



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**Detección de cambio climático en la cuenca del río Conchos, mediante
índices climáticos**

que para obtener el grado de
**Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta
Oscar Pita Díaz

Tutor: Dr. Martín José Montero Martínez



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “Detección de cambio climático en la cuenca del río Conchos, mediante índices climáticos”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

OSCAR PITA DÍAZ

Jiutepec, Morelos, 17 de diciembre del 2018

Resumen

El cambio climático es considerado como el mayor problema a ser enfrentado por la humanidad en el presente siglo. En el presente trabajo se analizaron 6 de los 27 índices propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) en la cuenca del río Conchos, además de integrar los análisis del Índice Normalizado de Precipitación (SPI por sus siglas en inglés) y el Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI por sus siglas en inglés). Se utilizaron bases de datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima en el periodo 1951 al 2010. Los datos fueron sometidos a un control de calidad y homogeneización de 106 estaciones (en el caso de precipitación) y 97 estaciones (temperatura) situadas dentro de la cuenca del río Conchos mediante la librería CLIMATOL (Guijarro, 2018b), disponible en el Lenguaje R, creando una malla homogeneizada con las tres variables en un periodo de 60 años. Se analizaron las tendencias lineales de los índices calculados, así como su significancia estadística, mostrando indicios como el aumento de la temperatura mínima extrema hacia los últimos años. Con los índices normalizados se observaron dos periodos de sequía muy intensos en las décadas de 1950 y 1990 mencionados en otros trabajos, esta última extendiéndose hasta principios del Siglo XXI. En concordancia con el IPCC en sus informes, se corrobora que los periodos húmedos y secos (extremos) son más recurrentes y duraderos hacia las últimas décadas.

Palabras clave: Cambio climático, detección, homogeneización, cuenca, río Conchos, precipitación, temperatura.

Dedicatorias

A **Niamh Pita Ayala**, el ser que me ha cambiado la vida. Gracias por llenarnos de felicidad. TE AMO HIJA MÍA, siempre lucharé por ti, para que seas feliz.

A **Rosario Ayala**, gracias esposa mía por creer en mi, por apoyarme en todos los sentidos, gracias por ser mi maestra de programación, fuiste pieza indispensable para poder concluir este trabajo. TE AMO.

A mis padres, **Carmelo Pita y Lilia Díaz**, gracias por todo su apoyo, jamás me cansaré de agradecer todo lo que han hecho por mi y de decirles cuanto los amo. Gracias por todo lo que me han dado, por enseñarme grandes valores y por prepararme para la vida.

A mis hermanos, **Paco, Edson y Marco**, gracias por todas sus muestras de cariño. Los amo hermanos.

A mis abuelos, **Gabino Pita, Socorro Landa, Isabel Álvarez y Miguel Díaz (†)**, por sus enseñanzas y valores que en mi han reflejado.

A mis sobrinos **Camila, Danilo y Carlita**, por ser la alegría de la casa.

A cada integrante de mi familia. No cabe duda de que soy muy afortunado el estar rodeado de personas muy especiales.

Agradecimientos

A mi tutor **Dr. Martín José Montero Martínez** por aportarme conocimientos, enseñanzas y su valioso tiempo para realizar este trabajo de investigación.

Al **Dr. Julio Sergio Santana** por ser parte de mi comité revisor, además de aportar valiosos conocimientos y resolver dudas, mil gracias por todo su tiempo y convivencia.

A mis sinodales **Dr. René Lobato, Dr. David Ortega y Dr. Ronald Ontiveros**, gracias por tomarse su tiempo y realizar observaciones para mejorar mi trabajo de investigación.

Al **Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**, por el apoyo económico brindado durante mi estancia en la maestría. Además de la hospitalidad en sus instalaciones.

Al personal de la **Subcoordinación del Posgrado IMTA** por las atenciones brindadas a un servidor.

A mi compañero y gran amigo **Jorge Enrique Hernández**, por las horas compartidas en clase, noches de estudio, convivencias y risas. Gracias Bro, eres una excelente persona.

Agradezco al **Dr. José Antonio Guijarro**, miembro de la **Agencia Estatal de Meteorología**, por haber aceptado realizar una estancia de capacitación en la ciudad de Palma de Mallorca, España.

A **Naydú Pérez e Israel Torres**, por el apoyo brindado sobre las dudas y sugerencias para mejorar mi trabajo. Gracias.

A los investigadores del programa de Hidrometeorología que me impartieron conocimientos en sus clases, cursos y asesorías.

Índice general

Índice general	1
Índice de figuras	4
Índice de tablas	8
1. Introducción	9
1.1. Región de estudio	11
1.2. Aspectos generales del cambio climático	14
1.3. Análisis de calidad de datos	17
1.4. Homogeneización de series climáticas	18
1.5. Índices de cambio climático	19
1.6. Índice Normalizado de Precipitación (SPI)	21
1.7. Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) .	22
1.8. Objetivo	23
1.8.1. Objetivos específicos	23
1.9. Hipótesis	23
2. Metodología	24
2.1. Disponibilidad y selección de datos	24

2.2.	Homogeneización de datos climáticos en el periodo 1951-2010	27
2.2.1.	Preparación de los archivos de entrada	29
2.2.2.	Análisis exploratorio de los datos	30
2.2.3.	Homogeneización de series diarias	35
2.2.4.	Generación de la malla homogeneizada	37
2.3.	Cálculo de índices de cambio climático	40
2.3.1.	Cálculo de índices con Climdex.psic.ncdf	40
2.3.2.	Cálculo del SPI y SPEI	42
2.4.	Análisis de índices y tendencias	43
2.4.1.	Diagrama <i>Hovmöller</i>	44
2.4.2.	Diagrama Hovmöller modificado	44
2.4.3.	Diagrama <i>Código de barras</i>	45
2.4.4.	Paquete <i>Greenbrown</i>	46
3.	Resultados	47
3.1.	Índices de cambio climático del <i>ETCCDI</i>	48
3.1.1.	Días de verano (SU30)	49
3.1.2.	Días de heladas (FD0)	51
3.1.3.	Temperatura máxima extrema (TXX)	54
3.1.4.	Temperatura mínima extrema (TNN)	56
3.1.5.	Días secos consecutivos (CDD)	59
3.1.6.	Precipitación total anual (PRCPTOT)	62
3.2.	Índice Normalizado de Precipitación (SPI)	64
3.3.	Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)	67

3.4. Análisis de tendencias	69
4. Conclusiones y Recomendaciones	76
4.1. Conclusiones	76
4.2. Recomendaciones	78
A. Estaciones en la cuenca del río Conchos utilizadas para el control de calidad y homogeneización	79
B. Descripción de los 27 índices del ETCCDI (Zhang y Yang, 2004)	82
C. Malla homogeneizada de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, periodo 1951-2010 e Índices de cambio climático en malla	88
D. Componentes y estructura obtenida en el cálculo del SPI y SPEI	89
E. Propiedades de los archivos raster a utilizar para el Diagrama Hovmöller modificado	90
Referencias	91

Índice de figuras

1.1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Conchos.	11
1.2. Climograma de precipitación, temperatura máxima y mínima en la cuenca del río Conchos	13
1.3. Precipitación media anual en el periodo 1951-2010 en la cuenca del río Conchos.	13
1.4. Temperatura máxima y temperatura mínima media anual.	14
1.5. Cambios observados y proyectados en la temperatura media anual en superficie.	16
2.1. Diagrama de flujo del procedimiento para la homogeneización y cálculo de índices climáticos.	25
2.2. Estaciones con datos suficientes dentro de la cuenca del río Conchos.	26
2.3. Disponibilidad de datos en el periodo 1951-2010 en la cuenca del río Conchos.	26
2.4. Desviaciones de la recta de regresión lineal	29
2.5. Archivos de entrada para el uso de Climatol	30
2.6. Disponibilidad de datos de temperatura máxima por estación y global.	31
2.7. Conjunto de datos por estación e histograma global de datos. . . .	32
2.8. Correlograma de series y mapa de estaciones.	32
2.9. Anomalías de la etapa 3.	33

2.10. Histograma de anomalías de todo el conjunto de datos.	34
2.11. Histogramas de los valores máximos de SNHT	34
2.12. Calidad/singularidad de las series finales	35
2.13. Anomalías de detección de ventanas escalonadas superpuestas y detección de series completas	35
2.14. Reconstrucción de series completas	36
2.15. Ejemplo de visualización de la malla homogeneizada de la variable temperatura máxima.	39
2.16. Diagrama de flujo para el cálculo del índice SU30.	41
2.17. Ejemplo de diagrama Hovmöller modificado aplicado para el índice TXX.	45
3.1. Regionalización de la cuenca del río Conchos.	48
3.2. Mapa promedio de los días de verano en la cuenca del río Conchos	49
3.3. Diagrama <i>código de barras</i> de los días de verano en la cuenca del río Conchos.	50
3.4. Diagrama <i>Hovmöller</i> de los días de verano (SU30) en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010.	51
3.5. Mapa promedio de los días de heladas en la cuenca del río Conchos	52
3.6. Diagrama <i>código de barras</i> de los días de heladas en la cuenca del río Conchos.	53
3.7. Diagrama <i>Hovmöller modificado</i> de los días de heladas (FD0) en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010.	53
3.8. Mapa promedio de la temperatura máxima extrema en la cuenca del río Conchos	54
3.9. Diagrama <i>código de barras</i> de la temperatura máxima extrema (TXX) en la cuenca del río Conchos.	55

3.10. Diagrama <i>Hovmöller</i> de la temperatura máxima extrema (TXX) en la cuenca del río Conchos.	56
3.11. Mapa promedio de la temperatura mínima extrema en la cuenca del río Conchos	57
3.12. Diagrama <i>código de barras</i> de la temperatura mínima extrema (TNN) en la cuenca del río Conchos.	58
3.13. Diagrama <i>Hovmöller</i> de la temperatura mínima extrema (TNN) en la cuenca del río Conchos.	59
3.14. Mapa promedio de los días secos consecutivos en la cuenca del río Conchos	60
3.15. Diagrama <i>Código de barras</i> de los días secos consecutivos (CDD) en la cuenca del río Conchos.	61
3.16. Diagrama <i>Hovmöller modificado</i> de los días secos consecutivos (CDD) en la cuenca del río Conchos.	61
3.17. Mapa promedio de la precipitación total en la cuenca del río Conchos	62
3.18. Diagrama <i>Código de barras</i> de la precipitación total (PRCPTOT) en la cuenca del río Conchos.	63
3.19. Diagrama <i>Hovmöller</i> de la precipitación total (PRCPTOT) en la cuenca del río Conchos.	64
3.20. Índice Normalizado de Precipitación (SPI) en escalas 1 a 12 en la cuenca del río Conchos.	65
3.21. Diagrama <i>Hovmöller modificado</i> del Índice Normalizado de Precipitación (SPI) identificando sequías intensas en presas ubicadas en la cuenca del río Conchos.	67
3.22. Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) en escalas de 1 a 12 en la cuenca del río Conchos.	68
3.23. Tendencias y valores <i>P</i> de los índices SU30 y FDO en la cuenca del río Conchos.	70

3.24. Tendencias y valores P de los índices TXX y TNN en la cuenca del río Conchos.	71
3.25. Tendencias y valores P de los índices SU30, FD0, TXX y TNN en la cuenca del río Conchos.	72
3.26. Tendencias y valores P de los índices PRCPTOT y CDD.	73
3.27. Tendencia y valor P del Índice Normalizado de Precipitación y del Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración.	74
3.28. Tendencias y valores P de los índices PRCPTOT, CDD, SPI y SPEI en la cuenca del río Conchos.	75

Índice de tablas

1.1. Resumen de los 27 índices de cambio climático del <i>ETCCDI</i>	20
1.2. Clasificación del Índice Normalizado de Precipitación.	21
2.1. Tabla comparativa de los métodos del proyecto MULTITEST.	27
2.2. Tabla de datos para graficar el diagrama Hovmöller modificado.	45
3.1. Tabla de periodos de sequías intensas en embalses ubicados en la cuenca del río Conchos	66
3.2. Tabla de porcentaje de superficie ocupada por los valores P estadísticamente significativos en la cuenca del río Conchos.	75
A.1. Estaciones utilizadas para el control de calidad y homogeneización en la cuenca del río Conchos.	81

Capítulo 1

Introducción

Es indudable que hoy en día el tema de cambio climático es un tema de importancia mundial y está en las agendas ambientales de la mayoría de los países en el mundo (IPCC, 2014).

El cambio climático es considerado como el mayor problema a ser enfrentado por la humanidad en el presente siglo. Cuatro son las áreas que ocupan la atención mundial sobre esta problemática (Moreno-Sánchez y Urbina-Soria, 2008):

- La investigación científica y tecnológica relacionada con el fenómeno y sus impactos.
- Las medidas para la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero.
- Las medidas para la adaptación a las consecuencias ya inevitables del cambio del clima.
- La sensibilización y difusión de resultados y medidas que permitan una mayor y mejor participación de los actores sociales en el enfrentamiento del problema.

El cambio climático es un fenómeno mixto que se presenta en distintas escalas y con distintos grados de complejidad, por lo que se requiere abordarse mediante una perspectiva interdisciplinaria e integral (Salazar y Masera, 2010).

Los cambios en el sistema climático en el tiempo se deben a variaciones en la dinámica interna del sistema (atmósfera, hidrósfera, criósfera, etc.), o bien, a la presencia de forzamientos externos (actividad solar, volcánica, aumento de gases

de efecto invernadero, cambios de uso de suelo) (Vázquez-Aguirre, 2010).

Las evidencias de que el clima del planeta cambia por causa de las actividades humanas han llevado a los gobiernos del mundo a acelerar su trabajo en materia de adaptación. En México, los trabajos de diagnóstico y prospectiva en materia de vulnerabilidad han adquirido mayor importancia en años recientes, ya que se reconoce que el modelo actual de aprovechamiento de los recursos naturales y de crecimiento es insostenible. Si no se toma en cuenta la dinámica del clima y del ambiente, con énfasis en las causas de los desastres en la sociedad, el ambiente y la economía, la recuperación del problema será más costosa (CONAGUA, 2012).

Durante las últimas décadas se ha mencionado de las potenciales proyecciones climáticas esperadas para el presente siglo en diferentes regiones de México y del planeta, las proyecciones que han sido más o menos consistentes en esperar un aumento en las temperaturas de 2 a 5°C para finales de siglo, dependiendo de la trayectoria de concentración representativa (RCP, por sus siglas en inglés) y/o de la zona geográfica situada. En la región noroeste de México se espera un mayor calentamiento hacia esa zona, además de un déficit de precipitación entre el 15 y 20 % hacia el final del presente siglo comparado con la actual. Los modelos climáticos globales no muestran una concordancia con los regionales en la precipitación, aunque sí la muestran en la temperatura (Montero-Martínez e Ibáñez-Hernández, 2017).

Los estudios de cambio climático a escala de cuencas hidrográficas en México han tomado importancia en los últimos años (Castillo-Liñán, 2017; González-Villela, Montero-Martínez y Santana-Sepúlveda, 2017; Mateos, Santana-Sepúlveda, Montero-Martínez, Deeb y Grunwaldt, 2016; Montero-Martínez, Santana-Sepúlveda, Mateos-Farfán e Ibáñez-Hernández, 2017; Montero-Martínez, Santana-Sepúlveda, Pérez-Ortiz, Pita-Díaz y Castillo-Liñán, 2018; Peña y Trujillo, 2017; Pérez-Ortiz, 2017; Rivas-Acosta y Montero-Martínez, 2013, 2014; Rodríguez-González y Pineda-Martínez, 2017; Wagner y Echeverría-Vaquero, 2004), así como de sequías (Kim, Valdés, y Aparicio, 2002; Velasco, Aparicio, Valdés, Velázquez, y Kim, 2004), este trabajo intentará mostrar las evidencias de cambios en el clima en la cuenca del río Conchos con base en el análisis de observaciones de datos de precipitación y temperatura en un periodo de 60 años, calculando índices climáticos establecidos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) para identificar las modificaciones en el comportamiento del clima en la región de estudio. Además de incluir el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en inglés) (McKee, Doeskin, y

Kleist, 1993, 1995) y el Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) (Vicente-Serrano, Beguería, y López-Moreno, 2010), estos dos últimos permiten identificar periodos húmedos y secos. Debido a su ubicación geográfica e importancia productiva nacional, es importante revisar la problemática asociada a fenómenos hidrometeorológicos de alto impacto como sequías y eventos extremos (olas de calor y heladas) en la cuenca del río Conchos.

