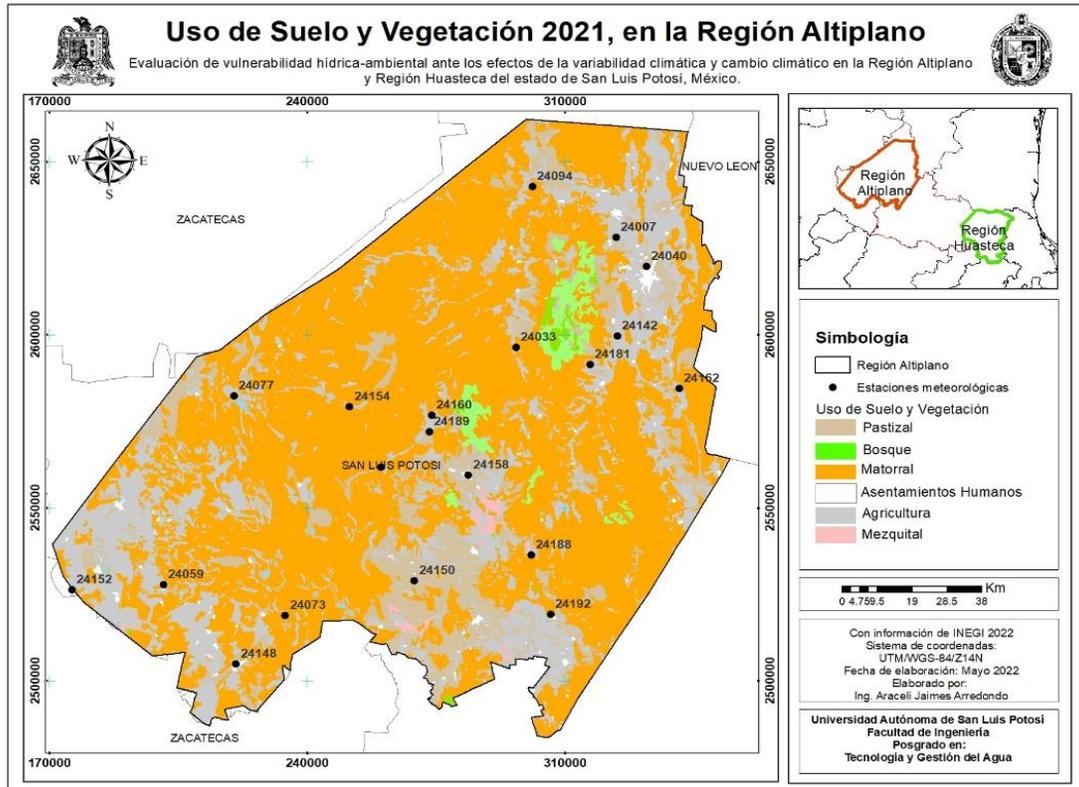


Figura 62. Uso de suelo y vegetación en la RA (Elaboración propia con información de INEGI, 2021).

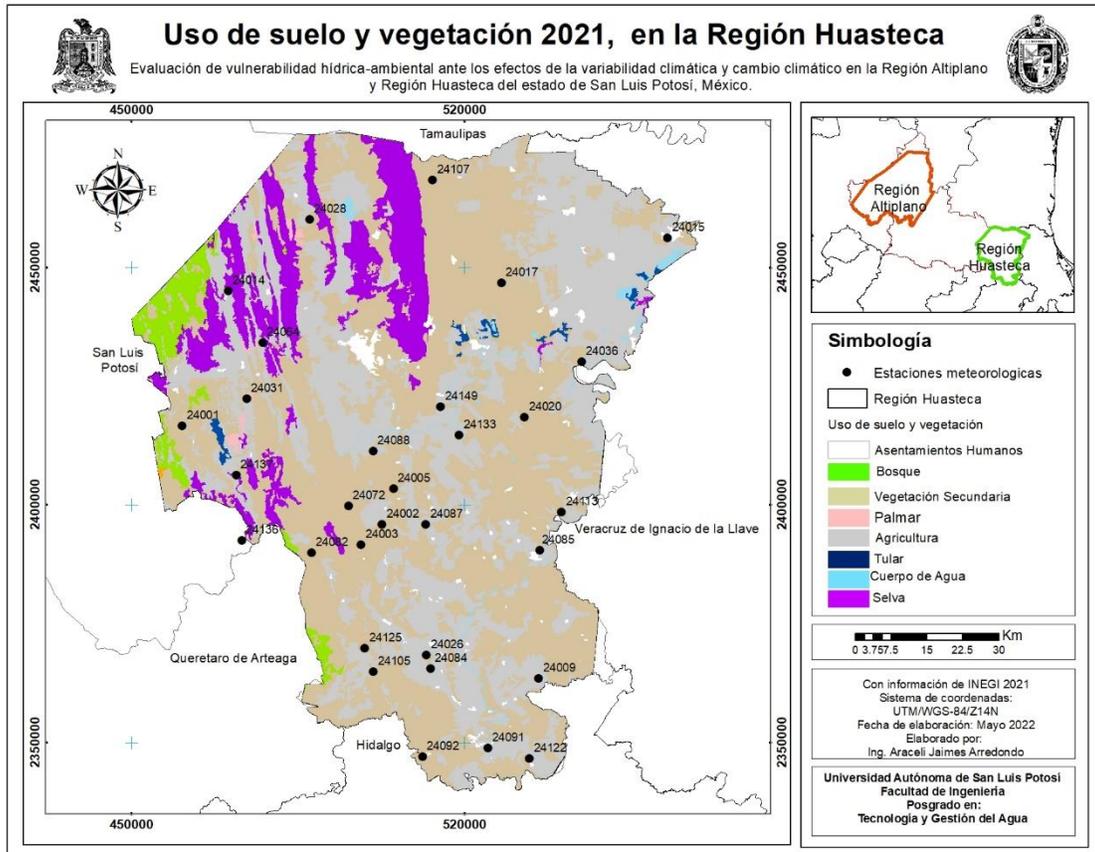


Figura 63. Uso de suelo y vegetación en la RH (Elaboración propia con información de INEGI, 2021).

4.2.4 Indicador de variabilidad climática

El indicador número cuatro utilizado fue variabilidad climática fueron utilizados los resultados obtenidos para cada estación meteorológica de las dos regiones de estudio, de la variable de temperatura promedio anual. Ya que la variable de temperatura promedio ya sea mensual o anual, así como local y regionalmente es una de las variables analizadas que más presenta tendencia al cambio lo que evidenció variabilidad climática en las dos regiones de estudio. El criterio utilizado para este indicador fue describir a las estaciones con tendencia significativa al cambio (negativo o positivo) como vulnerabilidad de 1 (muy alta) y a las estaciones sin tendencia significativa con vulnerabilidad 0 (baja).

Los resultados de variabilidad climática de la variable de temperatura promedio anual de las dos regiones de estudio se describieron en los Cuadros 6 y 7, así como en las Figuras 20 y 28, de este trabajo. A continuación, se resumen dichos resultados:

- Las estaciones meteorológicas de la RA con clave 24181, 24158, 24160, 24033, 24142, 24040, 24073, 24154, 24176 y 24152 presentan tendencia significativa al cambio en los registros anuales por ello fueron descritas con vulnerabilidad “muy alta”. Las estaciones meteorológicas de la RA con clave 24188, 24162, 24189,

24150, 24148, 24192, 24077, 24059 y 24094 no presentan tendencia significativa al cambio en los registros anuales por ello fueron descritas con vulnerabilidad “baja”.

- Las estaciones meteorológicas de la RH con clave 24137, 24003, 24122, 24014, 24015, 24017, 24149, 24088, 24105, 24005, 24107, 24028, 24031, 24133, 24026 y 24091 presentan tendencia significativa al cambio en los registros anuales por ello fueron descritas con vulnerabilidad “muy alta”. Las estaciones meteorológicas de la RH con clave 24028, 24002, 24020, 24036, 24064, 24064, 24009, 24113, 24072, 24082, 24084, 24087, 24136, 24085, 24092 y 24125 no presentan tendencia significativa al cambio en los registros anuales por ello fueron descritas con vulnerabilidad “baja”.

Después de incluir la información de los cuatro indicadores se logró identificar vulnerabilidad hídrica-ambiental para las dos regiones de estudio, como se muestra en las Figuras 64 y 65. La clasificación de estos 4 indicadores tiene diferente escala espacial, la variabilidad climática es conforme a estaciones meteorológicas, el grado de riesgo por sequía es bajo municipios, la condición de acuíferos por acuífero y el uso de suelo y vegetación por área ocupada para cada clasificación, por ello la dificultad de relacionar la información, lo que resultó en que no existiera ningún municipio con vulnerabilidad hídrica-ambiental baja ni muy alta. Las dos regiones presentan una media y alta vulnerabilidad.