1.1. Región de estudio

La cuenca del río Conchos está localizada en la porción sureste del estado de Chihuahua, abarcando 41 de sus 67 municipios y dos municipios del estado de Durango (Figura 1.1). El principal escurrimiento natural es el río Conchos, naciendo en la Sierra Madre Occidental con precipitaciones provenientes del océano Pacífico. Esta cuenca ha sido objeto de diversos estudios debido a la importancia que representa para la economía del estado de Chihuahua, además del volumen de agua compartido internacionalmente dentro del Tratado de Aguas Internacionales de 1944 entre México y los Estados Unidos de América (Montero-Martínez e Ibáñez-Hernández, 2017).

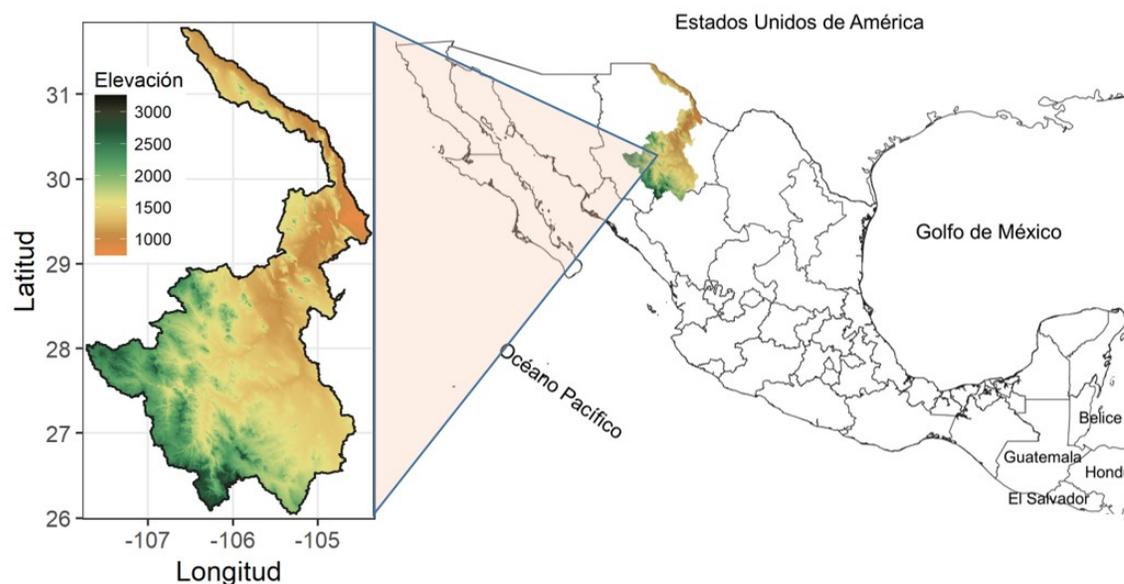


Figura 1.1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

La cuenca del río Conchos es la más importante dentro de la Región Hidrológica 24 Río Bravo, tanto por su extensión al abarcar 74,371.79 km² (30.8 % del total) de su superficie como por la disponibilidad de agua que alcanza alrededor de

los 4,143 millones de metros cúbicos (Mm^3), considerando sus dos fuentes de abastecimiento: por un lado, $3,534 \text{ Mm}^3$ provenientes de los escurrimientos superficiales vírgenes y 609 Mm^3 de 17 depósitos subterráneos identificados (CONAGUA, 2011).

Por su posición geográfica, la cuenca del río Conchos recibe flujos de humedad de ambos océanos, así como del cinturón de altas presiones (propio de la circulación general), favoreciendo así que los vientos sean descendentes y estables en la región (Carlos González-Herrera and María L. García-Amaral and Gerardo Mollinedo-Beltrán and Olga Correa-Miranda, 2015). La cuenca del río Conchos es un área llena de contrastes climatológicos en donde la parte montañosa es templada en verano, y en invierno muy fría y relativamente húmeda; mientras que en la parte media está compuesta de llanuras onduladas y semiáridas, y la parte baja es desértica y extremosa (Wagner y Echeverría-Vaquero, 2004).

La región centro-norte de México, donde se sitúa la cuenca del río Conchos, es una región montañosa que se encuentra aislada del sistema monzónico y expuesta a sistemas de alta presión de latitudes altas que se propaga del norte hacia el sur de EUA. La precipitación en esta zona es sensible a las variaciones de la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico, principalmente la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) y el El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés); esta región se ve fuertemente afectada por los sistemas frontales invernales, por lo que el clima de esta zona es determinado por varios factores debido a su posición en la zona de transición de los climas cálidos y húmedos hacia las zonas áridas y semiáridas (Figura 1.2). La precipitación en esta región se ve modulada por fenómenos como el ENSO, principalmente, en combinación con ciertas fases de oscilaciones multidecadales como la PDO y la Oscilación del Atlántico Norte modulan los patrones espaciales y temporales en la estacionalidad de las precipitaciones (Rodríguez-González y Pineda-Martínez, 2017).

El intervalo de precipitación media anual en la cuenca del río Conchos durante el periodo 1951-2010 oscila entre 100 y 630 mm por año (Figura 1.3), mientras que la temperatura máxima se encuentra entre 15 y 30 °C y la temperatura mínima se encuentra entre 1 y 12 °C (Figura 1.4), dando origen a un clima predominantemente semiseco templado (Peña y Trujillo, 2017).

La región norte de México, en donde se encuentra la zona de estudio, de forma natural se caracteriza como la más árida del país y debido a la vulnerabilidad

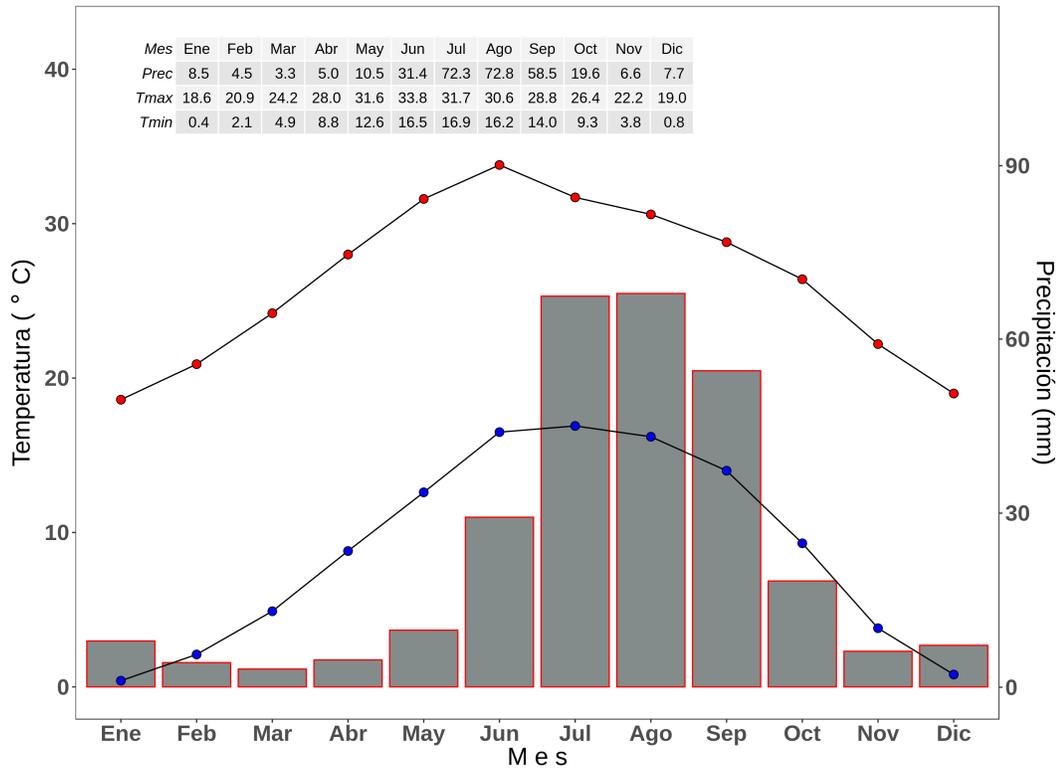


Figura 1.2: Climograma de precipitación (en barra), temperatura máxima (puntos en color rojo) y temperatura mínima (puntos en color azul) en el periodo 1951-2010 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia a partir de datos homogeneizados.

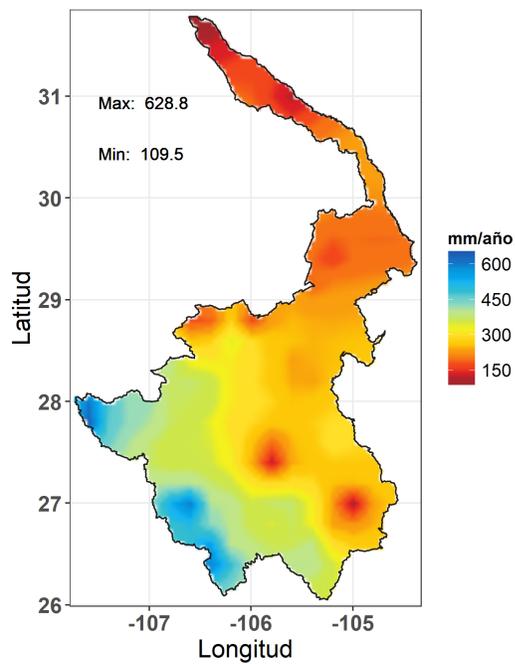


Figura 1.3: Precipitación media anual en el periodo 1951-2010 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia a partir de datos homogeneizados.

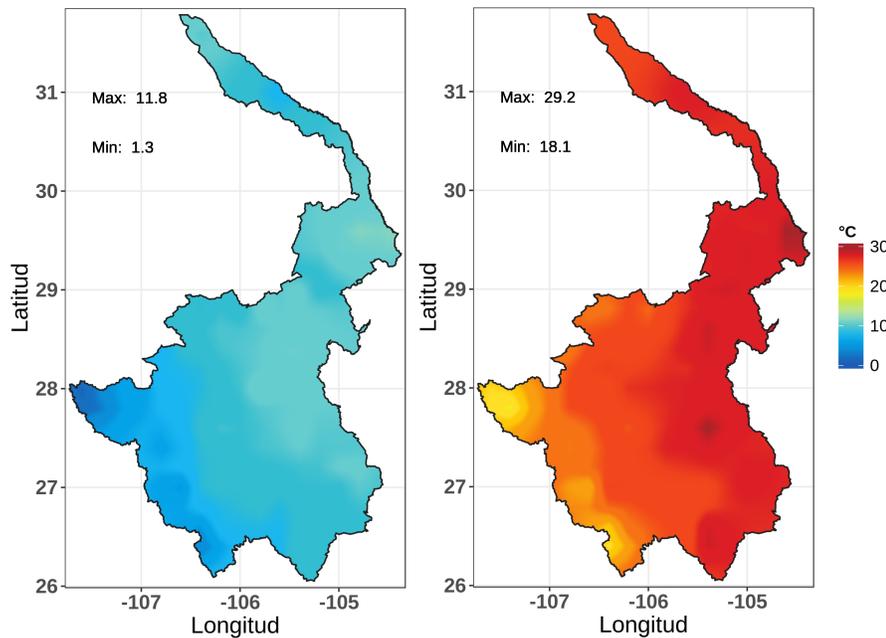


Figura 1.4: Temperatura máxima media anual (derecha) y temperatura mínima media anual (izquierda) en el periodo 1951-2010 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia a partir de datos homogeneizados.

climatológica la cuenca del río Conchos está sujeta a sequías frecuentes y severas en periodos recurrentes, que conforme a los escenarios de cambio climático habrían de incrementarse, afectando de manera seria a las actividades agrícolas que son la base económica de la región, resultando ser una de las más importantes en el ámbito económico y agrícola del país.

1.2. Aspectos generales del cambio climático

Como se menciona en párrafos anteriores, el cambio climático es un tema importante en la actualidad. Dos definiciones para el término **cambio climático** que son comúnmente utilizadas entre las comunidades científicas son:

“Un cambio en el clima que es atribuible directa o indirectamente a las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera planetaria y que se observa en periodos de tiempo comparables, en forma adicional a la variabilidad climática natural”, así es como lo define *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUNCC)* el término de cambio climático (IPCC, 2014).

Por otro lado, el *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)*

define al cambio climático como *“Variación del estado del clima, identificable mediante pruebas estadísticas en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, persistente durante grandes periodos de tiempo”* (IPCC, 2014).

Para este estudio se utilizará la segunda definición descrita, puesto que se utilizarán pruebas estadísticas para identificar las variaciones en el clima de la cuenca del río Conchos.

Los cambios en el sistema climático a través del tiempo pueden deberse a variaciones en la dinámica interna del sistema (atmósfera, hidrósfera, criósfera, etc.), o bien, a la presencia de forzamientos externos de origen natural (variaciones en la actividad solar o actividad volcánica) o antrópico (aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.). Cuando no existen forzamientos externos, los cambios en el clima son influenciados a procesos de la dinámica interna del sistema asociados a interacción océano-atmósfera como El Niño Oscilación del Sur (ENSO), la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) (Vázquez-Aguirre, 2010).

Los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todo el mundo durante las últimas décadas, para los sistemas naturales la evidencia de los impactos del cambio climático es más sólida. En muchas regiones del mundo las variaciones de precipitación, derretimiento de nieve y hielo están alterando a los sistemas hidrológicos afectando el recurso hídrico en términos de calidad y cantidad. Los impactos de recientes fenómenos extremos relacionados al clima como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios, muestran la vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática (IPCC, 2014).

El IPCC (2014) menciona que las opciones de adaptación y mitigación elegidas a corto plazo afectarán a los riesgos del cambio climático durante todo el siglo XXI, durante este periodo los riesgos irán variando conforme interactúen las tendencias socioeconómicas con el clima cambiante, por lo que las respuestas sociales influirán en los resultados a corto plazo, mientras que a largo plazo la adaptación y mitigación determinarán los riesgos del cambio climático. El cambio de temperatura media anual observado de 1901-2012 derivado de una tendencia lineal permite obtener una estimación sólida del clima cambiante, las áreas coloreadas indican tendencias significativas, las líneas diagonales indican zonas donde las tendencias no son significativas (Figura 1.5A). En la Figura 1.5B se muestra el calentamiento

proyectado con respecto a dos escenarios, uno de mitigación de bajas emisiones y el segundo escenario es de altas emisiones (RCP2,6 y RCP8,5 respectivamente); el aumento proyectado de la temperatura global en las próximas décadas (2050-2100) es similar en todos los escenarios de emisiones (Figura 1.5C).

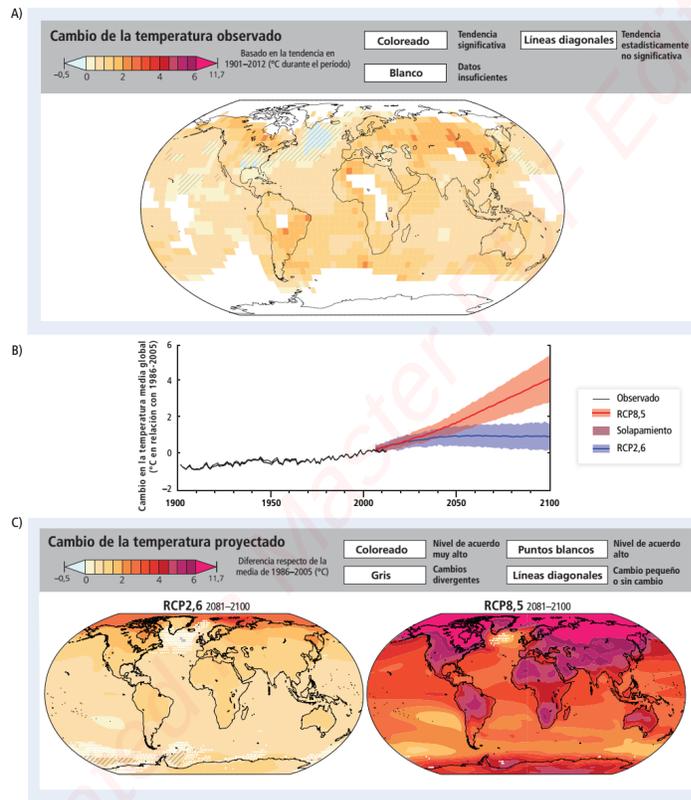


Figura 1.5: Cambios observados y proyectados en la temperatura media anual en superficie. Esta figura muestra los riesgos conexos al clima y señala el cambio de la temperatura observado hasta la época actual y el calentamiento proyectado con emisiones altas y con un mitigación ambiciosa. **A)** Mapa del cambio observado en la temperatura media anual de 1901-2012, derivado de una tendencia lineal en la que la suficiencia de datos permite obtener una estimación sólida; Las áreas coloreadas indican tendencias significativas al nivel del 10 %. Las líneas diagonales indican áreas donde las tendencias no son significativas. **B)** Temperatura media anual global observada y futura proyectada en relación con 1986-2005. Las líneas en negro muestran las estimaciones de temperatura de tres conjuntos de datos. Las líneas azul y roja, el sombreado indican la media y el rango de $\pm 1,64$ desviaciones típicas del conjunto, sobre la base de las simulaciones de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5). **C)** Proyecciones de la media de los múltiples modelos de la CMIP5 de los cambios en la temperatura media anual para 2081-2100 con arreglo a los escenarios RCP2,6 y RCP8,5, en relación con 1986-2005. Las áreas coloreadas indican un nivel de acuerdo muy alto, siendo el cambio en la media de los múltiples modelos mayor del doble de la variabilidad de referencia (variabilidad interna natural en medias de 20 años). Fuente: IPCC (2014)

Con respecto a la detección del cambio climático, podemos referirnos a los

cambios en el clima identificados en un registro de variables climáticas que sean diferentes a las características del mismo registro en el pasado inmediato. Hablar de detección implica demostrar en términos estadísticos que el clima ha cambiado con algún nivel significativo en un tiempo definido, sin dar explicación sobre el origen de dicho cambio (IPCC, 2007; Vázquez-Aguirre, 2010). La detección aborda la cuestión de si el clima o un sistema natural o humano afectado por el clima ha cambiado desde el punto de vista estadístico (IPCC, 2014).

Por otro lado, la atribución del cambio climático consiste en explicar y demostrar las causas de los cambios en el clima, así como en establecer el origen más probable de un cambio detectado en el clima. Es muy probable que más de la mitad del aumento observado en la temperatura media global sea causado por la combinación del incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

Los impactos socioambientales que las variaciones en el clima están produciendo en amplias regiones alrededor del mundo durante las últimas décadas, ha implicado el agravamiento de sequías, desertificación de suelos, alteración de los ciclos naturales de lluvia, mayor frecuencia e intensidad de huracanes, por lo que las amenazas se multiplican para los sistemas naturales y humanos (Peña y Trujillo, 2017).

El cambio climático a escala de cuencas ha sido poco estudiado, por lo que los impactos de los cambios en extremos climáticos frecuentemente se relacionan con las actividades socioeconómicas y con otros cambios en sectores o ecosistemas, siendo la disponibilidad de agua uno de los casos para la cuenca del río Conchos, los estudios sobre el cambio climático adquieren relevancia no solo en términos de la dimensión física del fenómeno, también en sus impactos ambientales y sociales (Castillo-Liñán, 2017).

1.3. Análisis de calidad de datos

Las series de datos de mala calidad, no permitirán realizar una buena evaluación de los cambios del clima. Uno de los problemas en el análisis de observaciones meteorológicas es que en los datos aparezcan valores extraños que hayan excedido o disminuyan exageradamente el rango de variación habitual de la variable a analizar. Estos valores, poco comunes, pueden ser errores en la

serie de datos, aunque también pueden ser registros reales de situaciones poco probables (eventos extremos) (Vázquez-Aguirre, 2010).

Los casos mas recurrentes de valores extraordinarios en las variables climáticas que corresponden a reportes de eventos extremos que realmente sucedieron, son casos como los descensos de temperatura que tienen relación con el paso de frentes fríos o altos valores de precipitación, relacionados con ciclones tropicales; por lo que un análisis minucioso de cada evento puede determinar si se trata de un evento extremo o un error de medición (Vázquez-Aguirre, 2010).

El principal objetivo del control de calidad es detectar valores sospechosos, potencialmente erróneos, por lo que al momento de ser revisados deben ser comparados con registros de otros sitios cercanos, al final se decide si el dato sospechoso es un error o un valor legítimo (Pérez-Ortíz, 2017), la homogeneización de las series de datos es un proceso importante en el análisis de calidad.

1.4. Homogeneización de series climáticas

La homogeneización deriva de la palabra homogéneo que significa de la misma naturaleza, y en climatología se refiere al proceso de eliminación de perturbaciones que no son meramente climáticas en los registros de los datos crudos. Consiste en corregir los cambios del comportamiento de la serie debido a factores externos no climatológicos (Guijarro, 2016).

Las series de observaciones meteorológicas son de capital importancia para el estudio de la variabilidad climática. Sin embargo, estas series se ven frecuentemente contaminadas por eventos ajenos a dicha variabilidad: errores en la toma de medición o en su transmisión, y cambios en el instrumental utilizado, en la ubicación del observatorio o en su entorno, los cuales pueden ser cambios bruscos. Estas alteraciones, llamadas inhomogeneidades, enmascaran los verdaderos cambios del clima y hacen que el estudio de las series conduzca a conclusiones erróneas (Guijarro, 2018b).

Guijarro (2016, 2018b) propone 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, estimada a partir de un promedio de las demás (modulado mediante

una función inversa de la distancia y previa tipificación de los datos de cada estación), 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.

Castillo-Liñán (2017) realizó un proceso de homogeneización para 14 estaciones de la Cuenca del Río Conchos, utilizando librerías en el lenguaje R como RClimDex; y utilizando un periodo de 30 años para homogeneizar las 14 series que cumplían con un 80 % de la disponibilidad de datos en el periodo 1961-1990.

En la sección 3, Pérez-Ortíz (2017) elaboró un proceso similar a Castillo-Liñán (2017) aplicando el control de calidad, pruebas de homogeneidad y homogeneización para la cuenca del río Usumacinta utilizando Climatol, homogeneizando 22 series de datos climáticos para el periodo de 1965 a 1994. En la sección 2 de este trabajo se retoma este procedimiento para ampliar el número de estaciones en la cuenca del río Conchos. Además de ampliar el periodo de análisis a 60 años, permitiendo un 28 % de disponibilidad de datos para temperatura y 35 % para precipitación.

1.5. Índices de cambio climático

Formado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el proyecto de Variabilidad Climática (CLIVAR, por sus siglas en inglés) y la Comisión Conjunta de Oceanografía (JCOMM, por sus siglas en inglés), el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), 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 diagnóstico 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; Peterson, 2005).

La tabla 1.1 muestra el resumen de los 27 índices del *ETCCDI* y su descripción. La explicación detallada de los 27 índices se encuentra en el Apéndice B de este

trabajo de investigación.

Índice	Descripción	Índice	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 10 mm	TX10p	Días frescos
R20mm	Días con lluvia mayor a 20 mm	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		

Tabla 1.1: Resumen de los 27 índices de cambio climático del *ETCCDI* (Vázquez-Aguirre, 2010).

En la sección 2.3 se explica detalladamente la metodología aplicada de manera computacional para el cálculo de los índices de cambio climático utilizando mallas homogeneizadas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, como variables de entrada para poder calcular los índices. La implementación de esta metodología se hace mediante el uso de librerías y algoritmos en el lenguaje R. Cabe destacar que, para tener resultados confiables, es un requisito indispensable que las series, en este caso las mallas sean homogéneas y no contengan errores de mediciones o datos anómalos al calcular los índices del *ETCCDI*.

1.6. Índice Normalizado de Precipitación (SPI)

El Índice Normalizado de Precipitación (McKee et al., 1993, 1995) es una herramienta para identificar y evaluar los eventos de déficit y exceso de precipitación a diferentes escalas temporales. Se calcula mediante el ajuste de datos mensuales de precipitación a una distribución de probabilidad. El SPI es un índice potente, flexible y sencillo de calcular, por medio de una única variable: la precipitación. Sin embargo, este índice ha sido criticado debido a que únicamente se basa en datos de precipitación y no considera otras variables que influyen en la severidad de las sequías como la temperatura o la demanda de agua por parte de la atmósfera (Serrano-Barrios, Vicente-Serrano, Flores, Tijerina-Chávez, y Vázquez-Soto, 2016).

El SPI indica, de alguna manera, la probabilidad de precipitación para cualquier escala temporal. Así tomando en cuenta la precipitación observada la probabilidad de precipitación se transforma en un índice (Montero-Martínez et. al., 2017).

Los valores del SPI se clasifican de acuerdo a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, Tabla 1.2); Los valores positivos indican que la precipitación es mayor que la mediana, y los valores negativos indican que es menor (OMM, 2012).

SPI	Categoría
≥ 2	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Severamente húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Normal o aproximadamente normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
≤ -2.0	Extremadamente seco

Tabla 1.2: Clasificación del Índice Normalizado de Precipitación. Fuente: (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

1.7. Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

La principal crítica del SPI es que su cálculo se basa en datos de precipitación únicamente, y no considera variables que pueden influir en las sequías meteorológicas, como la temperatura, la evapotranspiración, la velocidad del viento y la capacidad de retención. Aunque, por otra parte, se ha demostrado que la precipitación es la variable principal que determina el inicio, la duración, la intensidad y el final de las sequías meteorológicas (Vicente-Serrano et al., 2010).

Los índices de sequía basados en la precipitación se basan en dos supuestos: 1) la variabilidad de la precipitación es mucho mayor que otras variables como la temperatura y la evapotranspiración potencial (PET); y 2) la otras variables son estacionarias, es decir, que no tienen tendencia temporal (Vicente-Serrano et al., 2010).

Estudios empíricos han demostrado que el aumento de la temperatura afecta notablemente a la severidad de las sequías meteorológicas. Abramopoulos et. al. (1988) utilizaron un experimento de modelo de circulación general para demostrar que la evaporación y la transpiración pueden consumir hasta un 80 % de la lluvia.

Vicente-Serrano et al. (2010) formulan el Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), basado en la precipitación y la evapotranspiración potencial (PET). El SPEI combina la sensibilidad del Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) a los cambios de la demanda de evaporación con la simplicidad del cálculo y la naturaleza multitemporal del SPI. Este índice, relativamente nuevo, es adecuado para detectar, monitorear y explorar las consecuencias del calentamiento global en condiciones de sequía.

Basándose en el mismo procedimiento del cálculo del SPI, el SPEI utiliza la diferencia mensual entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, esto representa un balance hídrico climático simple, que se calcula a diferentes escalas de tiempo para obtener el SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010).

1.8. Objetivo

Determinar el posible cambio climático en la cuenca del río Conchos analizando las tendencias de diversos índices de cambio climático e índices de sequías meteorológicas a partir de series de datos homogeneizados durante el periodo 1951-2010.

1.8.1. Objetivos específicos

- Generar una malla con las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima a partir de series homogeneizadas de estaciones climatológicas de la cuenca mediante la librería *Climatol*, ejecutado en el lenguaje R.
- Calcular índices de cambio climático del ETCCDI, además de incluir el SPI y el SPEI, a partir de las variables de temperatura y precipitación.
- Analizar las tendencias de los índices de cambio climático calculados en la cuenca del río Conchos.

1.9. Hipótesis

Dados los últimos reportes del IPCC, se sabe que los efectos de cambio climático no son solamente en los valores medios, sino también en los valores extremos de variables como temperatura y precipitación a nivel global. De esta forma se asume que estos cambios podrían prevalecer a nivel regional, siendo la cuenca del río Conchos, por su extensión, una zona factible de analizar y corroborar si dichos cambios ya se muestran claramente en los valores observados.

Capítulo 2

Metodología

Los análisis de cambios en extremos y el cálculo exitoso de los índices de cambio climático dependen de la disponibilidad y calidad de los datos climáticos en la región de interés (Vázquez-Aguirre, 2010).

El desarrollo de esta investigación inicia con la selección de los datos climáticos de las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima; posteriormente se establecen dos periodos: uno inicial que parte desde 1900 hasta el 2015 y el otro periodo donde se encuentra el mayor porcentaje de datos globales para someter al proceso de control de calidad, homogeneización y relleno de datos faltantes, en este caso va de 1951 al 2010; una vez terminado el proceso de homogeneización se realiza una interpolación a un malla regular para crear un archivo *NetCDF* (Network Common Data Format) con las tres variables, este un tipo de archivo que almacena datos multidimensionales. Finalmente se calculan los índices climáticos y se procede a hacer el análisis de las tendencias. El desarrollo de esta metodología se muestra detalladamente en el diagrama de flujo en la Figura 2.1.

2.1. Disponibilidad y selección de datos

La selección de los datos climáticos es un requisito necesario para poder realizar adecuadamente el cálculo de índices de cambio climático, debido a que las series de tiempo de datos instrumentales del clima no son perfectas y pueden contener registros en los que las mediciones no se reportaron, que se denominan como “datos faltantes” (Vázquez-Aguirre, 2010).

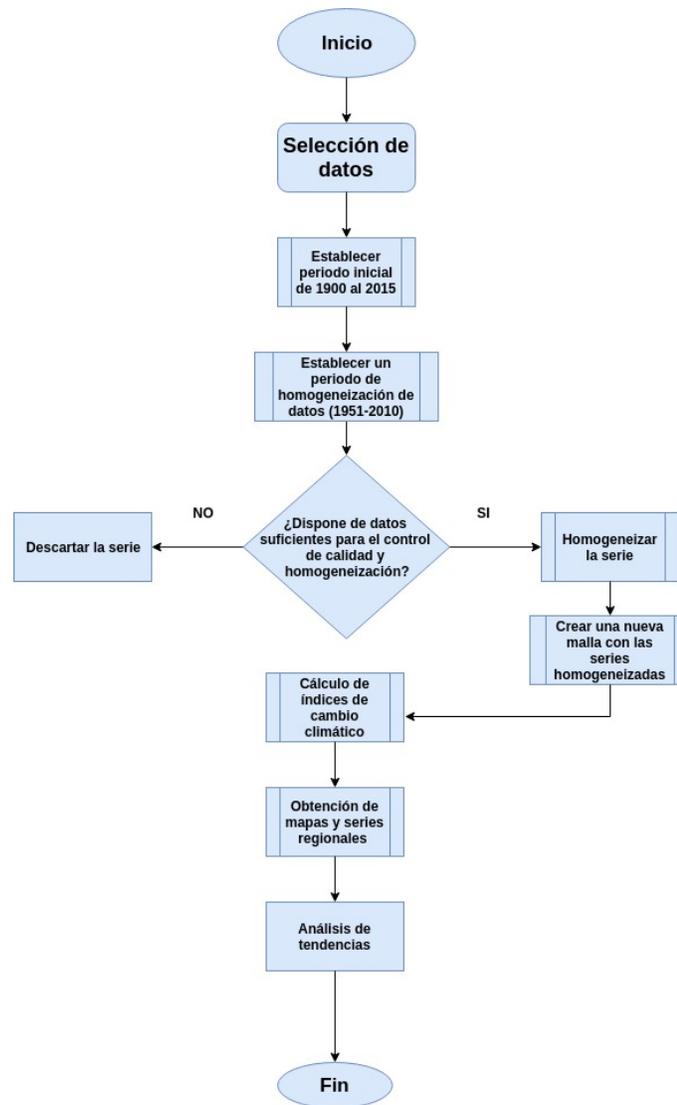


Figura 2.1: Diagrama de flujo del procedimiento para la homogeneización y cálculo de índices climáticos. Elaboración propia.

Antes de iniciar con el proceso de homogeneización, las series de datos se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional, Comisión Nacional del Agua (SMN-CONAGUA). Estas series consisten en observaciones instrumentales termopluviométricas de la base climatológica nacional administrada en el sistema CLICOM. Esta base de datos cuenta con registros de 5492 estaciones para toda la República Mexicana, aunque en la actualidad no más del 20 % se encuentran en operación.