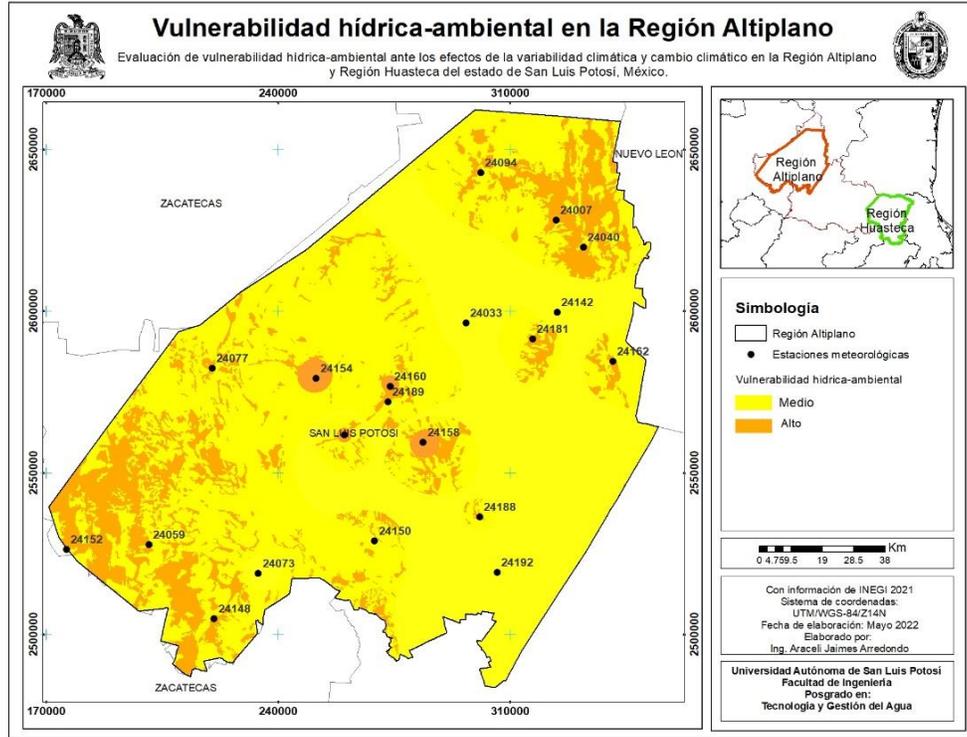


Figura 63. Vulnerabilidad hídrica-ambiental en la RA (Elaboración propia).

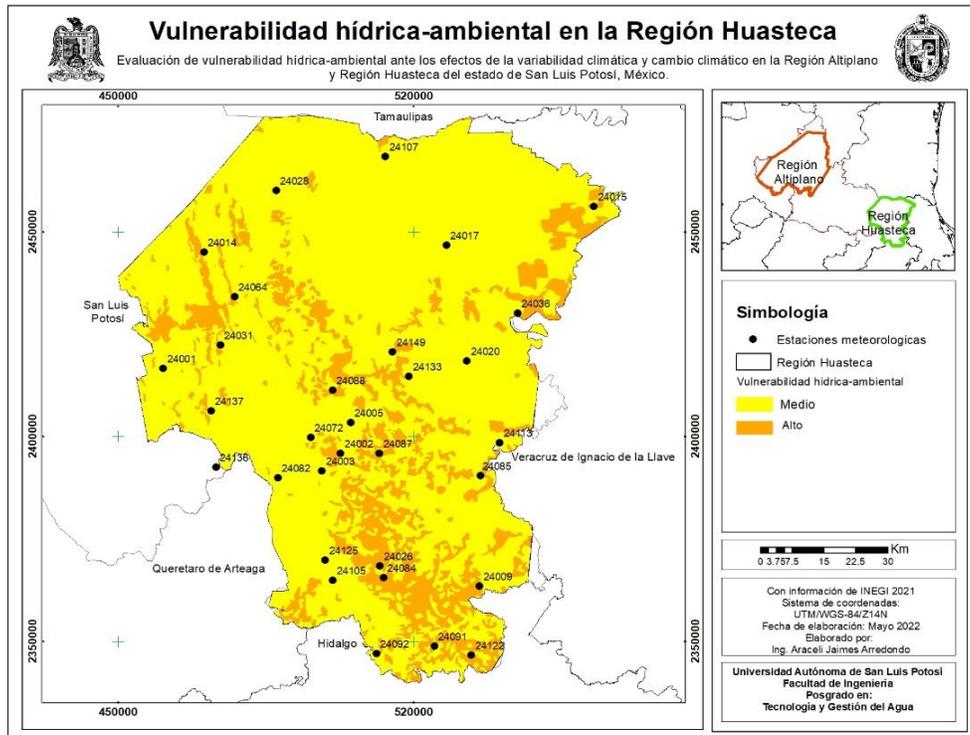


Figura 64. Vulnerabilidad hídrica-ambiental en la RH (Elaboración propia).

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el desarrollo de esta investigación se documentó la magnitud de cambio, tiempo y espacio en el que ocurre la variabilidad climática, el fenómeno de sequía, los índices climáticos que exhiben cambio climático, así como la formulación de un índice de vulnerabilidad hídrica-ambiental en la RA y RH. A continuación, se presenta el análisis de los resultados encontrados para cada variable analizada y para cada método realizado.

Es importante mencionar que en este tipo de investigaciones el actor principal es la información de calidad de estaciones meteorológicas proporcionada por CONAGUA, en la RA hay menos disponibilidad de información, a pesar de que cuenta con un área mayor a las otras tres regiones del estado, tiene menor número de estaciones operando. La RH como se mencionó el Capítulo 1, tiene grandes atributos de importancia económica a nivel estatal, como lo son la agricultura y por su puesto el turismo, que hacen que exista más información actualizada y más estaciones operando.

5.1 Análisis y discusión de resultados de variabilidad climática para la Región Altiplano

Para la variable de precipitación total en el periodo evaluado de 1975-2018, en la RA se presentaron tendencias significativas de incremento en verano en el mes de septiembre de manera local en 5 estaciones, así como de manera regional. En otoño en el mes de diciembre se detectaron tendencias significativas de decremento locales en 7 estaciones y también de manera regional. En el análisis anual las estaciones meteorológicas con clave 24007 y 24158 en el norte y centro de la RA presentan tendencias significativas negativas. La prueba Pettit evidenció rupturas en precipitación en 14 estaciones principalmente en años de la década de 1990, y de manera regional, en el año de 1995.

La variable de temperatura promedio en el periodo evaluado de 1975-2018, en la RA, presentó tendencias significativas al cambio de incremento y de decremento en las 4 épocas del año y también en el valor anual. Las tendencias significativas de incremento ocurrieron de manera local en 11 estaciones, así como incremento de manera regional, principalmente en el mes de agosto. Las tendencias significativas de decremento solo se registraron de manera local en 5 estaciones en las 4 épocas anuales. La prueba Pettit evidenció rupturas de manera local en temperatura promedio en 20 estaciones, así como rupturas en los valores promedio de la RA, principalmente en años de la década de 1990.

La variable de temperatura máxima extrema en el periodo evaluado de 1975-2018 en la RA, es la variable evaluada que más presenta tendencia al cambio; presentó tendencias significativas al cambio principalmente de incremento de forma local en 15 estaciones, así como de manera regional en las 4 épocas anuales; no obstante, existieron tendencias significativas de decremento de temperatura máxima extrema en dos estaciones en meses de otoño e invierno. La prueba Pettit evidenció rupturas en temperatura máxima extrema en 20 estaciones, así como rupturas en los valores promedio de la RA en años de la década de 1990 y 2000.

La variable de temperatura mínima extrema en el periodo evaluado de 1975-2018 en la RA, presentó cambio significativo de incremento local solo en 8 estaciones para las 4 épocas anuales, y de manera regional solo en los meses de febrero y septiembre. Se presentaron tendencias significativas de decremento únicamente de manera local en 11 estaciones para las 4 épocas anuales. La prueba Pettit evidenció rupturas en temperatura mínima extrema en el total de las 21 estaciones, en los años de 1980, 1990 y 2000.