Guijarro (2018b) propone contar con 5 datos (como un mínimo deseable) o más disponibles en cada paso temporal o un mínimo de tres, la función `homogen` se detendrá con un mensaje de error si en un paso temporal no cuenta con ningún dato. Partiendo de 110 estaciones disponibles dentro de la cuenca del río Conchos

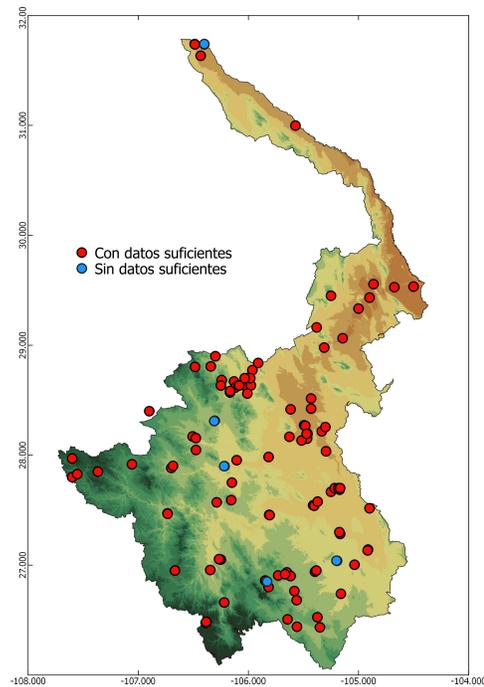


Figura 2.2: Estaciones con datos suficientes dentro de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

(Figura 2.2), 106 estaciones cumplieron con el mínimo de disponibilidad de datos diarios para la variable de precipitación, y se obtuvo un 35 % de disponibilidad en el periodo 1951-2010. Por otra parte, 97 estaciones cumplieron el mínimo requerido para las variables temperatura máxima y mínima; se obtuvo un 28 % de disponibilidad en conjunto dentro del mismo periodo usado para la precipitación (Figura 2.3). En los últimos 30 años también es notable la gran pérdida de información, desafortunadamente, esta situación no solo ocurre en esta cuenca en particular, sino a nivel nacional.

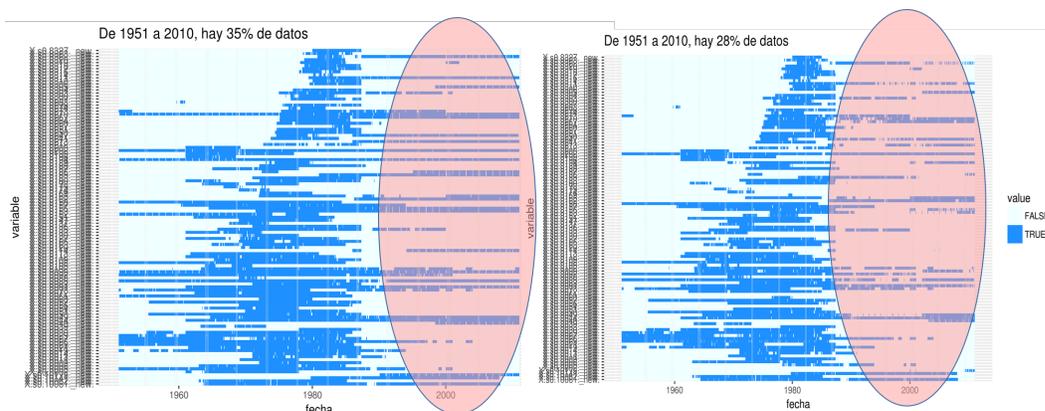


Figura 2.3: Porcentaje de disponibilidad de datos en el periodo 1951-2010 para las variables de precipitación (izq.) y temperatura (der.). Nótese la gran pérdida de información en las últimas tres décadas. Elaboración propia.

2.2. Homogeneización de datos climáticos en el periodo 1951-2010

En el presente trabajo, con el fin de utilizar un método eficiente para el control de calidad, homogeneización y relleno de datos ausentes, se utilizó el software *Climatol*. Presentado en el “X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio” por José Antonio Guijarro, Peter Domonkos, José López, Enric Aguilar y Manola Brunet de la Agencia Estatal de Meteorología y el Centro sobre Cambio Climático de la Universitat de Rovira i Virgili, en el proyecto MULTITEST, se emplearon los principales métodos de homogeneización automáticos existentes a conjuntos de datos de precipitación y temperatura. Estas metodologías fueron comparadas en un extenso trabajo desarrollado en el marco de la Acción COST ES0601 “HOME” (Venema et al., 2012). MULTITEST actualizó los resultados de HOME realizando una comparación de los resultados obtenidos, la cual consistió en contrastar los métodos en forma de programas de computadora que pudieran ser aplicados de forma automática. Como resultado. ACMANT resultó ser el método con los menores errores típicos, seguido por *Climatol*, MASH, RHTest, USHCN y HOMER en temperatura; en precipitación HOMER, *Climatol*, MASH, RHTest y USHCN (Tabla 2.1).

Paquete	Resolución de tiempo	Método de detección	Selección de series de referencia	Estadística de detección	VARIABLES Climáticas	Tolerancia de datos faltantes
ACMANT	Mensual y diaria	Referencia	Correlación	Caussinus-Lyazrhi	Temperatura y precipitación	Muy alta
Climatol	Mensual y diaria	Referencia	Distancia	SNHT	Cualquiera	Muy alta
MASH	Mensual y diaria	Múltiples referencias	Correlación	MLR y prueba de hipótesis	Cualquiera	30 %
RHTest	Mensual y diaria	Referencia	Correlación	F test	Cualquiera	–
USHCN	Mensual	Por pares	Correlación	MLR	Temperatura	Muy alto
HOMER	Mensual	Por pares	Correlación	Probabilidad penalizada	Cualquiera	15 años

Tabla 2.1: Tabla comparativa de los métodos del proyecto MULTITEST. Modificado de OPACE2 y WMO Commission for Climatology (2017).

Para realizar el control de calidad, homogeneización y relleno de datos ausentes, se eligió el paquete de R *Climatol* (<https://CRAN.R-project.org/package=climatol>).

Esta herramienta garantiza tener una base de datos de calidad; y así, poder calcular los índices climáticos con una buena representación, además de que nos brinden resultados confiables para su interpretación, además de su disponibilidad y accesibilidad de esta librería.

Guijarro (2018b) explica la metodología utilizada por *Climatol*, basándose en el relleno de datos ausentes; en sus inicios estaba enfocado a rellenar mediante estimaciones calculadas a partir de las series más próximas. Se adapta el método de Paulhus y Kohler (1952) para rellenar precipitaciones diarias mediante promedios de valores cercanos. *Climatol* normaliza los datos mediante la división por sus valores medios, además de restar las medias o mediante una estandarización completa. Denominando m_X y s_X a la media y desviación típica de una serie X se tienen estas opciones de normalización:

1. Restar la media: $x = X - m_X$
2. Dividir por la media: $x = X/m_X$
3. Estandarizar: $x = (X - m_X)/s_X$

El principal problema de esta metodología es que las medias de las series en el periodo de estudio no se conocen si estas no están completas, lo que es común en bases de datos reales. Para resolver este problema, *Climatol* calcula primero estos parámetros con los datos disponibles en cada serie, rellena los datos ausentes usando las medias y desviaciones típicas provisionales, y vuelve a calcular con las series rellenas. Posteriormente se vuelven a calcular los datos inicialmente ausentes, obteniendo nuevas medias y desviaciones típicas, repitiendo hasta que ninguna media cambia al redondear con la precisión inicial de los datos (Guijarro, 2018b).

Una vez estabilizadas las medias, se normalizan todos los datos y se procede a estimarlos por medio de la siguiente expresión:

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j} \quad (2.1)$$

En la que \hat{y} es un dato estimado mediante los correspondientes n datos x_j más cercanos disponibles en el paso de tiempo, y w_j es el peso asignado a cada uno de ellos. Estadísticamente $\hat{y}_i = x_i$ es un modelo de regresión lineal denominado *Eje Mayor Reducido o Regresión Ortogonal*, donde la recta se ajusta minimizando las

distancias de los puntos medidas en dirección perpendicular a la misma (regresión tipo II) en lugar de una dirección vertical (regresión tipo I) como generalmente se realiza (Guijarro, 2018b, Figura 2.4).

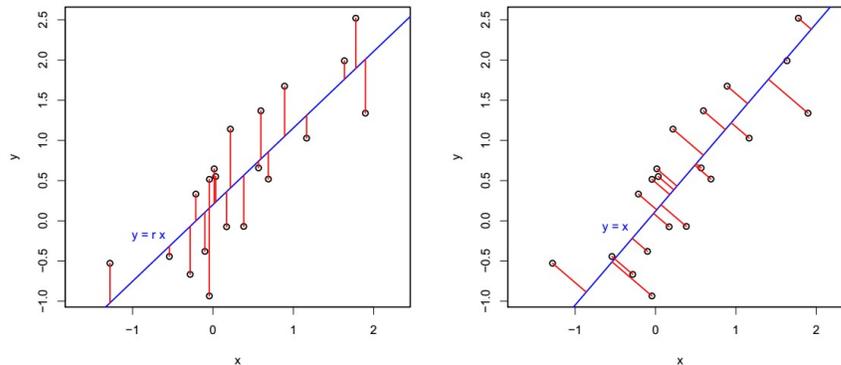


Figura 2.4: En rojo, desviaciones de la recta de regresión lineal (azul) minimizadas por mínimos cuadrados en los tipos I (izquierda) y II (derecha); tomada de Guijarro (2018b).

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

- Controlar la calidad de las series y eliminar aquellas anomalías que superen un umbral prefijado.
- Comprobar su homogeneidad mediante la aplicación del Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) Alexandersson (1986).

2.2.1. Preparación de los archivos de entrada

Climatol sólo necesita dos archivos de entrada, uno con una lista de coordenadas, códigos y nombres de las estaciones enunciados de la siguiente manera: *longitud (grados decimales)*, *latitud (grados decimales)*, *elevación (msnm)*, *código asignado a cada estación y nombre de la estación*. El segundo archivo son los datos orden cronológico desde la primera hasta la última estación, esto quiere decir, en este caso, estarán los 21 915 datos de la primera estación (01 de enero de 1951 a 31 de diciembre del 2010), seguido los siguientes 21 915 de la segunda, y así hasta tener completados las 97 estaciones para temperaturas y 106 para precipitación. Cada renglón tendrá 10 datos separados por un espacio. Los datos ausentes están representados como NA, ambos archivos comparten el mismo


```
homogen("tmax", 1951, 2010)
```

Guijarro (2018b) recomienda realizar una primera aplicación en modo exploratorio, ya que es de gran importancia ejecutar estos análisis exploratorios para tener un control de calidad confiable, por lo que la detección de valores atípicos pueden enmascarar los errores de observación. Para un análisis exploratorio se agrega el parámetro `expl`:

```
homogen("tmax", 1951, 2010, expl = TRUE)
```

Al finalizar cada prueba se genera un archivo `.pdf` en el directorio de trabajo, en el que muestra un resumen detallado, con gráficos que ayudan a describir el comportamiento de la base de datos. En la Figura 2.6 se muestra la disponibilidad de datos en el periodo 1951-2010 por estación y global, y se puede observar que todas las estaciones tienen ausencia de datos.

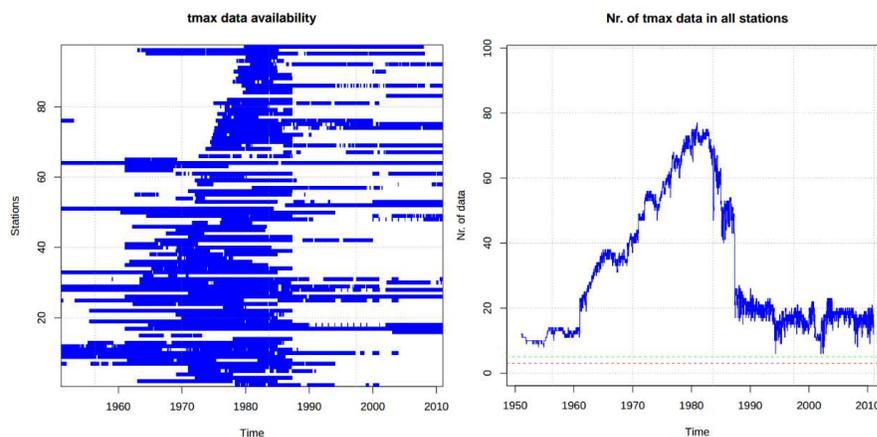


Figura 2.6: Disponibilidad de datos de temperatura máxima por estación (izq.) y global (der.) en el periodo 1951-2010.

Los gráficos siguientes muestran diagramas de caja de los datos de cada una de las estaciones en el que contiene los valores medios, percentil 25 y 75 de la distribución de los datos, así como los valores máximos y mínimos; además se muestra un histograma de frecuencias de todos los datos; en estos gráficos puede hacerse evidente la presencia de valores atípicos (Figura 2.7).

Los siguientes gráficos se centran en las correlaciones entre las series y su clasificación en grupos con una variabilidad similar, posteriormente son representadas en un mapa (Figura 2.8). Las correlaciones generalmente son más bajas

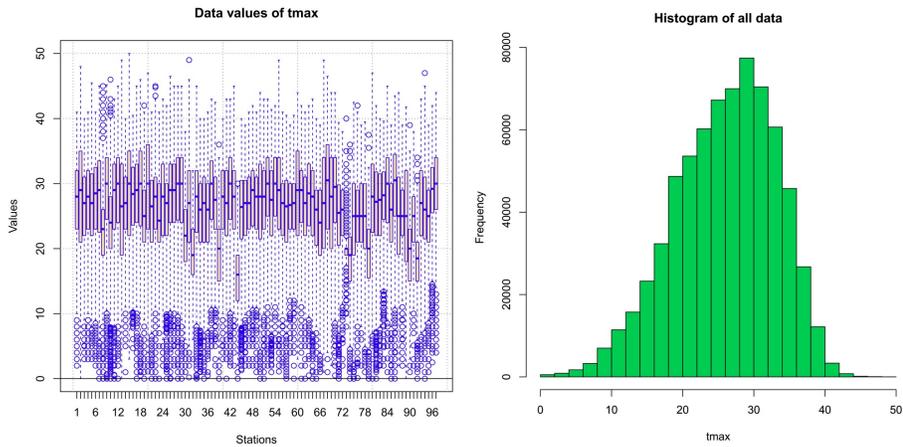


Figura 2.7: Conjunto de datos por estación (izq.) e histograma global de los datos (der.).

cuando la distancia entre estaciones es mayor (Guijarro, 2018b). Cuanto más alta sean las correlaciones, mayor será la fiabilidad de la homogeneización y el relleno de los datos ausentes.

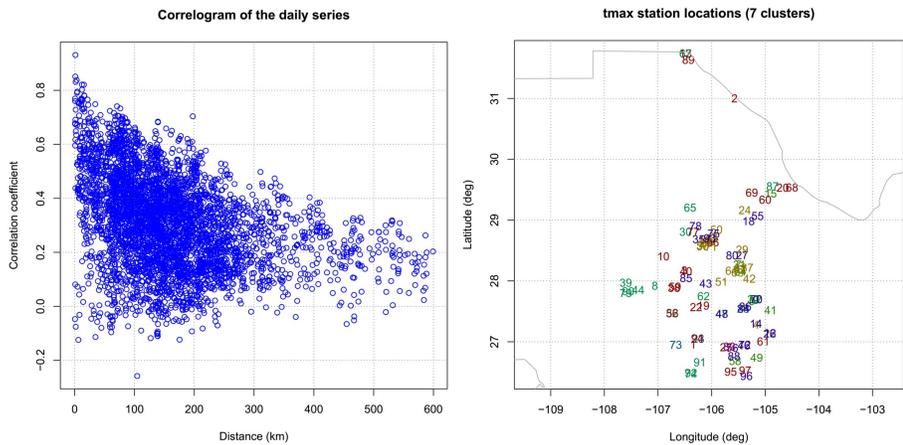


Figura 2.8: Correlograma de series (izq.) y mapa de las estaciones (der.), los números con los mismos colores en el mapa identifican grupos de estaciones con variabilidad similar.

Después de analizar los gráficos dedicados a verificar los datos, los siguientes, muestran las anomalías estandarizadas. En un rutina normal, estos gráficos se muestran para cada una de las etapas:

1. Detección en ventanas escalonadas superpuestas;
2. Detección en las series completas;
3. Anomalías finales de las series homogeneizadas (Figura 2.9).

Los gráficos de las dos primeras etapas muestran las series de anomalías de

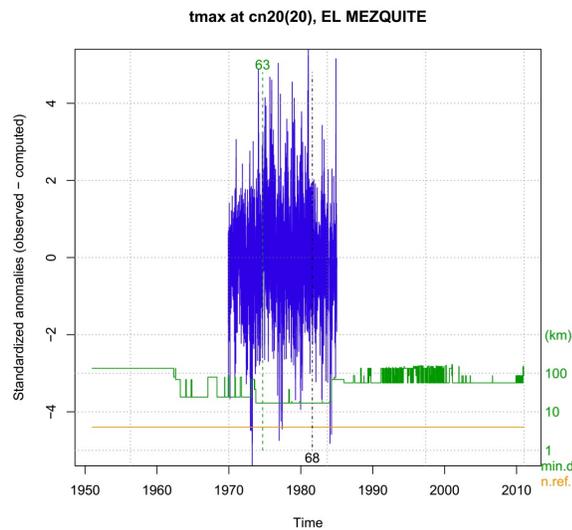


Figura 2.9: Anomalías de la etapa 3.

las inhomogeneidades detectadas, marcando puntos de quiebre por donde son cortadas, en el modo exploratorio se omiten las dos primeras etapas y solo se muestran las anomalías de las series originales (Guijarro, 2018b).

La figura 2.9 muestra una serie con un valor de SNHT máximo de 63 sobre ventanas escalonadas superpuestas, marcadas en color verde sobre una línea punteada del mismo color donde se alcanza el máximo mencionado, y un valor de SNHT máximo de 68 para toda la serie marcado con una línea negra. Por lo que esta serie parece tener un comportamiento homogéneo. Las dos líneas marcadas en la parte inferior del gráfico muestran la distancia mínima de los datos vecinos (verde) y el número de datos de referencia utilizados (naranja).

El archivo .pdf finaliza con histogramas de anomalías estandarizadas y SNHT de las series finales, además de una figura de calidad/singularidad. El histograma de anomalías es útil para elegir los umbrales adecuados para rechazar datos muy anómalos (Figura 2.10). El histograma se muestra bastante simétrico en sus anomalías positivas y negativas, por lo que configuraría el $dz.max = 12$ y $dz.min=-12$.

Los histogramas de SNHT máximo, tienen como objetivo elegir los umbrales de detección de cambios en el promedio de las series (Guijarro, 2018b). Cuando existe una separación en estas condiciones, se establece el valor entre ellos como umbral para las etapas de detección. La configuración para la etapa de ventanas $snht1=300$ y $snht2=1200$ parecen ser razonables (Figura 2.11).

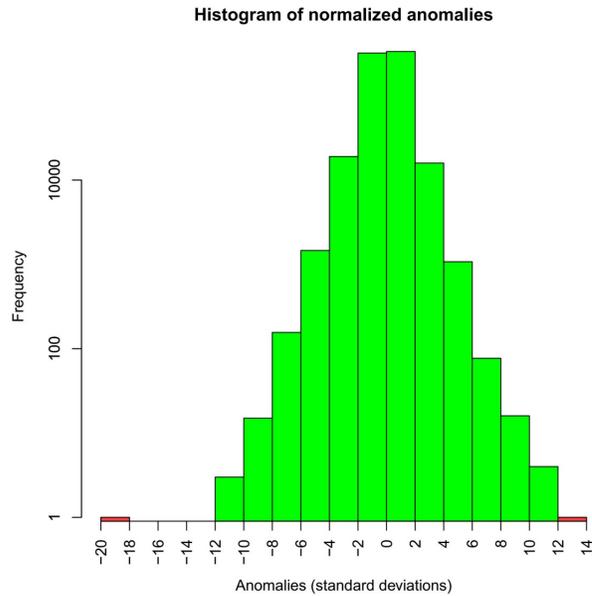


Figura 2.10: Histograma de anomalías de todo el conjunto de datos.

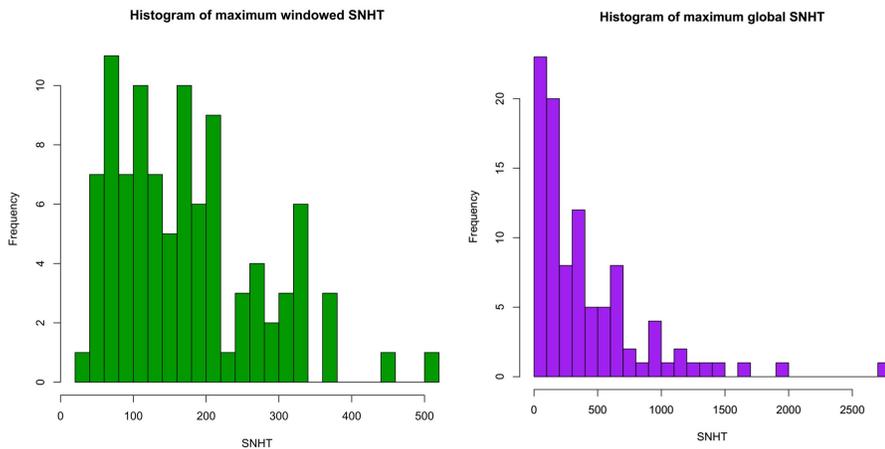


Figura 2.11: Histogramas de los valores máximos de SNHT encontrados en ventanas escalonadas superpuestas (izq.) y en las series completas (der.).

La última página del archivo .pdf muestra el gráfico con números de estación con sus errores típicos (RMSE, Root Mean Square Error por sus siglas en inglés) finales y los valores de SNHT. Los RMSE se calculan al comparar los datos estimados con los observados en cada serie (Guijarro, 2018b). Un valor alto puede indicar mala calidad, o puede que la estación se encuentre un sitio particular donde existe un microclima distinto (Figura 2.12).

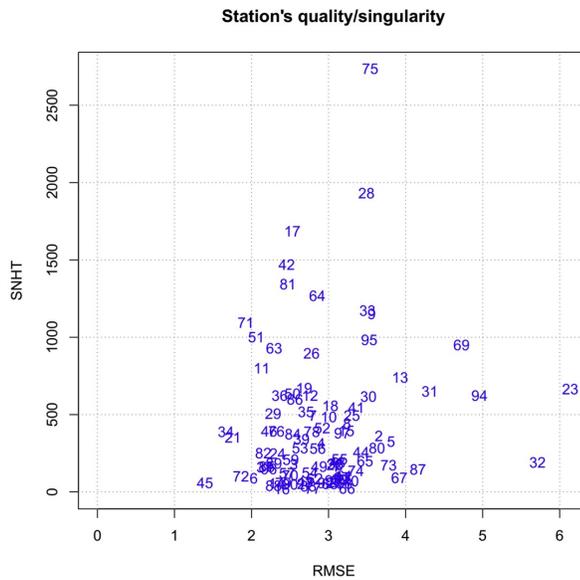


Figura 2.12: Calidad/singularidad de las series finales

2.2.3. Homogeneización de series diarias

Después de la observación de los datos (individuales y en conjunto) se procede a homogeneizar las series considerando algunos parámetros antes mencionados:

```
homogen("tmax", 1951, 2010, dz.max=12, dz.min=-12, snht1=300, snht2=1200)
```

Al finalizar la homogeneización, la salida incluye un archivo .pdf con los gráficos mencionados anteriormente, salvo que en este proceso ya aparecen los gráficos de las etapas 1 y 2 (detección en ventanas escalonadas superpuestas y detección en las series completas, Figura 2.13).

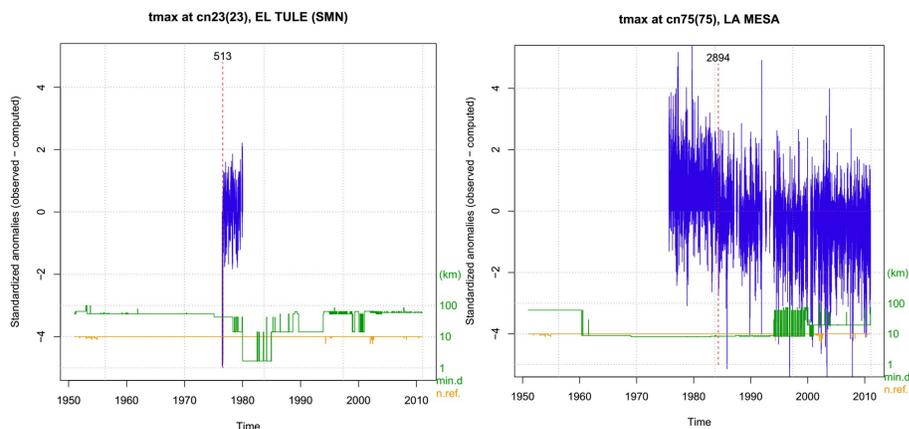


Figura 2.13: Anomalías de detección de ventanas escalonadas superpuestas y detección de series completas

Los gráficos finales muestran la reconstrucción de las series completas (Figura 2.14), la parte superior del gráfico muestra la serie reconstruida con datos originales en negro y en rojo para datos rellenados. La parte inferior muestra las correcciones aplicadas a las series.

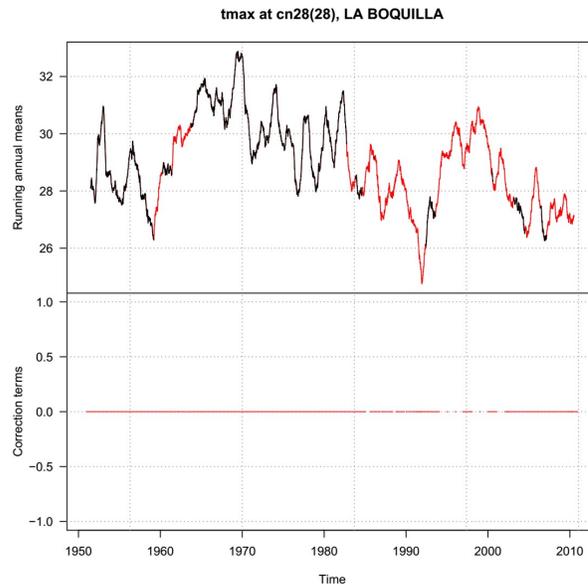


Figura 2.14: Reconstrucción de series completas

Además de los resultados anteriores, *Climatol* genera otros archivos que son almacenados en el ordenador:

- `tmax_1951-2010.txt`: Archivo de texto con los mensajes emitidos en la consola de R durante el proceso.
- `tmax_1951-2010_out.csv`: Archivo de Valores Separados por Comas (CSV) con la lista de valores atípicos corregidos.
- `tmax_1951-2010_brk.csv`: Archivo CSV con la lista de los puntos de corte y sus correspondientes valores de SNHT.
- `tmax_1951-2010.rda`: Archivo binario de R que contiene los resultados de la homogeneización. Al ser cargado en R, ejecutando la función `load('tmax_1951-2010.rda')` muestra los siguientes objetos:
 - `dat`: matriz o arreglo de los datos originales.
 - `dah`: matriz o arreglo de los datos homogeneizados.
 - `est.c`: marco de datos con columnas X (coordenada X), Y (coordenada Y), Z (elevación), Code (código de la estación), Name (nombre de la estación), pod (porcentaje de datos originales), ios (índice de la estación original), ope (operando al final del periodo: 0 = no, 1= sí),

- `snht` (SNHT relativo de la serie homogeneizada), `rmse` (error cuadrático medio estimado de la serie homogeneizada).
- `nd`: cantidad de pasos de tiempo en cada serie.
- `nei`: número de series de entrada.
- `ne`: número de series después de la homogeneización.
- `nm`: cantidad de meses en un año (0 para datos diarios).
- `x`: vector de la dimensión de tiempo.
- `ndec`: cantidad de decimales en los datos.
- `std`: tipo de estandarización utilizada.
- `ini`: fecha inicial del periodo de estudio.

A partir del archivo `.rda` podemos obtener diversos productos utilizando las funciones `dahstat` y `dahgrid`, la primera genera dos ficheros `.csv` de las series homogeneizadas, uno con los datos homogeneizados y el otro con códigos que indican si el dato es observado (0), rellenado (1, originalmente ausente) o corregido (2, por inhomogeneidad o anomalía excesiva).

2.2.4. Generación de la malla homogeneizada

Muchas bases climatológicas suministran la información en forma de malla, lo que implica una estructura espacio-temporal regular que facilita el estudio de la variabilidad climática (Guijarro, 2016). La función `dahgrid` se utiliza para obtener datos homogeneizados en una malla a partir del fichero `.rda`. Para este estudio se utilizaron los datos homogeneizados en malla, con la finalidad de representar de manera espacial y temporal los resultados obtenidos a partir del cálculo de los índices de cambio climático.

Para generar la malla se debe definir previamente los límites y la resolución de la malla, para la región de estudio se definieron los siguientes parámetros en donde se fijan los valores máximos y mínimos de longitud y latitud, así como la resolución espacial que será a 0.2 grados:

```
grd = expand.grid(x=seq(-108,-104,.2), y=seq(26,32,.2))
```

Posteriormente se activa la librería `sp`, especializada en manejo de datos en el espacio, que es necesaria para utilizar la función `coordinates` para convertir la malla en un objeto espacial:

```
library(sp)
```

```
coordinates(grd) <- x+y
```

Una vez ejecutando los comandos anteriores puede generarse la malla en formato NetCDF utilizando:

```
dagrid('tmax', 1951, 2010, grid = grd)
```

Estas mallas son calculadas por el método de ponderación inversa a la distancia con datos normalizados, minimizando la influencia de la altitud en los valores de la variable estudiada. Además de la malla con los valores normalizados, se generan dos mallas adicionales, una con las medias y otra con las desviaciones típicas con las que se puede deshacer la normalización, este proceso se puede realizar usando herramientas externas a R, como *Climate Data Operators (CDO)* (Guijarro, 2016), de la siguiente manera:

```
cdo add -mul tmax_1951-2010.nc tmax_1951-2010_s.nc  
tmax_1951-2010_m.nc tmax_1951-2010_conchos.nc
```

En la Figura 2.15 se muestra la visualización de la malla homogeneizada diaria, resultado de la operación realizada en CDO. Mostrando la escala de colores que va desde los 0 a los 45 °C. Los valores que se observan en las seis imágenes oscilan entre los 17 a los 45 °C.

Todo el procedimiento realizado en *Climatol* también se aplicó para la temperatura mínima de manera similar a la temperatura máxima, en el caso de la precipitación, algunos parámetros fueron modificados como `std`, ya que esta variable se encuentra limitada a un valor mínimo (cero).

La variabilidad existente en los datos diarios es muy alta, lo que reduce la eficiencia de la detección de inhomogeneidades; por lo que Guijarro (2018b) recomienda realizar una homogeneización con datos mensuales para un mejor ajuste de los datos diarios.

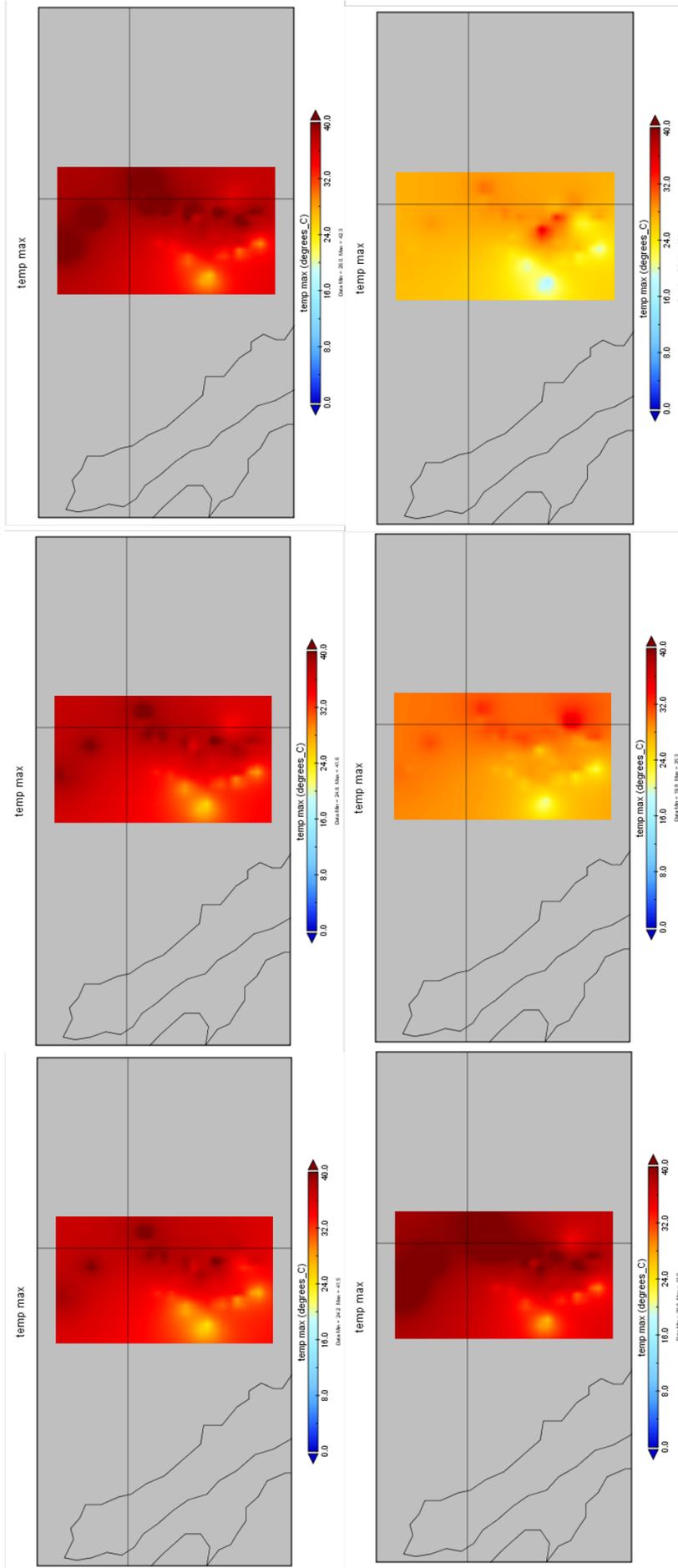


Figura 2.15: Ejemplo de visualización de la malla homogeneizada de la variable temperatura máxima. Elaboración propia.