5.2 Análisis y discusión de resultados de variabilidad climática para la Región Huasteca

Para la variable de precipitación total en el periodo evaluado de 1975-2019 en la RH, se presentaron tendencias significativas al cambio en los meses de las 4 épocas anuales; las que más sobresalen son las de incremento en otoño en el mes de octubre, de manera local en 5 estaciones, así como de manera regional; seguidas de las tendencias significativas también en otoño en el mes de diciembre que se detectaron tendencias significativas de decremento locales en 12 estaciones, así como de manera regional. En el análisis anual las estaciones meteorológicas con clave 24003 y 24107 en el centro y norte de la RH presentan tendencias significativas negativas. La prueba Pettit evidenció rupturas en precipitación en 20 estaciones, principalmente en años de la década de 1990.

La variable de temperatura promedio en el periodo evaluado de 1975-2019 en la RH presentó tendencias significativas al cambio de incremento y de decremento en las 4 estaciones anuales y también en el valor anual. Las tendencias significativas de incremento ocurrieron de manera local en 19 estaciones, así como tendencias significativas al incremento de manera regional, principalmente en el mes de febrero. Las tendencias significativas de decremento solo se registraron de manera local en 4 estaciones en meses de primavera y verano. La prueba Pettit evidenció rupturas en temperatura promedio en 30 estaciones, principalmente en años de la década de 1990.

La variable de temperatura máxima extrema en el periodo evaluado de 1975-2019 en la RH, es la variable evaluada que más presenta tendencia al cambio, presentó tendencias significativas al cambio principalmente de incremento de forma local en 18 estaciones, así como de manera regional en las 4 épocas anuales; no obstante, existieron tendencias de decremento de temperatura máxima extrema en 9 estaciones, en meses de otoño e invierno. La prueba Pettit evidenció rupturas en temperatura máxima extrema en 25 estaciones en años de la década de 1990 y 2000.

La variable de temperatura mínima extrema en el periodo evaluado de 1975-2019 en la RH, presentó cambio significativo de incremento local en 19 estaciones para los meses de las 4 épocas anuales, y de manera regional en los meses de verano e invierno. Se presentaron tendencias significativas de decremento únicamente de manera local en 4 estaciones para los meses de primavera y verano. La prueba Pettit evidenció rupturas en temperatura mínima extrema en 27 estaciones en los años de 1980, 1990 y 2000, así como rupturas en los valores promedio de la RH en años de la década de 1990.

5.3 Análisis y discusión de resultados de variabilidad climática en Región Altiplano en comparación con la Región Huasteca

Se evaluaron cuatro variables meteorológicas para las dos regiones de estudio con el fin de detectar variabilidad climática, en ambas regiones se exhibió este fenómeno, no de igual medida y magnitud de cambio, pero si con cierta similitud. Para las dos regiones de estudio las tendencias significativas al cambio y rupturas ocurren principalmente en las variables de temperatura, promedio, máxima extrema y mínima extrema.

La variable de precipitación presentó mayores tendencias significativas al cambio en la RH que en la RA. En la RA los cambios estadísticamente significativos ocurrieron en los meses de verano y otoño, mientras que en la RH se presentan en la mayoría de los meses de las cuatro épocas anuales. Las dos regiones tienen en común que anualmente las tendencias significativas al cambio solo se presentaron de decremento y solo en dos estaciones. En el mes de diciembre (otoño) se presentaron las mayores tendencias de decremento de precipitación en ambas regiones. Las tendencias significativas de incremento de precipitación en la RA se presentan en el mes de septiembre (verano), mientras que en la RH se registraron en el mes de octubre (otoño).

Para las dos regiones de estudio en la variable de temperatura promedio se presentaron tendencias significativas de incremento en la mayoría de los meses de las cuatro épocas anuales, así como de manera anual; de forma local y regional. Como un contrastante en las dos regiones hubo un mes donde se presentó menor tendencia significativa al cambio de temperatura promedio para la RA fue el mes de enero, y para la RH fue el mes de noviembre.

La variable de temperatura máxima extrema es la variable que más presenta tendencias significativas al cambio y rupturas de los valores medios; en ambas regiones de estudio. Se presentaron tendencias significativas de incremento en la mayoría de los meses de las cuatro épocas anuales, así como de manera anual; de forma local y regional. Para la RA en todos los meses hay estaciones meteorológicas analizadas con tendencia significativa al cambio de incremento de temperatura máxima extrema, en cambio en la RH en el mes de marzo no se presentó ninguna estación meteorológica analizada con tendencia significativa al incremento, más bien, tres estaciones presentaron tendencia significativa al decremento de temperatura máxima extrema.

Para las dos regiones de estudio la variable de temperatura mínima extrema en la RA se presentaron tendencias significativas contrastantes a nivel mensual y anual, hay valores de incrementos y decrementos; se presentan de manera local en algunas de las estaciones analizadas, y a nivel regional aún no se presentan tendencias predominantes significativas al cambio. En la RH se presenta una tendencia significativa de incremento en los meses de verano e invierno, así como en los valores anuales, de manera local y regional.

A la par con el presente trabajo Torres-Aldana (2022), realizó un estudio de Evaluación de la variabilidad climática y cambio climático en la región centro– noroccidental de la subcuenca hidrológica del río verde, San Luis Potosí, este estudio fue realizado para el periodo de 1980 a 2018, por 5 años no se manejó el mismo periodo, no obstante, por ser de gran similitud metodológica, así como contar de localización el mismo estado de San Luis

Potosí de la República Mexicana; se presentan los resultados en comparación con el presente trabajo.

En la Región Altiplano, Región Huasteca y Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde los resultados de la variable **precipitación total anual** aún no se reflejan cambios significativos, en algunas estaciones meteorológicas hay tendencias significativas al cambio contrastantes (negativas y positivas), sin embargo, en las tres regiones a nivel regional a aun no se presentan tendencias significativas en los registros históricos de precipitación. En estas 3 zonas de San Luis potosí la **temperatura promedio y la temperatura máxima extrema** presentan tendencias al cambio predominantemente de incremento en las 4 épocas del año a nivel anual, tanto local como regionalmente. Para la variable de **temperatura mínima extrema** en la región Altiplano y en la Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde los resultados registraron tendencias significativas contrastantes a nivel mensual y anual hay valores de incrementos y decrementos; se presentan de manera local en algunas de las estaciones analizadas, y a nivel regional aún no se presentan tendencias predominantes significativas al cambio. No obstante, para la variable de temperatura mínima extrema en la Región Huasteca se presenta una tendencia significativa de incremento en los meses de verano e invierno, así como en los valores anuales, de manera local y regional.

Campos (2015). Evaluó las tendencias en los registros de precipitación de 30 estaciones pluviométricas en el estado de Zacatecas, México. Cinco de estas estaciones colindan con la Región Altiplano, de igual forma que en el presente trabajo se hicieron pruebas de calidad, se calcularon datos faltantes, y se utilizó la prueba estadística de Mann-Kendall para evidenciar tendencias. Campos (2015) también incluyó las pruebas de Sneyers, Spearman y Cramer; encontrando que la precipitación anual del estado de Zacatecas está disminuyendo lo que exhibe variabilidad climática, en comparación con el presente trabajo para la RA de manera regional aún no se encontraron tendencias significativas, solo de manera local y de igual forma se presentan de decrementos.

Álvarez & Escalante (2016) identificaron patrones de variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones anuales en México. Regionalizaron al país en 12 zonas conforme los valores medios de precipitación total. Fueron utilizadas pruebas de estacionalidad, de Mann-Kendall y de Pettit. En este estudio la región 1 cubre la totalidad de la Región Altiplano y la número 7 la Región Huasteca. Estas regiones se consideraron no estacionarias (la no estacionalidad de una serie hidrometeorológica se caracteriza por la presencia de un componente de tendencia y/ o salto repentino en las características estadísticas de los datos) y se observaron los cambios más significativos en las series de precipitaciones anuales, se menciona que los cambios son contrastantes tanto de incremento como de decremento en las diferentes épocas anuales, este estudio presenta que en la región 1 (donde se localiza la RA) se presentan mayores incrementos de precipitación en verano, lo que coincide con lo encontrado en el presente trabajo, ya que se encontraron tendencias significativas de precipitación en verano en el mes de septiembre. Y para precipitación anual de la RH aún no se registran variabilidad significativa.

Rocha-Escalante *et al.*, (2022). Elaboraron un análisis de tendencias en la RA para el periodo de 1975-2015, donde se presentan tendencias que sugieren comportamientos locales. Con respecto a la precipitación, se presentan incrementos en primavera y verano mientras que

tienden a disminuir en otoño. Con respecto a la temperatura, se detectó una mayor variabilidad en las tendencias (anuales y mensuales); hay un mayor reflejo en la variabilidad anual, sustentada por los cambios mensuales; o en su caso, existen variaciones mensuales que aún no se ven reflejadas en una tendencia anual.