2.3. Cálculo de índices de cambio climático

En este apartado se da la metodología para el cálculo de índices de cambio climático. Estos índices son propuestos por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (**ETCCDI**), y se incluyen además, el Índice Normalizado de Precipitación (**SPI**) (McKee et al., 1993, 1995) y el Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI). Todos estos índices son de gran utilidad para la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima (Karl et al., 1999; Peterson, 2005), calculados, en el presente trabajo, a partir de datos de temperatura y precipitación, que ya han sido homogeneizados, Así pues, por medio de los valores de estos índices, se podrá observar si existen indicios de cambio climático de manera regional en la cuenca del río Conchos.

Para el cálculo de los índices climáticos utilizando las mallas de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación es necesario implementar una serie de procedimientos computacionales, se utilizaron las librerías *Climdex.pcic.ncdf* (for the Pacific Climate Impacts Consortium, 2014), *SPEI* (Beguería y Vicente-Serrano, 2017) y la función *getSPI* creada por Wheatley (2013), todas la librerías se encuentran programadas en R. Al finalizar los procesos computacionales tendremos nuevos archivos *.nc* (netCDF) con las mallas de los índices generados, cada índice se encontrará individualmente en un archivo.

2.3.1. Cálculo de índices con *Climdex.pcic.ncdf*

Climdex.pcic.ncdf es una librería complementaria para *Climdex.pcic* que ayuda a utilizar mallas en formato NetCDF (*.nc*) como archivos de entrada para el cálculo de los 27 índices del *ETCCDI* que se obtienen archivos de salida en el mismo formato (for the Pacific Climate Impacts Consortium, 2014).

El *ETCCDI* señala que para la obtención de los índices requiere un riguroso proceso de control de calidad, además de una homogeneidad climatológica de los datos a analizar, esto es, que no se cuenten con valores anómalos que son a causa de factores no climáticos. En el apartado 2.2 se ha explicado detalladamente el proceso de control de calidad y homogeneización realizado en *Climatol 3.1*, por lo que en este caso se cuenta con las mallas totalmente homogéneas y altamente confiables para calcular los índices de cambio climático de cada punto de malla.

Modificación del índice Días de verano (SU)

En la cuenca del río Conchos, las temperaturas máximas se concentran por arriba de los 25 °C en la mayor parte del año, el índice *Días de verano (SU)* como lo dice en su descripción, cuenta los días en un año en los que su temperatura máxima es mayor a 25 °C. Así definido, para la región de estudio no mostraría un impacto considerable en la región de estudio. Por esta razón, se modificó el parámetro de medición para este índice, en el que se considerará que el índice *Días de verano* sea mayor a 30 °C y tendrá el sufijo **SU30**, siendo TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j , cuente el número de días cuando:

$$SU30 = TX_{ij} > 30^{\circ}C \quad (2.2)$$

Para el cálculo del *SU30* se desarrolló un algoritmo que consta de un proceso iterativo donde se utiliza como dato de entrada la malla homogeneizada de la variable temperatura máxima, y cuenta el número de días en un año que su valor de temperatura máxima sea mayor a 30 grados Celsius. En la Figura 2.16 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo para el cálculo del *SU30*.

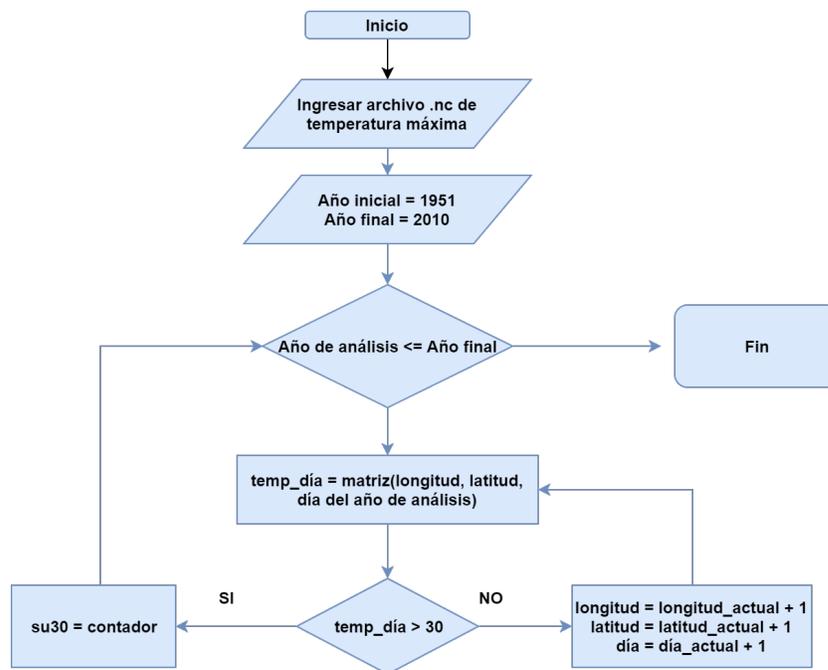


Figura 2.16: Diagrama de flujo para el cálculo del índice SU30. Elaboración propia.

2.3.2. Cálculo del SPI y SPEI

La importancia de incluir el SPI y el SPEI para su análisis en la cuenca del río Conchos es por su efectividad para caracterizar periodos húmedos y de sequía meteorológica. Esto es particularmente importante, ya que la región de estudio se encuentra en una zona de un mayor grado de aridez. Para el cálculo del SPI y SPEI se utilizarán dos métodos: el paquete SPEI (Beguería y Vicente-Serrano, 2017) y la función *getSPI* en su versión modificada (Wheatley, 2013); el primero analizará a partir de un archivo `.csv` los datos mensuales de la cuenca de manera generalizada, y el segundo utilizará la malla en archivo `.nc` de los valores mensuales de precipitación y evapotranspiración para representar espacialmente el comportamiento de la precipitación en la región del Conchos.

Paquete SPEI

SPEI es un conjunto de funciones para calcular varios índices de sequía ampliamente utilizados, entre ellos el SPI y el SPEI, la función estandariza la variable que sigue una función de distribución logarítmica, es decir, la transforma en una variante gaussiana estándar con media de cero y desviación estándar de uno (Beguería y Vicente-Serrano, 2017). Los datos de entrada que utiliza la librería *SPEI* están en una serie ordenada en el tiempo de valores de precipitación. El SPI y el SPEI están definidos para datos mensuales, los datos se dividen en doce series (una para cada mes). Una de las ventajas muy importantes del cálculo del SPI/SPEI es que se pueden calcular a diferentes escalas de tiempo, así, es posible incorporar la influencia de los valores pasados, permitiendo que el índice se adapte a la memoria del sistema en estudio. Por ejemplo, un valor de seis implica que los datos del mes actual y de los últimos cinco meses se utilizarán para calcular el valor de SPI para un mes determinado, así, todos los valores pasados tendrán el mismo peso en el cálculo del índice (Beguería y Vicente-Serrano, 2017). Los valores devueltos por la función SPI están en un objeto clase *spei*, que es una lista que contiene los componentes mostrados en el Apéndice D.

El cálculo del SPI y el SPEI para la cuenca del río Conchos mediante el uso de la librería *SPEI* arrojó los valores mostrados en la estructura mostrada en el Apéndice D. Dicha estructura muestra un resumen del objeto *spei* que imprime la función SPI, mostrando los componentes mencionados anteriormente: la serie de tiempo ajustada que va desde 1951 al 2010, los coeficientes “alpha” y “beta”,

una escala de 12 meses, distribución “gamma”, el método de ajuste “ub-pwm” que es el método de Momentos ponderados probabilísticos no sesgados, `na.action = FALSE`.

Función *getSPI*

La función *getSPI* es un algoritmo creado por Wheatley en 2010 y modificado en 2013, con la que se obtiene el SPI a partir de la malla de precipitación. Este es un proceso similar al mostrado en el apartado 2.3.1, en el que se utiliza una malla homogeneizada como archivo de entrada. En este caso se utiliza la variable precipitación, con la única diferencia que se emplea la *calculadora raster* (función `calc`) de la librería *raster* en R (Hijmans, 2016).

En la función *getSPI*, el índice SPI se calcula con base en la distribución acumulativa empírica (*ecdf*) solamente. La *ecdf* se puede definir a partir de valores bajos a altos de precipitación $P(> x)$ o de valores altos a bajos $P(< x)$ (Wheatley, 2013).

2.4. Análisis de índices y tendencias

Para el análisis de los índices calculados en este proyecto de investigación, se optó por integrar tres diagramas que representan tanto espacial como temporalmente el comportamiento de dichos índices, además de representar de manera espacial sus tendencias y su significancia estadística. Se utilizará el diagrama *Hovmöller*, muy utilizado en los campos de la meteorología y climatología; el diagrama *código de barras*, recientemente presentado por Ed Hawkins para conocer los cambios multianuales de variables climáticas utilizando anomalías estandarizadas. Además se propone un nuevo diagrama, que permite conocer el comportamiento de los índices con respecto a la elevación, denominado *Diagrama Hovmöller modificado*, similar al diagrama Hovmöller original, es un diagrama de contorno que muestra la evolución de una variable con respecto a la elevación y el tiempo.

2.4.1. Diagrama *Hovmöller*

En 1949, Ernest Hovmöller creó un diagrama que sobresale al mostrar el movimiento en imágenes estáticas (Hovmöller, 1949). Un cruce entre un mapa y una gráfico, conocido hoy como *Diagrama Hovmöller*. Estos diagramas promedian todos los valores en una sola columna de longitud o latitud poniendo dichos valores en un eje, el otro eje representa el tiempo. De esta manera se puede mostrar la evolución temporal de una variable climática o en este caso, los índices de cambio climático.

2.4.2. Diagrama *Hovmöller modificado*

El diagrama *Hovmöller modificado* se define aquí como un método para trazar los datos climatológicos, similar al diagrama *Hovmöller* excepto que en lugar de tomar la latitud o longitud, el diagrama *Hovmöller modificado* toma en cuenta la altitud sobre el nivel del mar en el eje (y) y el tiempo en el eje (x). El objetivo de implementar este nuevo diagrama, es observar el comportamiento de los índices climáticos con relación a la altitud.

La metodología utilizada para obtener este tipo de diagramas parte del empleo de dos archivos de entrada: modelo de elevación y el índice de cambio climático en formato de malla (*.nc). La resolución de ambos archivos puede ser diferente, así que el primer paso es llevar a que los dos archivos tengan una misma resolución. Por otra parte, se debe lograr que la extensión de las coordenadas sean las mismas. En el Apéndice E se muestran las propiedades de ambos archivos raster como lo son: clase, dimensiones, resolución, extensión y sistema de coordenadas.

Una vez verificado que ambos archivos tengan las mismas características mencionadas en el párrafo anterior, los valores de cada celda se convierten a valores puntuales, con la función `rasterToPoints()` de la librería Raster (Hijmans, 2016) en R, que entrega un *data frame* con las columnas longitud (x), latitud (y) y elevación (z); para el archivo del índice utilizado tendrá una estructura similar con una columna agregada que es el tiempo. Se creará un nuevo *data frame* en donde el valor de la elevación y el valor del índice coincidan con las mismas latitud y longitud, posteriormente, se omiten los valores de las coordenadas, teniendo solo un arreglo como se muestra en la tabla 2.2

Altitud (m.s.n.m)	Tiempo	Valor
800	1951	42
900	1951	39
1000	1951	37.4
1100	1951	36.3
1200	1951	35.7
1300	1951	33.4
1400	1951	30

Tabla 2.2: Tabla de datos para graficar el diagrama Hovmöller modificado. Elaboración propia.

Para graficar el diagrama Hovmöller modificado, en el eje x tendremos el tiempo, en el eje y la elevación, mientras que en celda estará el valor del índice, codificado como una escala de colores, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.17

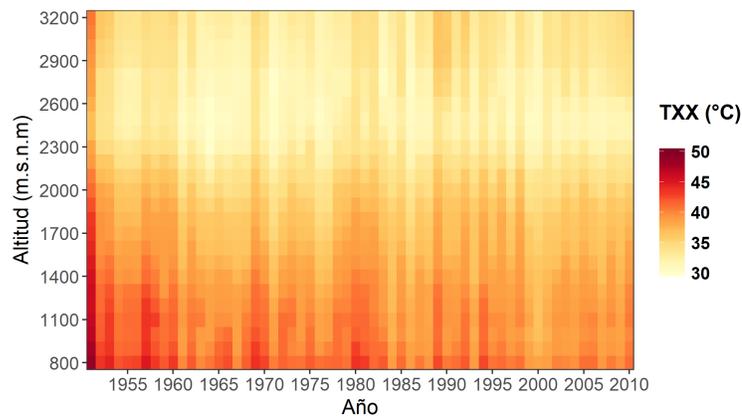


Figura 2.17: Ejemplo de diagrama Hovmöller modificado aplicado para el índice TXX. Elaboración propia.

2.4.3. Diagrama Código de barras

Recientemente, Hawkins (2018), profesor de la Universidad de Reading y miembro del IPCC presentaba unos gráficos que mostraban la evolución de la temperatura anual en una serie de ciudades del mundo, usando una escala graduada de colores que van del azul al rojo. En este estudio se mostrarán gráficos similares combinado con sus series de tiempo, donde los colores azul y rojo determinarán la anomalía estandarizada de cada índice analizado. A este diagrama se le denominará “código de barras”.

Anomalías estandarizadas

Las anomalías estandarizadas están definidas como la diferencia entre el valor observado y la media de los datos, dividido todo entre la desviación estándar de los datos. Son útiles porque ayudan a discernir los valores normales de los inusuales ya que remueven la influencia de la localidad y la dispersión de los datos. Son adimensionales y tienen la característica de que cuando son cero el valor es igual a la media y cuando es 1 es igual a la desviación estándar de los datos.

2.4.4. Paquete *Greenbrown*

Los métodos más utilizados para el análisis de tendencias son las pruebas no paramétricas de correlación por rangos de Mann-Kendall y Spearman. Estas pruebas estadísticas identifican la presencia de cambios y describen si las tendencias son estadísticamente significativas (Serrano-Barrios et al., 2016). El nivel seleccionado para aceptar un cambio como estadísticamente significativo es de $p < 0.05$. Los valores de p por debajo de este valor señalarán cambios estadísticamente significativos.

El paquete Greenbrown de R es una colección de funciones para analizar tendencias, cambios de tendencias y eventos fenológicos en series de tiempo cuadradas, como las observaciones de satélites o simulaciones de modelos climáticos Forkel et al. (2013, 2015). Para el presente trabajo, se decidió utilizar esta librería ejecutada en R para conocer las tendencias y valores P de los índices calculados a partir de mallas homogeneizadas; las mallas de los índices, en este caso.

Capítulo 3

Resultados

Después de haber aplicado la metodología de manera exitosa, los resultados obtenidos se explican en este apartado dividido en dos partes, la primera es sobre el análisis de los índices del *ETCCDI* y la segunda el análisis de los índices *SPI* y *SPEI*, en el que se analizan las tendencias y valores estadísticamente significativos a través de mapas, diagramas *Hovmöller*, diagramas *Hovmöller modificado* y diagramas de *código de barras*, donde conoceremos su evolución espacio-temporal de los índices de cambio climático.