Ríos (2018). A partir de técnicas de percepción remota, documento evidencia de un incremento paulatino de la temperatura siendo la zona de montaña la de mayor incremento; el 70% de las estaciones analizadas muestran incrementos en la temperatura promedio y 78% incrementos en los valores de temperatura máxima, y en el caso de la precipitación se muestra una disminución.

5.4 Análisis y discusión de resultados de SPI para la Región Altiplano

Se analizó el fenómeno de sequía hidrológica por medio del análisis de SPI a una escala de 12 meses. En el Cuadro 22. se presentan los resultados de SPI, los cuales indican años con sequía y años muy húmedos para ambas regiones de estudio. Por ello se analizaron las tendencias al cambio de estos valores de SPI con la prueba de Mann-Kendall. En la RA solo ocurren cambios de manera local, para el análisis anual ocurrieron incrementos de SPI en 10 estaciones, en la época seca se identificaron incrementos de este valor en 7 estaciones, y para la época húmeda incrementos en 8 estaciones. Los valores de decremento de SPI nos indican tendencia a la sequía hidrológica, lo cual no ocurre en la RA ya que solo se presenta esta tendencia de decremento de SPI en 3 estaciones en el análisis de época seca, húmeda y anual.

5.5 Análisis y discusión de resultados de SPI para la Región Huasteca

Se analizó el fenómeno de sequía hidrológica por medio del análisis de SPI a una escala de 12 meses. En el Cuadro 22. se presentan los resultados de SPI, los cuales indican años con sequía y años muy húmedos en la RH. Para la RH se presenta mayor problemática a sequía hidrológica ya que en esta región se presentan las mayores tendencias de decremento de SPI como se logra observar en el Cuadro 24. En 11 estaciones de la RH existe una tendencia al decremento de SPI en valores de escala anual. En la época seca 9 estaciones presentan tendencia al decremento y para la época húmeda 8 estaciones presentan esta tendencia. Las tendencias de incremento de SPI en la RH solo se presentan en 3 estaciones y solo en el análisis anual y en la época seca. INECC (2019), documento que “Un efecto de cambio climático es que la precipitación pluvial ha disminuido en la región sureste desde hace medio siglo” lo que se confirma con la evaluación realizada de SPI en la región sureste de México a la que pertenece la RH.

5.6 Análisis y discusión de resultados de SPI en la Región Altiplano en comparación con la Región Huasteca

En comparación de SPI, las dos regiones presentan eventos de sequía contrastantes, en ambas regiones solo presentan cambios locales. Para la RA se presentaron mayores tendencias significativas de incremento de SPI lo que indica mayores eventos de periodos de humedad, en cambio en la RH los resultados de tendencias significativas son mayores de decremento de SPI, lo que indican mayores periodos de sequía. De manera general en las dos regiones se presentaron periodos de sequía, en las Figuras 38 y 39. se graficó el comportamiento de SPI, los periodos de sequía más prolongados se presentaron para la RH en comparación con la RA. Incluso en la RH en el último registro que se tiene; el del año de 2019 para las tres escalas evaluadas (anual, época seca y época húmeda) presentan una condición de “muy seco”.

Torres-Aldana (2022), evaluó SPI para 3 y 12 meses en la Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde, documento que en las tres escalas temporales del SPI-12, las tendencias significativas son principalmente positivas 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 negativas y se localizan en las zonas topográficamente altas y de valle, pocas son significativas. Estas tendencias positivas que se presentan al norte de la Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde coinciden con las tendencias positivas que se registraron en la RA.

González-Rodríguez (2020), Realizo una caracterización de la sequía meteorológica en la región media del estado de San Luis Potosí implementando el SPI. De este análisis se obtuvo que los episodios de sequía en la región media presentan una marcada influencia por las fases positivas del fenómeno el Niño (episodios Niño), y en estaciones localizadas en la frontera de la Región Huasteca, los episodios de sequía presentan una asociación más fuerte con las fases negativas, esto es, cuando se tienen episodios conocidos como Niña.

Algara, *et al.*, (2009) elaboraron un análisis de las implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina, utilizando un índice de severidad de la sequía, la moda de precipitación ajustada a la función gamma incompleta, y correlación del índice de severidad de la sequía con el cambio de uso de suelo; documentando como resultados la existencia de picos en la gráfica, correspondientes a los años de las peores sequías registradas, la tendencia es hacia una severidad de la sequía cada vez más fuerte. De manera general en la Huasteca Potosina existe de un claro avance de la severidad de la sequía, un aumento de temperatura y disminución de precipitación.

5.7 Análisis y discusión de resultados de índices de cambio climático para la Región Altiplano

Para las variables de precipitación y de temperaturas extremas analizadas en los índices climáticos del ETCCDI se encontró mayor tendencia al cambio en las variables de temperatura para las dos regiones de estudio. En la RA para los índices climáticos de

temperatura se registraron tendencias al cambio significativas en mayor porcentaje en los índices de TXx, Tx90p, TNn y DTR. Y para los índices de precipitación la RA presentó tendencias significativas en los índices de Rx1day, SDII y R10 con cambios en un 52%, 42% y 47% de las estaciones analizadas respectivamente.

El índice de temperatura máxima extrema (TXx), que se define como el valor máximo anual de la temperatura máxima diaria; es uno de los dos índices que más presentan tendencia significativa al cambio en la RA (Figura 51). En el 78% de las estaciones analizadas de la RA se encontraron tendencias significativas al cambio de incremento, en la mayoría superficie (15 estaciones) de la RA se está incrementando la temperatura máxima extrema con una magnitud de cambio desde 0.045 a 0.209 °C/año.

Las tendencias de la Frecuencia de días calurosos (TX90P), que describe el porcentaje en días en que la temperatura máxima es mayor al percentil 90. Es el segundo índice donde más se registran tendencias al cambio de incremento de la RA. Como se presenta en la Figura 52. en el 78% de las estaciones de la RA, se registraron tendencias significativas con valores de 0.193 a 0.623 días/año. Lo que indica mayor frecuencia de días calurosos en la RA.

El índice denominado temperatura mínima extrema (TNn) que registra el valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria, presenta tendencias significativas al cambio de decremento en el 42% de las estaciones de la RA. Como se presenta en la Figura 53. Los cambios de decremento ocurren principalmente en el suroeste y centro de la RA, en 8 estaciones: 24077, 240148, 24158, 24160, 24162, 24188, 24189 y 24192; de los municipios de Santo Domingo, Salinas, Charcas, Matehuala, Venado y Moctezuma. Con valores de magnitud de cambio que van desde los -0.092 hasta -0.217°C/año.

Para la RA el índice de precipitación máxima en un día (Rx1day), presentó tendencias significativas de incremento con un valor promedio de 0.53 mm/año, así como tendencias significativas de decremento en las estaciones con una magnitud de cambio de -0.42 mm/año.

El índice de precipitación máxima en cinco días (Rx5day) presentó tendencias de incremento en las estaciones con una magnitud de cambio promedio de 0.82 mm/año. Las tendencias significativas de decremento con una magnitud de cambio promedio de -0.64 mm/año.

Las tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII) (Figura 50). de manera general las tendencias significativas ocurren en la parte suroeste y noroeste de la RA, con registros de magnitud de cambio desde 0.075 a 0.282 mm/año.

El índice de días con lluvia mayor a 10 mm (R10) en la RA presentó cambios tanto positivos como negativos. Las tendencias significativas de incremento se presentaron con un valor de magnitud de cambio de 0.21 días/año. Las tendencias significativas de decremento se presentan con un valor de magnitud de cambio de -0.21 días/año.

El índice denominado precipitación total (PRCPTOT), cuantifica la precipitación total anual en días en que la precipitación es igual o mayor a 1 mm. Presentó tendencias significativas de decremento en la parte este y oeste, por debajo del Trópico de Cáncer, y en la parte norte de la RA, en las estaciones 24007, 24142, 24154 y 24181 en los municipios de Cedral, Villa de Guadalupe y Santo Domingo, con una magnitud de cambio negativa de -5.4 mm/año.

5.8 Análisis y discusión de resultados de índices de cambio climático para la Región Huasteca

En la RH se encontró mayor tendencia al cambio en las variables de temperatura. La RH presenta cambios de incremento en los valores de los índices de SU25, TXn, TNn y DTR y decrementos en los índices de TX10p y TN10p. Para los índices climáticos de precipitación en la RH se encontraron solo unos cambios en de manera local en algunas estaciones y solo algunos índices.

El índice de días de verano (SU25) de la RH (Figura 55). En esta región húmeda de San Luis Potosí, se presentaron tendencias significativas de incremento en un 54% de las 31 estaciones analizadas, lo que indica que en más de la mitad de la región hay un incrementando de los días con temperaturas mayores a 25° de temperatura máxima, con valores desde 0.4 a 1.3 días/año.

El índice de temperatura máxima extrema (TXx) presentó tendencias significativas de incremento en la parte oeste de la RH, en las estaciones 24028, 24088, 24133 y 24137 de los municipios de Ciudad Valles, Tanlaajás y Tamasopo con una magnitud de cambio de 0.80 °C/año.

En la Figura 56. los resultados indican que las tendencias en el índice de temperatura máxima más baja (TXn), se presentaron tendencias significativas de incremento en 87% de las estaciones analizadas, con una magnitud de cambio de 0.083 a 0.19°C/año. Lo que indica anomalías en la mayor superficie de la RH en los valores mínimos anuales de la temperatura máxima más baja diaria.

Para la RH el índice de temperatura mínima más alta (TNx) presentó tendencias significativas contrastantes de incremento en la parte centro y oeste con una magnitud e cambio de 0.031°C/año, y de decremento en las estaciones, con una magnitud de cambio promedio de -0.027 °C/año.

Las tendencias en el índice de temperatura mínima extrema (TNn) se presentan en la Figura 57. se encontraron tendencias en 48% de los registros analizados de la RH. De manera general todos estos cambios ocurren en la parte noroeste y suroeste; este índice indica que el valor mínimo anual de la temperatura mínima diaria está aumentando, con una magnitud de cambio de entre 0.06 a 0.13°C/año.

El índice denominado frecuencia de días frescos (Tx10p) presentó solamente tendencias significativas de decremento. Lo que exhibe anomalías en la mayor parte de la RH, se están decrementando los días frescos. Las tendencias de la frecuencia de días calurosos (Tx90p) presentó tendencias contrastantes, significativas de incremento y de decremento en gran parte de la RH.

El índice denominado frecuencia de noches frías (Tn10p) En la RH presentó tendencias contrastantes ya que en varios municipios se presentan tendencias positivas y negativas. El índice de frecuencia de noches cálidas (Tn90p) presenta tendencias contrastantes tanto positivas como negativas. En los municipios de Ciudad Valles, Aquismón, Tamasopo, Tanlaajás, Tamazunchale, Tamuín y San Vicente Tancuyalab.

Para el rango diurno de temperatura (DTR) que cuantifica la media anual de la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, presentó tendencias significativas en el 45% de las estaciones analizadas de la RH. Las tendencias significativas de incremento se presentaron en los municipios de Tamasopo, Aquismón, Tanlajás, Ébano, Ciudad Valles, Tamazunchale, Xilitla y San Vicente Tancuayalab.

Las tendencias en el índice simple de intensidad diaria (SDII) en la RH, como se presenta en la Figura 54. presentó tendencias en un 13% de las estaciones analizadas de la RH; las tendencias significativas ocurren en la parte oeste de la RH, con tendencia significativa en las estaciones 24001, 24020, 24136 y 24137 con registros de magnitud de cambio desde 0.09 a 0.21 mm/año. En los municipios de Tamasopo y San Vicente Tancuayalab.

5.9 Análisis y discusión de resultados de índices de cambio climático en la Región Altiplano en comparación con la Región Huasteca

Los resultados de la evaluación de índices de cambio climático indican mayores tendencias significativas al cambio en los valores de temperatura para las dos regiones de estudio.

En la RA para los índices climáticos de temperatura se registraron tendencias al cambio significativas en mayor porcentaje en los índices de TXx, Tx90p, TNn y DTR. Para los índices de precipitación la RA presentó tendencias significativas en los índices de Rx1day, SDII y R10 con cambios en un 52%, 42% y 47% de las estaciones analizadas respectivamente. Lo que indica que en la RA se presentan incrementos en la variable de temperatura máxima, así como anomalías positivas y negativas en la temperatura mínima. Los resultados de los índices de precipitación indican que en la mayor parte de la RA la precipitación tiende a concentrarse en un menor período.

En la RH se encontró mayor tendencia al cambio en las variables de temperatura. La RH presenta cambios de incremento en los valores de los índices de SU25, TXn, TNn y DTR y decrementos en los índices de TX10p y TN10p. Lo que indica que en la RH se presentan incrementos significativos de temperatura máxima, así como incrementos significativos de temperatura mínima. Para los índices climáticos de precipitación en la RH se encontraron solo unos cambios en de manera local.

En el presente trabajo y el realizado por Torres-Aldana (2022), fueron evaluados los 27 índices climáticos propuestos por el ETCCDI. Los índices climáticos de temperatura presentan similitudes en la RA, RH y Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde las tres regiones presentan tendencias significativas en los índices de días de verano (SU25), temperatura máxima extrema (TXx), temperatura mínima más alta (TNx), frecuencia de días frescos (Tx10p), frecuencia de días calurosos (Tx90p) y rango diurno de temperatura (DTR). Lo que exhibe que en la mayor parte del estado de San Luis Potosí está aumentando los valores de la temperatura máxima, los días de verano y calurosos están teniendo anomalías y la temperatura mínima está aumentando.

En los índices que utilizan los datos de precipitación, se presenta resultados con demasiada similitud en la Región Altiplano y Región Centro– Noroccidental de la Subcuenca Hidrológica del Río Verde, para estas dos regiones las tendencias significativas al cambio

de se presentaron en los índices precipitación máxima en un día (Rx1day) y (SDII) índice simple de intensidad diaria lo que sugiere que los días lluviosos tienden a ser más intensos, es decir, precipita más cantidad de lluvia en un día. En la Región Huasteca no se encontraron tendencias significativas al cambio en los índices climáticos de precipitación.

Torres *et al.*, (2010) analizaron los 27 índices climáticos en el estado de Veracruz, estado que colinda con la parte suroeste de la RH. Del proceso de control de calidad y comprobación de homogeneidad resultaron seleccionadas 50 series de precipitación y 30 de temperatura, las cuales son homogéneas, cuentan con más del 90% de los datos observados y con observaciones en el periodo 1963-2005. Documentaron la frecuencia de días calurosos y disminución de los días frescos que concuerda con los resultados observados en algunas estaciones al centro y norte de la RH. En la precipitación no se perciben cambios significativos en los registros anuales o en la ocurrencia de episodios extremos, sin embargo, en la mayor parte del estado la lluvia tiende a concentrarse en un menor período

Pita-Díaz (2019), documento un análisis de índices de cambio climático en el estado de Zacatecas, algunas de las estaciones analizadas colindan con las estaciones analizadas en este trabajo al noreste de la RA. Pita-Díaz (2019) utilizó la Librería Climdex.psic.ncdf en el lenguaje R, evaluó 54 estaciones meteorológicas para la variable de precipitación y 43 estaciones para temperatura cubriendo gran parte del estado de Zacatecas, sus resultados indican un incremento en la temperatura máxima, especialmente en los meses de primavera y verano, disminución de la temperatura mínima en las estaciones de otoño e invierno, así como eventos húmedos y secos más recurrentes. Se concluye que el comportamiento de los extremos de temperatura y precipitación puede ocasionar afectaciones en la agricultura de temporal, que es una de las principales actividades económicas en el estado de Zacatecas. Estos resultados coinciden con los resultados encontrados en la RA donde ocurren incrementos de temperatura máxima, así como las anomalías contrastantes en la lluvia.

5.10 Análisis y discusión de resultados de vulnerabilidad hídrica-ambiental para la Región Altiplano

En la RA se evaluaron 4 indicadores en conjunto para determinar vulnerabilidad hídrica-ambiental. El indicador de grado por riesgo de sequía se evaluó a escala municipal, en la RA la totalidad de los municipios se encuentran descritos como grado “alto” de peligro por sequía, solo el municipio de Charcas es definido como “muy alto” y el municipio de Salinas como grado “medio”. Ningún municipio de la RA presenta grado “bajo” de riesgo por sequía.

El indicador de condición de acuíferos determino a la totalidad de los acuíferos de la RA como grado de vulnerabilidad “muy alto” ya que no cuentan con disponibilidad de agua subterránea para su aprovechamiento. Solo el acuífero “Villa Hidalgo” presenta disponibilidad y se presenta como vulnerabilidad “media”.