Para un análisis detallado se establecieron cuatro regiones dentro de la cuenca del río Conchos (Figura 3.1), basados en los comportamientos de distribución de temperatura y precipitación mostrados en la zona de estudio: La región 1 (con su límite en la latitud 30° hacia el norte), la región 2 se definió en el contorno de la latitud 30° N hacia los 1100 msnm; siendo estas dos primeras regiones se encuentran en la parte baja de la cuenca; la región 3 se encuentra delimitada entre los 1100 y los 1600 msnm, en esta zona existen algunos comportamientos interesantes de transición en la parte alta y baja de la cuenca. Por último, la región 4, en la parte alta, se delimita a partir de los 1600 msnm hasta la zona del parteaguas, que es donde se tienen los mayores valores de elevación.

El cálculo de los índices se llevó a cabo con las mallas homogeneizadas de precipitación y temperatura, ya que es un requisito indispensable para el cálculo de dichos índices.

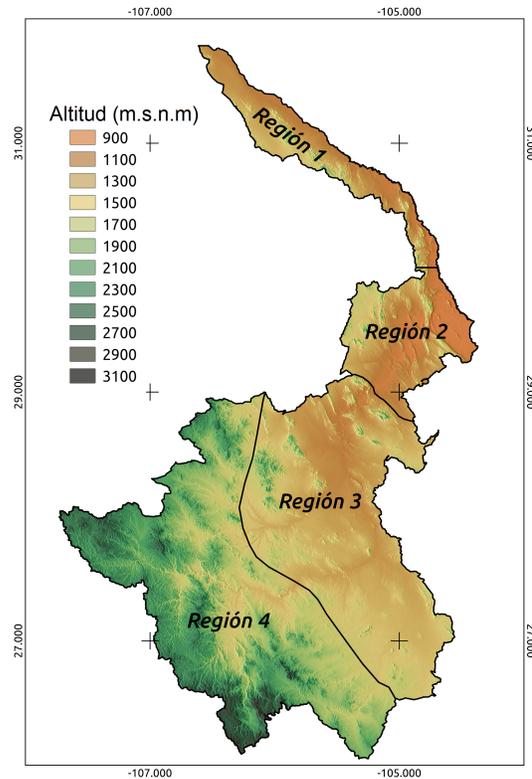


Figura 3.1: Regionalización de la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.1. Índices de cambio climático del *ETCCDI*

Los índices del *ETCCDI* permiten conocer las señales de cambio climático a nivel regional, de manera específica a los extremos meteorológicos desde el punto de vista climático (Vázquez-Aguirre, 2010). De los 27 índices se seleccionaron dos índices por cada variable para su descripción a lo largo de los 60 años de análisis; como la cuenca del río Conchos es un región semiárida donde las temperaturas máximas oscilan entre los 30 y 45 °C, se eligió **SU30** y **TXX** para observar el comportamiento de temperaturas altas. Para temperatura mínima, los índices **FDO** y **TNN** son una buena opción para analizar el comportamiento de los valores bajos de temperatura, ante el paso de frentes fríos y el clima en regiones altas. Y para precipitación los índices **CDD** y **PRCPTOT** son viables para observar la duración de algunos periodos secos y la precipitación anual en días húmedos.

3.1.1. Días de verano (SU30)

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j , $SU30$ es el número de días cuando:

$$TX_{ij} > 30^{\circ}C \quad (3.1)$$

El promedio del número de días de verano durante el periodo 1951-2010 se encuentra distribuido geográficamente con valores mayores en las subregiones 1, 2 y 3 en las que su promedio se encuentra superior a los 150 días de verano, cabe destacar que en estas tres regiones están situadas en la parte media y baja de la cuenca, además de situarse en las zonas con mayor grado de aridez; mientras que la región 4, que es la región montañosa, los días de verano se encuentra en el rango de 1 a 120 días aproximadamente, una de sus características muy notorias para esta porción es que se observa la transición de los valores máximos con los mínimos, teniendo un desplazamiento de suroeste a noreste (Figura 3.2).

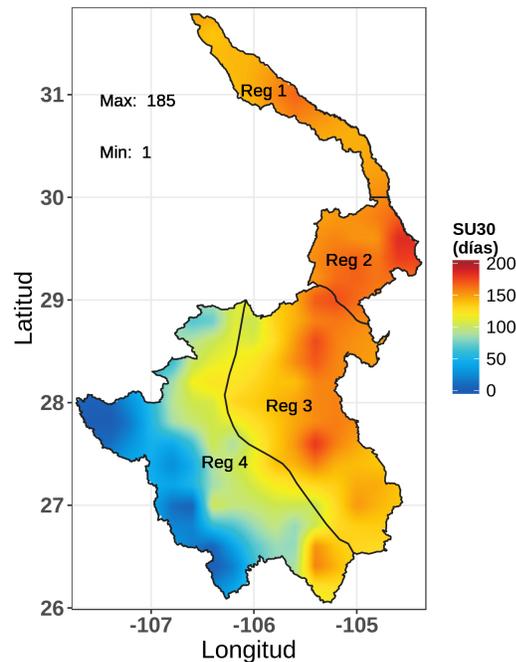


Figura 3.2: Mapa de los días de verano promedio en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

Analizando con detalle las cuatro subregiones en el diagrama *Código de barras* en la Figura 3.3 se observa que las regiones 1, 2 y 3 tienen un promedio cercano

a los 150 días de verano. Por otra parte, la región 4 tiene un comportamiento similar al de la cuenca en general, mas no tiene el mismo valor promedio. Los primeros siete años del análisis (1951-1957) son valores muy arriba del promedio para la cuenca y sus cuatro subregiones. Se observa que la región 2 resultó ser la más afectada al tener durante siete años consecutivos, valores cercanos a 200. Asimismo, la región 4 también se vio fuertemente afectada por días de verano mayores a su promedio en los primeros cuatro años, teniendo valores muy por arriba del promedio, sin embargo, toda la década de 1950 se mantuvo superior a su media por lo que la sequía de esa década se reflejó aún más en la región 4. A lo largo de 20 años (décadas de 1970 y 1980) los días de verano disminuyeron significativamente en la mayor parte de la cuenca, teniendo valores incluso menores al promedio. Fue hasta la década de 1990, como se menciona en líneas anteriores, donde se vuelve a ver un incremento significativo (mayor al promedio) pero menos intenso y prolongado, que el de la década de 1950.

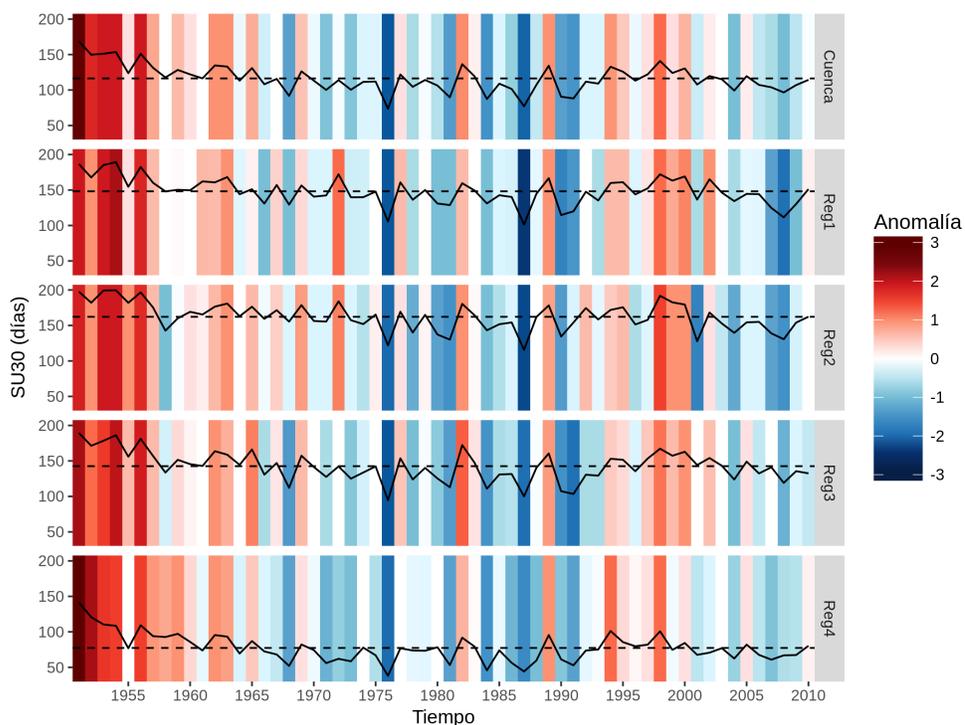


Figura 3.3: Diagrama código de barras de los días de verano en la cuenca del río Conchos; en barra se muestra la anomalía estandarizada, en línea discontinua el promedio de los días por región y en línea continua el número de días de verano por año en cada región. Elaboración propia.

Este índice resalta aspectos muy importantes, tales como sequías en las décadas de 1950 y 1990. Esto se puede observar en el diagrama Hovmöller de la Figura 3.4 que muestra como en los primeros años los días de verano estuvieron

en un rango entre 150 a 200 días en toda la cuenca, mientras que en los siguientes años comienza la disminución de esos días en las latitudes bajas de la cuenca. En las latitudes altas los días de verano se mantienen por arriba de los 150, este comportamiento es debido a que la parte norte de la cuenca del Conchos se encuentra en la región árida donde las temperaturas máximas superan los 40°C. Cabe resaltar que en los siguientes años, la cuenca del Conchos volvió a experimentar años completamente cálidos en toda su extensión, sin embargo, ya no fueron consecutivos como en los años 50.

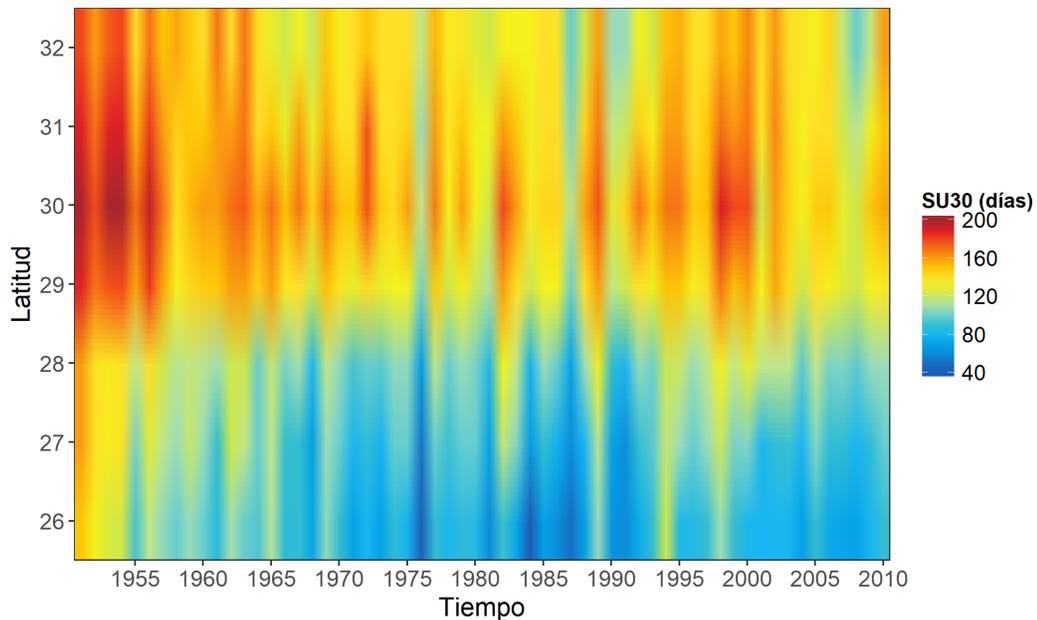


Figura 3.4: Diagrama *Hovmöller* de los días de verano (SU30) en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

3.1.2. Días de heladas (FD0)

Haciendo contraste con los días de verano, se calculan los días de heladas que dan la señal de qué tan frío ha sido durante las últimas décadas para la cuenca del río Conchos y sus subregiones. Si TN_{ij} es la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j , FD0 es el número de días cuando:

$$TN_{ij} < 0^{\circ}C \quad (3.2)$$

Si bien, en el mapa promedio muestra un comportamiento regularmente uniforme entre las regiones 1, 2 y 3, mientras que la región 4 alberga una pequeña

zona un poco aislada en la que los FD0 superan los 150 días (Figura 3.5).

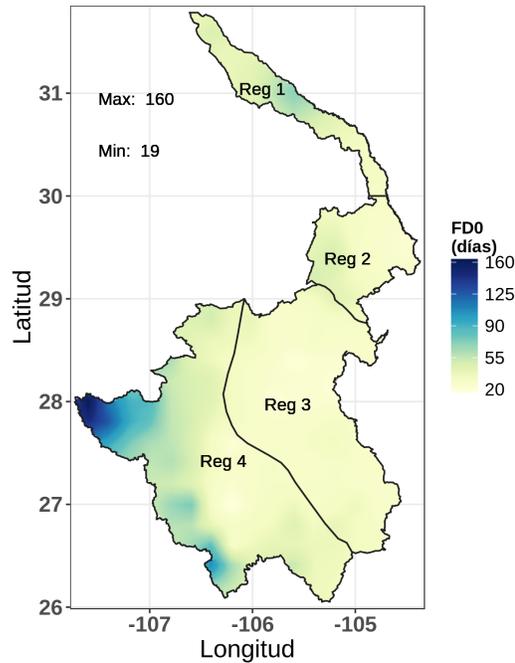


Figura 3.5: Mapa de los días de heladas promedio en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

En los primeros años del análisis, se nota que los FD0 se encuentran por arriba del promedio en la mayoría de las regiones como se muestra en la Figura 3.6, además se percibe que en las cuatro regiones del Conchos se presentó el periodo frío que va desde 1964 a 1988. Y como se menciona en el párrafo anterior y con la ayuda visual del diagrama código de barras, se nota la disminución de los días de heladas en las últimas dos décadas (1990 y 2000), no sólo para la cuenca, sino para sus cuatro regiones. Se nota que su anomalía estandarizada disminuye considerablemente. Este tipo de comportamiento muy prolongado no se había notado en periodos anteriores, por lo que se considera que no se debe a alguna variabilidad climática natural.

Es importante resaltar que en el diagrama Hovmöller modificado de este índice, presentado en la Figura 3.7 se observa que a partir de los 2000 msnm en la mayor parte del periodo los días de heladas son mayores; sin embargo, existe una pequeña porción entre los 2400 y 2600 msnm donde se encuentran los valores más altos en toda la cuenca. En un párrafo anterior se menciona que en una pequeña porción de la región 4 se concentran la mayor cantidad de días de heladas, en el diagrama Hovmöller modificado se comprueba que se trata de la misma zona, por lo que posiblemente se trate de un microclima. A partir de 1964

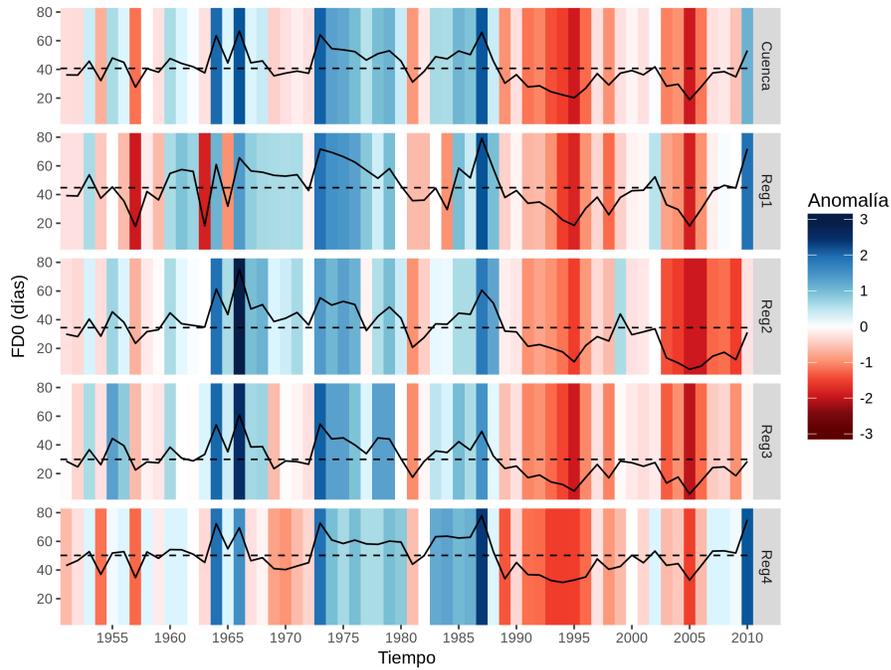


Figura 3.6: Diagrama código de barras de los días de heladas en la cuenca del río Conchos; en barra se muestra la anomalía estandarizada, en línea discontinua el promedio de los días para cada región y en línea continua el número de días de heladas por año en cada región. Elaboración propia.

hasta 1988 se percibe que prácticamente toda la cuenca, excepto algunos años (1969-1972) en algunas altitudes (1200-2000 msnm), presentó un periodo en el que los FD0 superaron los 60 días; para los últimos años los FD0 han venido disminuyendo gradualmente, lo que es un posible indicio de cambio climático para esta zona de estudio.