El indicador de uso de suelo y vegetación se evaluó conforme a la serie de datos (VII) de INEGI, con datos a escala 1.250 000, en la RA presentó a un 77% de la superficie de la región definida como vulnerabilidad “baja” ya que en esta superficie existe algún tipo de

vegetación, y el 23 % de la superficie como vulnerabilidad “muy alta” por estar desprovista de vegetación.

El indicador de variabilidad climática se evaluó a escala de estación meteorológica, para la RA se presentan 12 estaciones con vulnerabilidad “muy alta” por presentar tendencias significativas al incremento. Y 9 estaciones con vulnerabilidad “baja” por no prestar tendencias significativas al cambio.

La RA presenta una vulnerabilidad hídrica-ambiental “media” y “alta” ante los efectos de la variabilidad y cambio climático. Lo que implica impactos negativos en varios sectores tanto ambientales como sociales y económicos. No se presentó vulnerabilidad “baja” y “muy alta” ya que por la escala diferente de los indicadores se imposibilita que se traslape la información de los indicadores con la vulnerabilidad definida como “baja” y “muy alta”.

5.11 Análisis y discusión de resultados de vulnerabilidad hídrica-ambiental para la Región Huasteca

En la RH se evaluaron 4 indicadores en conjunto para determinar vulnerabilidad hídrica-ambiental. El indicador de grado por riesgo de sequía se evaluó a escala municipal, en la RH la totalidad de los municipios se encuentran descritos como grado “alto” de peligro por sequía, ningún municipio es definido como “muy alto” y 4 municipios se definieron con grado “medio”. Ningún municipio de la RH presenta grado “bajo” de riesgo por sequía.

El indicador de condición de acuíferos determino a la totalidad de los acuíferos de la RH como grado de vulnerabilidad “muy alto” ya que no cuentan con disponibilidad de agua subterránea para su aprovechamiento.

El indicador de uso de suelo y vegetación se evaluó conforme a la serie de datos (VII) de INEGI, con datos a escala 1.250 000, en la RH presentó a un 63% de la superficie de la región definida como vulnerabilidad “baja” ya que en esta superficie existe algún tipo de vegetación, y el 37 % de la superficie como vulnerabilidad “muy alta” por estar desprovista de vegetación.

El indicador de variabilidad climática se evaluó a escala de estación meteorológica, para la RH se presentan 16 estaciones con vulnerabilidad “muy alta” por presentar tendencias significativas al incremento. Y 13 estaciones con vulnerabilidad “baja” por no prestar tendencias significativas al cambio.

La RH presenta una vulnerabilidad hídrica-ambiental “media” y “alta” ante los efectos de la variabilidad y cambio climático. Lo que implica impactos negativos en varios sectores tanto ambientales como sociales y económicos. No se presentó vulnerabilidad “baja” y “muy alta” ya que por la escala diferente de los indicadores se imposibilita que se traslape la información de los indicadores con la vulnerabilidad definida como “baja” y “muy alta”.

5.12 Análisis y discusión de resultados de vulnerabilidad hídrica-ambiental en la Región Altiplano en comparación con la Región Huasteca

Las dos regiones analizadas presentan vulnerabilidad hídrica-ambiental “media” alta” ante los efectos de la variabilidad y cambio climático.

El análisis de los cuatro diferentes indicadores en las dos regiones de estudio mostro resultados contrastantes, por ejemplo, aunque la RA es de mayor superficie se presentó mayor área desprovista de vegetación en la RH, lo que indica cambios de uso de suelo y vegetación considerable que traen consigo mayores impactos que se relacionan a los eventos de sequía, variabilidad climática y cambio climático.

El indicador de peligro por sequía muestra a la mayoría de los municipios de las regiones de estudio con peligro “medio” y “alto”. Los acuíferos de la RA como los de la RH se presentan sin disponibilidad de agua subterránea lo que indica una eventualidad de impactos negativos en el desarrollo ambiental, social y económico de estas dos regiones del estado de San Luis Potosí. El indicador de variabilidad climática nos indica tendencias significativas de incremento de temperatura promedio en las dos regiones a escala mensual en las cuatro épocas anuales, así como en los registros anuales.

En México se publicó el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC), por el INECC en 2019. Que muestra la vulnerabilidad actual y futura de los municipios de México ante deslaves, inundaciones y estrés hídrico. Se elaboró un análisis cuantificando la vulnerabilidad de diferentes aspectos ambientales y económicos, incluyendo para cada caso indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. Como resultados la proporción de la vulnerabilidad de producción forrajera ante el estrés hídrico en el estado de San Luis Potosí se presentó entre los valores de “Medio”, “Alto” y “Muy alto”. La vulnerabilidad de la producción ganadera ante el estrés hídrico se presentó como “sin vulnerabilidad”, “medio” y “bajo” en el estado de San Luis Potosí, sin embargo, con tendencias significativas de incrementar a futuro.

CONCLUSIONES

Después de cumplir los objetivos de la presente investigación, la hipótesis planteada en el presente trabajo de tesis es aceptada. La vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad climática y cambio climático es definida mediante los criterios de variabilidad climática, grado de peligro por sequía, condición de acuíferos y uso de suelo y vegetación.

Conforme a los resultados de tendencia al cambio y de rupturas de valores mensuales y anuales de temperatura promedio, temperatura máxima y mínima extrema, así como de precipitación anual se presenta variabilidad climática en la RA y RH, con mayores tendencias al cambio en las variables de temperatura promedio y temperatura máxima extrema. Los resultados indican tendencia al cambio para las variables de temperatura promedio y temperatura máxima extrema de forma local y regional, además de que se presentan en las cuatro épocas del año, así como en los registros medios anuales. La variable de temperatura mínima extrema presentó mayores tendencias al cambio en la época de verano e invierno y siendo esta mayormente de manera local en la RA y de manera local y regional en la RH.

En las dos regiones de estudio se encontró al mes de diciembre como el mes en el que están ocurriendo las tendencias de decremento de precipitación con valores desde -2 mm/ año hasta -8 mm/ año. Hay que mencionar que estos cambios en la variable de precipitación se presentan solo de manera local. La prueba de Pettit nos indica que para el periodo combinado evaluado de 1975-2019 se presentan las mayores rupturas en los años de la década de los 90 precisamente los años que más presentan ruptura son 1994 y 1997.

La variable de temperatura promedio en los meses de verano en la RA se identificaron los mayores cambios locales y regionales, en 11 estaciones se encontró una tendencia al incremento con una magnitud de cambio desde 0.022°C/año a 0.103 °C/año. El comportamiento de la temperatura promedio en los meses de verano en la RH es similar al de la RA, se diferenciaron cambios locales y regionales en 12 estaciones se presentó una tendencia al cambio de incremento con valores desde 0.015°C/año a 0.111 °C/año.

La variable temperatura máxima de la RA de los meses de verano es donde se presentan las mayores tendencias al cambio y mayores rupturas ya que, se encontraron cambios locales y regionales en 14 estaciones con tendencia al incremento con valores de magnitud de cambio que van desde 0.04°C/año a 0.182°C/año, para esta variable en los meses de julio, agosto y septiembre. No se presentaron cambios con tendencia al decremento. Con respecto a la RH en los meses de verano la temperatura máxima presenta las mayores tendencias al cambio y rupturas de los valores medios, tanto local y regionalmente, se distinguen 15 estaciones con tendencia al cambio de incremento con valores desde 0.040°C/año a 0.172°C/año y en dos estaciones se presenta una tendencia a la baja, la primera con clave 24072 con un valor de -0.04°C/año y la segunda con clave 24092 con un valor negativo de -0.08 °C/año.

La variable de temperatura mínima presentó los mayores cambios en los meses de verano e invierno en las dos regiones de estudio. En la RA en los meses de verano se distinguieron cambios locales y regionales en 6 estaciones se encontraron tendencias al incremento con magnitud de cambio que va desde los 0.056°C/año a los 0.143°C/año. Se presentaron 4 estaciones con tendencia de decremento con valores de -0.034 °C/año a -0.148°C/año. En la

RH en los valores de temperatura mínima de los meses de verano se presentaron cambios locales y regionales, la temperatura mínima está aumentando ya que se registraron 15 estaciones con tendencia al incremento con valores desde $0.014\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta $0.119\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. Y solo una estación, con clave 24020 registro tendencia al decremento con un valor de $-0.031\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.

En la RA en los meses de invierno, en la variable de temperatura mínima se encontraron tendencias al cambio locales y regionales en 7 estaciones de presentó una tendencia de incremento con valores de magnitud de cambio que van desde los $0.037\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.188\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, y en 6 estaciones está ocurriendo una tendencia al cambio de decremento con valores de $-0.032\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ a $-0.138\text{ }^{\circ}\text{C/año}$. Además, se hace evidente el incremento en la variable de temperatura mínima, para la RH en los meses de invierno, ya que se encontraron cambios locales y regionales solo de incremento en 15 estaciones con valores de magnitud de cambio de $0.051\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ hasta los $0.111\text{ }^{\circ}\text{C/año}$.

La sequía es uno de los eventos que, con cierta periodicidad, se recrudece en algunas zonas del país como consecuencia de la variabilidad y el cambio climático a nivel regional (Algara, *et al.*, 2009), el análisis de SPI a 12 meses nos indicó los años en los que ocurre sequía para las dos regiones de estudio, la prueba de tendencias de Mann-Kendall indicó una tendencia de incremento a sequía hidrológica en la RH. Se presentó una relación respecto a los resultados de SPI y rupturas, ya que en los años 1994 y 1997 se presentan eventos de sequía estos años fueron considerados como “liguemente seco” y “moderadamente seco”, ambos años fueron donde más se presentan rupturas de incremento en los valores medios de temperatura.

Los índices climáticos evaluados confirman la presencia de cambio climático en la RA y RH del estado de San Luis Potosí, Para la RA se registraron tendencias al cambio significativas en mayor porcentaje en los índices de: TXx con un 78%, Tx90p con un 78%, TNn con una 42% y DTR con un 47%. Y para la RH los índices que mayor presentan tendencia al cambio son: SU25 con un 54%, TXn con un 87%, TNn con un 48% y DTR con 45% del total de las estaciones analizadas.

Para los índices de precipitación la RA presentó tendencias significativas en los índices de Rx1day, SDII y R10 con cambios en un 52%, 42% y 47% de las estaciones analizadas respectivamente. Los resultados de los índices de precipitación indican que en la mayor parte de la RA la precipitación tiende a concentrarse en un menor período.

Se evidenció un comportamiento equivalente en la RA en los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático; las estaciones donde se presenta variabilidad climática (tendencia significativa de incremento) de temperatura promedio (24007, 24040, 24142, 24033, 24181, 24176, 24158 y 24073) localizadas geográficamente en el norte y centro de la RA; presentan indicios de cambio climático en el índice de frecuencia de días calurosos (TX90P).

Se evidenció un comportamiento equivalente en la RH en los fenómenos de variabilidad climática y cambio climático; las estaciones donde se presenta variabilidad climática (tendencia significativa de incremento) de temperatura promedio (24137, 24149, 24088, 24091) localizadas geográficamente en el oeste, centro y sur de la RH; presentan indicios de

cambio climático con incremento en la frecuencia de días calurosos (TX90P) y decremento en la frecuencia de días frescos (TX10P).

Las dos regiones de estudio presentaron una vulnerabilidad hídrica-ambiental media y alta ante los efectos de la variabilidad y cambio climático. La identificación de áreas que son vulnerables ante los efectos de la variabilidad y cambio climático puede mejorar los planes de manejo de recursos hídricos en el país.

Los resultados indican variabilidad y cambio climático en la RA y RH, así como una vulnerabilidad “media” y “alta”. En ambas regiones una semiárida y otra húmeda donde los recursos hidrológicos son muy vulnerables es de gran importancia evaluar la vulnerabilidad de un sistema que está enfrentando o enfrentará los impactos potenciales del cambio climático y los cambios en el uso de suelo.

Recomendaciones

Se recomienda realizar este tipo de evaluación de vulnerabilidad hídrica-ambiental en conjunto con variabilidad climática y cambio climático en otros estados de la República Mexicana, o bien, en otras regiones hidrológicas, para establecer si este aumento de temperatura promedio y temperatura máxima extrema, y cambios contrastantes de la precipitación es generalizada o local.

Se recomienda formular medidas de mitigación y adaptación ante el cambio climático orientadas a considerar el aumento de temperatura y disminución de precipitación de cada región considerando sus características hídricas-ambientales, como se documentó en este trabajo a pesar de que las dos regiones son parte del mismo estado de la República Mexicana, su vulnerabilidad, variabilidad y cambio climático no se comportan de la misma forma, lo que implica medidas, y gestión hídrica diferentes.

La información de calidad de estaciones meteorológicas es necesaria en las investigaciones de variabilidad y cambio climático y por consiguiente en los estudios de vulnerabilidad, por ello se recomienda atención y mejora continua en las estaciones meteorológicas que ya están operando en el estado.

El índice de vulnerabilidad hídrica-ambiental ante los efectos de la variabilidad y cambio climático puede ser complementado con más indicadores, que describan en mayor medida la situación hídrica y ambiental de las dos regiones de estudio. Se pueden incluir los aspectos sociales y económicos; algunos ejemplos son el crecimiento de la población, estrés hídrico o la calidad del agua.

REFERENCIAS

- Addinsoft (2022). XLSTAT statistical and data analysis solution. New York, USA. <https://www.xlstat.com/es>.
- Agha, O. M. A. M., Bağçacı, S. Ç., & Şarlak, N. (2017). Homogeneity analysis of precipitation series in North Iraq. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, 5(03), 57-63.
- Alcalá-Hernández, Eric José Alfaro-Martínez, Erick Roberto Bandala-González, Ana Cecilia Conde-Álvarez, Carlos Díaz-Delgado, (2020). Cambio climático y riesgos hidrometeorológicos. Puebla, México
- Algara Siller, M., C. Contreras Servín, G. Galindo Mendoza y J. Mejía Saavedra. (2009). Implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina. *Espaciotiempo* 4,56-67.
- Algara-Siller, M. (2009). Propuesta metodológica para medir el impacto de la sequía en la huasteca potosina y propuesta general de manejo. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Alvarez-Olguin, Gabriela and Carlos Escalante-Sandoval, (2016). Modes of Variability of Annual and Seasonal Rainfall in Mexico. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 1-14. DOI: 10.1111/1752-1688.12488
- Ayllón, T. (2003). Elementos de meteorología y climatología. 2da edición. México. Trillas. pp. 179-203.
- Blanco López, P., Vázquez Solís, V., Reyes Agüero, J. A., y Guzmán Chávez, M. G. (2015). Inventario de recursos turísticos como base para la planificación territorial en la zona Altiplano de San Luis Potosí, México. *Cuadernos De Turismo*, (35). pp. 17-19. <https://doi.org/10.6018/turismo>.
- Bradley, R. S., H. F. Diaz, J. K. Eischeid, P. D. Jones, P. M. Kelly and C. M. Goodess (1987), "Precipitation fluctuations over Northern Hemisphere land areas since the mid-19th century", *Science*, no. 237, pp. 171-175.
- Brunetti, M., B. Letizia, M. Maurizio and N. Teresa (2000), "Precipitation intensity trends in Northern Italy", *International Journal of Climatology*, no. 20, pp. 1017-1031.
- Campos-Aranda Daniel Francisco, (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Volume 16, Issue 3, Pages 355-368, ISSN 1405-7743.
- Campos-Aranda, Daniel Francisco. (2017). Cuantificación de sequías meteorológicas mensuales: cotejo de cuatro índices en tres localidades de San Luis Potosí, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(3), 159-172. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-11>.
- Castañeda, Xochizeltzin (2010), "Determinación de áreas naturales prioritarias de conservación con potencial turístico en el estado de San Luis Potosí: una propuesta de sustentabilidad", tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.
- 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>
- 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>
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2010. Confluencia de las huastecas.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2020. Áreas Naturales Protegidas. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

David Ortega-Gaucin, Jesus de la Cruz Bartolon y Heidy Viviana Castellano Bahena. (2018). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto del cambio climático en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México. Pag. 1-14.

DOF (2020). ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

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.

FMI (Finnish Meteorological Institute). 2002. Detecting trends of anual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. The Excel template the application MAKESENS.

García, E. & CONABIO (1998). Apuntes de climatología. 2da edición. México. Según el programa vigente en las carreras de biólogos. pp. 55-59.

Gómez, J. J. (2001). Vulnerabilidad y medio ambiente. In *International Seminar Las Diferentes Expresiones de la Vulnerabilidad Social en América Latina y el Caribe*, CEPAL, Santiago de Chile.

Guijarro, J. A. (2018). Homogenization of climatic series with Climatol. Reporte técnico State Meteorological Agency (AEMET), Balearic Islands Office, Spain.

Haylock, M. and N. Nicholls (2000), "Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910–1998", *International Journal of Climatology*, no. 20, pp. 1533–1541.

Hirsch R.M., Helsel D.R., Cohn T.A., Gilroy E.J.,(1993). *Statistical Analysis of Hydrologic Data*, capítulo 17, pp. 17.1–17.55, en: *Handbook of Hydrology*, editor in chief David R. Maidment, Nueva York, McGraw-Hill, Inc..

Hurrell, J. W. (1995), "Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation", *Science*, no. 296, pp. 676–679.

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.

IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Felipe I. Arreguín Cortés, Mario López Pérez, Olivia Rodríguez López y Martín José Montero Martínez. Jiutepec, Mor.

IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2017). Cambio climático: selección, clasificación y diseño de medidas de adaptación. Pedro Antonio Guido Aldana. Jiutepec, Morelos.

INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2002). Sistema Nacional de Información Municipal. Disponible en http://www.snim.rami.gob.mx/enciclopedia_v2/PruebaPropuesta.php?id=1905&tipo=m&e=24&m=54. Consultado el 22 d julio de 2022.

INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018). Variabilidad climática. México. Disponible en: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/adaptacion-al-cambio-climatico-91027>

INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2019a). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático México. 1ª. Edición (libro electrónico). México. Disponible en: https://atlasvulnerabilidad.inecc.gob.mx/page/fichas/ANVCC_LibroDigital.pdf.

INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2019b). Efectos del Cambio Climático.

INEGI. (2007). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo agropecuario. San Luis Potosí. México. pp. 3-11.

- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Cambio Climático (2020). Mapas temáticos. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgAR/>
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2014). Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie V / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2002). Síntesis de información geográfica del estado de San Luis Potosí. Anexo cartográfico, INEGI, México.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report Summary for Policymakers. Assessment of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IPCC (2013). Resumen para responsables de políticas. Cambridge. Stocker, T.F. and IPCC and D. Qin and Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC, Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2001). Cambio climático. Informe de síntesis. Tercer informe de evaluación.
- Jaimes-Arredondo. A., (2020). Análisis de tendencias de precipitación y temperatura en la región altiplano del estado de San Luis Potosí, México. (Trabajo Recepcional de Licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México.
- Juárez-Hernández. A. (2015). Adaptación del modelo IDW mediante series de tiempo para el análisis de tendencias de precipitación pluvial. (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
- Karl, T. R., Nicholls, N., y Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop summary. *Climatic Change*, 3-7.
- Kendall, M. (1975). Rank Correlation Methods, 4th Ed., Charles Griffin, London.
- Kruger, A. C. (2006), "Observed trends in daily precipitation indices in South Africa: 1910–2004", *International Journal of Climatology*, 26(15), pp. 2275–2285.
- Kumar, P., Sharma, M.C., Saini, R. Climatic variability at Gangtok and Tadong weather presentatories in Sikkim, India, during 1961–2017. *Sci Rep* 10, 15177 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71163-y>
- Landa, R., Magana, V. y Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Pág. 133
- LGCC. Ley General de Cambio Climático (2012). Disponible en <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>.
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q. et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Sci Rep* 11, 1280 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80527-3>
- Livermann, D. (1990). Vulnerability to global environmental change. In Kasperson, R.E., Dow, K, Golding, D. and Kasperson, J.X., editors, *Undersatanding global environmental change: the contributions of risk análisis and management*, Worcester, MA: Clark University, The Earth Transformed Program.
- Magaña Rueda, V. O. (2011). Cambio Climático: El reto del siglo. *Investigación Ambiental*, 3(1), 63-67.
- 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.
- Méndez González, Jorge, Návar Cháidez, José de Jesús, & González Ontiveros, Vladimir. (2007). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones geográficas*, (65), 38-55., disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112008000100004&lng=es&tlng=es. (Recuperado el 30 de octubre de 2019).

- Miklos, T (2018): Cambio climático y seguridad nacional: perspectiva, escenarios y estrategias. 1a edición. México. Siglo XXI Editores. 2018. pp. 73-75
- Mitchell, J.K. (1989). Hazards research, In Gaile, G.L. and Willmontt, C.J., editors, *Geography in America*, Columbus, OH: Merrill, 410-24.
- NOM-011-CONAGUA-2015. NORMA Oficial Mexicana. Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales
- OMN. Organización Meteorológica Mundial. (2012): Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación (OMM-Nº 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra.
- Ortega-Gaucin David y Velasco Israel (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC - Vol. 5 - Nº 2* pp. 78 – 90
- PEACC-SLP. Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del estado de San Luis Potosí. (2018). Gobierno del Estado de San Luis Potosí, México. pp. 49-55. Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental.
- PECC, Programa Especial de Cambio Climático (2014-2018). Disponible en: http://www.cenapred.unam.mx/es/documentosWeb/Avisos/cambio_climatico.pdf
- PED (Plan Estatal de Desarrollo-2021-2027), Recuperación hídrica con enfoque de cuencas. Gobierno del Estado de San Luis Potosí, México.
- Pettit AN. (1979) A non-parametric approach to the change-point detection. *Appl Statist* 28(2):126–135.
- Pita-Díaz O., (2019). Análisis de índices de cambio climático en el estado de zacatecas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.
- 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, A.C. México.
- Rocha, H., Arredondo, A. J., Benavides, A. C., Cuevas, C. R., Giácoman-Vallejos, G., de Alba, J. A., & Almazán, R. C. (2022). Tendencias de precipitación y temperatura en el altiplano potosino, México (1975-2015). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(4), 75-126.
- Santos J.L. (2004). RCLimDex (1.0). Manual del Usuario. Centro Internacional Para la Investigación del Fenómeno de El Niño.
- SEDECO, (2013). Secretaría de Desarrollo Económico. Estudios: El Estado de San Luis Potosí. Gobierno del Estado de San Luis Potosí, México. Disponible en <http://www.sdeslp.gob.mx/estudios/perfiles/Estado%20de%20slp.pdf> (Recuperado el 29 de agosto de 2019).
- SEGAM. Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental. 2022. Áreas Naturales Protegidas del estado. Disponible en <https://slp.gob.mx/segam/Paginas/SIACC/AreasNaturalesProtegidas.aspx>.
- SEMARNAT (2021). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México y el cambio climático global. Cuarta reimpresión, primera reedición pp. 19-23
- SGM, (2004). Servicio Geológico Mexicano. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Vanegas, S.L.P. México, México: Servicio Geológico Mexicano, Consejo de Recursos Minerales, Fideicomiso de Fomento Minero.
- SGM, (2005a). Servicio Geológico Mexicano. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Cedral, S.L.P. México, México: Servicio Geológico Mexicano, Gobierno del Estado de San Luis Potosí, Secretaría de Desarrollo Económico.
- SGM, (2005b). Servicio Geológico Mexicano. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Matehuala, S.L.P. México, México: Servicio Geológico Mexicano, Gobierno del Estado de San Luis Potosí, Secretaría de Desarrollo Económico.

SGM, (2009). Servicio Geológico Mexicano. Inventario físico de los recursos minerales del municipio Catorce, S.L.P. México, México: Servicio Geológico Mexicano, Consejo de Recursos Minerales, Fideicomiso de Fomento Minero.

SMN. Servicio Meteorológico Nacional, (2022). Monitoreo de índice estandarizado de precipitación. Disponible en <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/spi>.

Tigkas D., Vangelis H., Tsakiris G., 2018. Drought characterisation based on an agriculture-oriented standardised precipitation index. *Theoretical and Applied Climatology*, doi: 10.1007/s00704-018-2451-3 [<http://dx.doi.org/10.1007/s00704-018-2451-3>]

Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, resilience and the collapse of society*. Environmental Monograph 1. Toronto, Institute for Environmental Studies.

Torres Alavez, J. A., Tejada, A., Vázquez Aguirre, J. L., Brunet, M., Hernández Ávila, P., & Ruiz Barradas, A. (2010). Índices de cambio climático y análisis de variabilidad en el estado de Veracruz, México.

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

UNDRO, (1982). United Nations Disaster Relief Organization. *Natural disasters and vulnerability analysis*. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator.

Vázquez-Aguirre, J. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

W. Neil Adger, *Vulnerability, Global Environmental Change*, Volume 16, Issue 3, 2006, Pages 268-281, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378006000422>).

Wilhite, D. A., and O. Vanyarkho, 2000. Drought: pervasive impacts of a creeping phenomenon. *Drought a global assessment*, D. A. Wilhite (Ed.), Routledge, vol. 1, p. 245–25