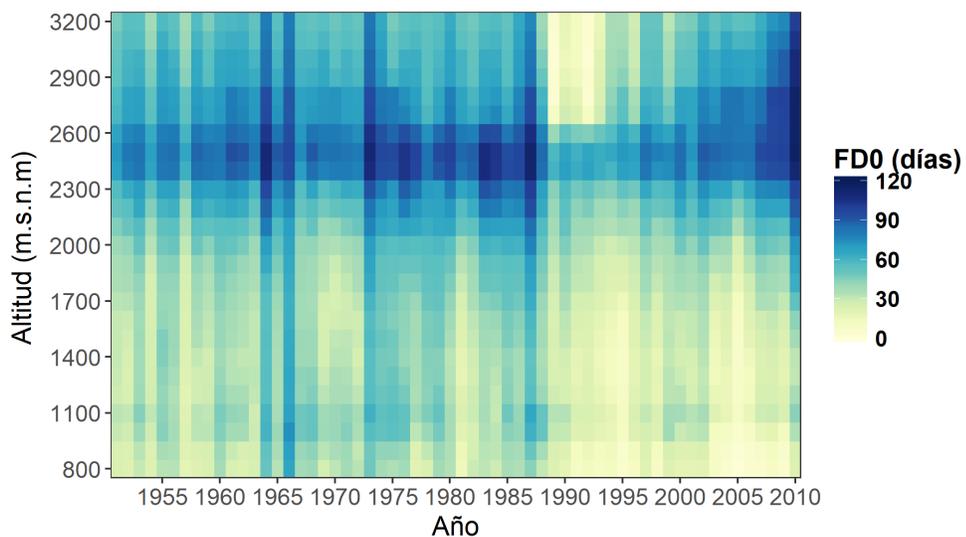


Figura 3.7: Diagrama Hovmöller modificado de los días de heladas (FD0) en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

3.1.3. Temperatura máxima extrema (TXX)

La cuenca del Conchos, es una región árida y semiárida por lo que las temperaturas máximas en general son altas, con registros mayores a los 40°C. Por esta razón se analiza el índice de la temperatura máxima extrema (TXX). Si TXX_j es la temperatura máxima diaria en el periodo j , TXX se define como:

$$TXX = \max(TXX_j) \quad (3.3)$$

Los valores promedio de la temperatura máxima extrema en el periodo 1951-2010 se encuentra entre los 28 y 43 °C, siendo la parte alta de la cuenca (Región 4) la que tiene un comportamiento menos cálido (30°C aproximadamente) mientras que el resto de la cuenca se mantiene uniforme con temperaturas superiores a los 40 °C (Figura 3.8).

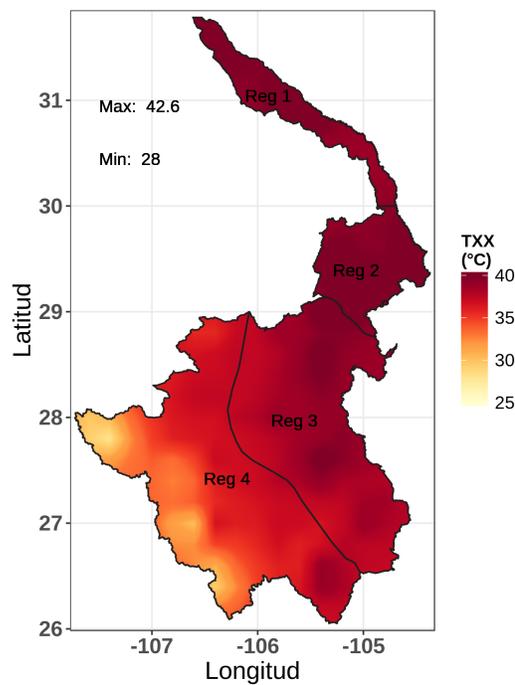


Figura 3.8: Mapa promedio de la temperatura máxima extrema en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

Analizando la cuenca del río Conchos y sus cuatro regiones para el índice TXX podemos destacar que los promedios rondan entre los 35 y 40 °C, y como se mencionaba en el párrafo anterior, la década de 1950 mostró las temperaturas más extremas de todo el periodo de estudio, además del periodo cálido de finales

de 1970 e inicio de 1980. Las cuatro regiones muestran un comportamiento más caliente en la primera mitad del periodo que el segundo; para la última década las temperaturas extremas disminuyeron tanto para la cuenca en general y para sus cuatro regiones, sin embargo, la región comenzó a tener aumentos en sus últimos años, para el 2010 se vuelven a incrementar, que puede corresponder al inicio de una sequía intensa en el 2011 señalada por Ortega-Gaucin (2013) (Figura 3.9).

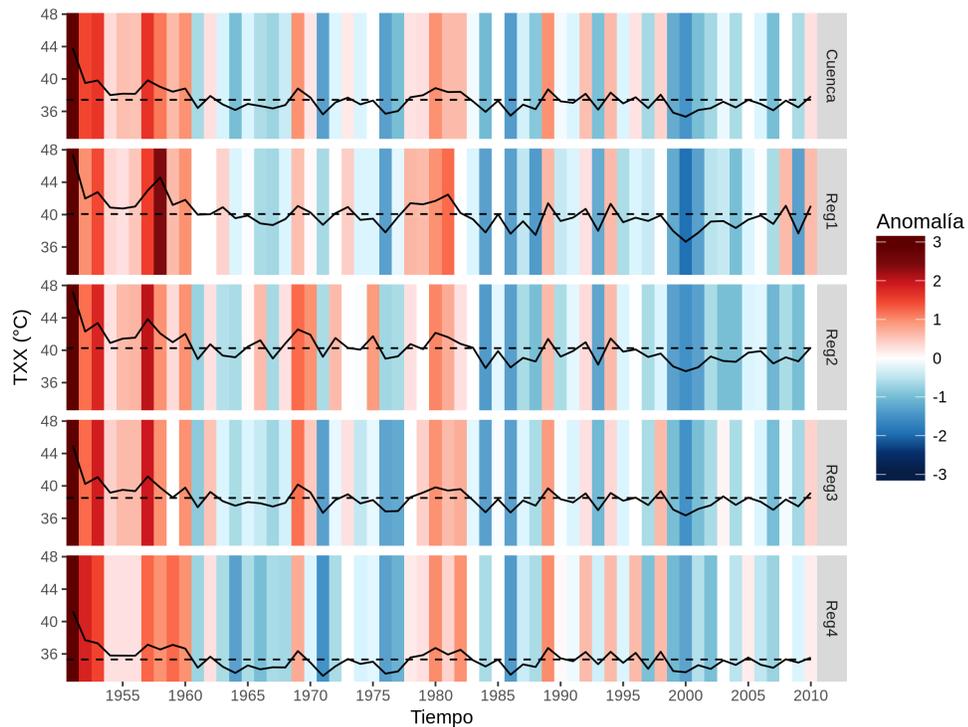


Figura 3.9: Diagrama código de barras de la temperatura máxima extrema (TXX) en la cuenca del río Conchos; en barra se muestra la anomalía estandarizada, en línea discontinua el promedio de los días para cada región y en línea continua el valor máximo de la temperatura máxima por año. Elaboración propia.

Los resultados mostrados para la cuenca, señala un rango de las temperaturas extremas superior a los 30°C, por lo que tiene una relación importante con los días de verano. La década de 1950 sobresale con valores de 45°C siendo la década más cálida; posteriormente, a finales de la década de 1970 y principios de 1980 se vuelve a presentar otro periodo cálido pero de menor intensidad al de 1950 que afectó prácticamente a toda la cuenca del Conchos. En la década de 1990 se presentaron algunos pulsos en los que las temperaturas máximas extremas volvieron a incrementar mas no fueron años consecutivos. En la Figura 3.10 se nota también que las temperaturas más altas se concentran en la parte superior a la latitud 28 y en la latitud 32 se encuentran los extremos en la mayor parte del periodo de análisis.

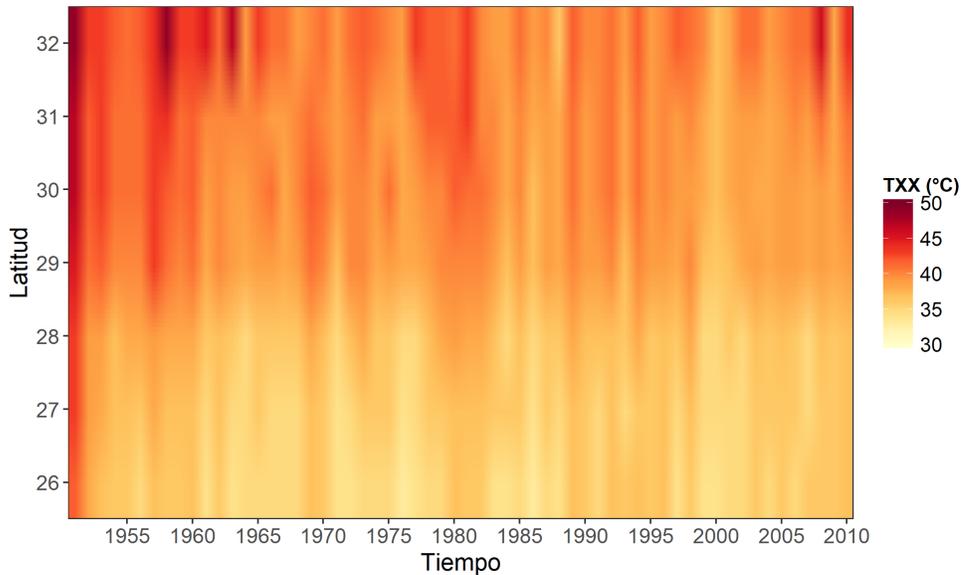


Figura 3.10: Diagrama *Hovmöller* de la temperatura máxima extrema (TXX) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.1.4. Temperatura mínima extrema (TNN)

Las temperaturas mínimas en la cuenca del río Conchos resultan ser considerables para el análisis, ya que por el paso de frentes fríos por la región las temperaturas llegan a los -15°C , por esta razón se incluye el índice TNN, donde TN_{nj} es la temperatura mínima en el periodo j y se define como:

$$TNN = \min(TN_{nj}) \quad (3.4)$$

En el mapa de la Figura 3.11 muestra el promedio de la TNN a lo largo del periodo de análisis. Ahí se puede observar que las temperaturas más frías están en los límites de la región 4. Esta región es la que en la mayoría de los índices se ha comportado de manera diferente; sin embargo, la región 1 también concentra valores de temperatura mínima extrema muy bajos, a pesar de formar parte de la cuenca baja, el paso de frentes fríos es un factor para tener ese comportamiento. Cabe resaltar que para toda la región del Conchos las temperaturas mínimas extremas están registradas por debajo de los 0°C .

Este índice tiene una importante relación con el índice días de heladas. Durante los últimos veinte años se ha venido observando que los valores mínimos extremos han ido aumentando en la mayor parte de la cuenca, por lo que puede ser uno de los indicios de un posible cambio climático, ya que este comportamiento no se

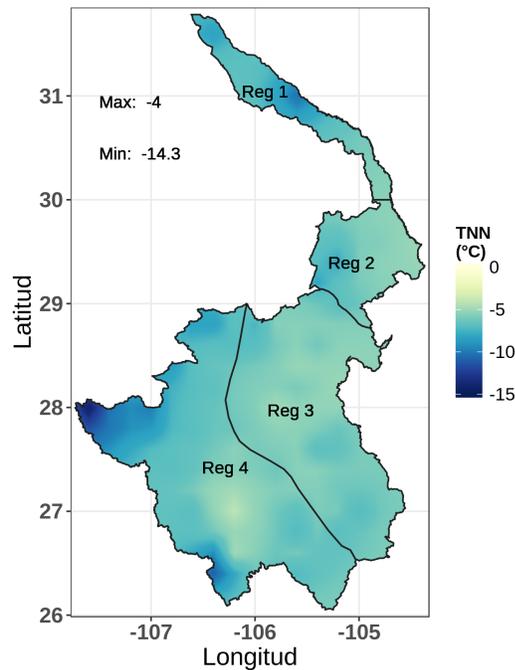


Figura 3.11: Mapa promedio de la temperatura mínima extrema en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

había visto en los primeros años de análisis, aunque se presenta un aumento de la temperatura mínima extrema a principio de la década de 1980. Esto parece indicar un periodo de transición para dar paso al aumento de la temperatura mínima extrema, como se describe en el párrafo anterior.

A simple vista el diagrama código de barras muestra en color rojo la anomalía positiva del índice TNN para la cuenca y sus cuatro regiones. En la Figura 3.12 se muestra el código de barras de TNN, tanto para la cuenca y sus 4 regiones. En el periodo de transición en la década de 1980, a partir de 1990 el aumento de los valores mínimos extremos es significativo excepto para la región 4, la zona montañosa ha tenido anomalías positivas desde la década de 1970, aunque no muy altas, hasta la última década, los años 2004 y 2005 se mantienen neutros a diferencia de las otras tres regiones; la región 2 es la que puede notar una tendencia a la alza siendo la más propensa al aumento de la TNN.

El diagrama *Hovmöller* de la Figura 3.13 muestra que en los primeros 30 años de análisis la cuenca del río Conchos generalmente se comportó con temperaturas extremadamente frías, si bien, se observa que en las latitudes altas de la cuenca (mayor a 30° N) las temperaturas mínimas extremas se ven influenciadas por el paso de frentes fríos, los mismo sucede en las latitudes bajas (menor a 27° N), mas no es tan intenso como en las latitudes altas aún cuando esta zona se encuentra

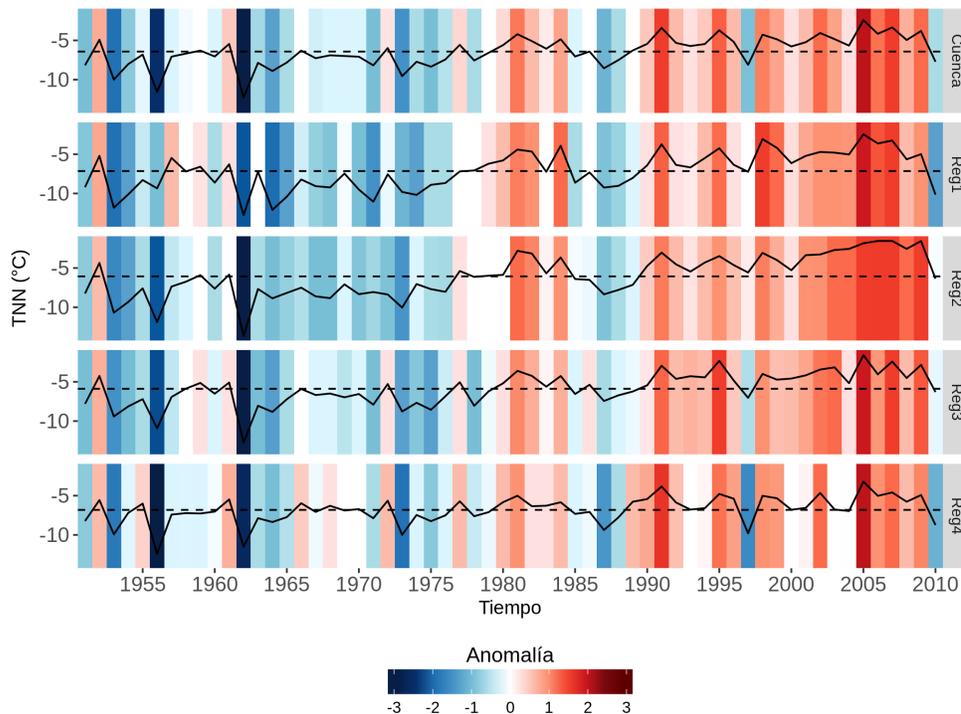


Figura 3.12: Diagrama *código de barras* de la temperatura mínima extrema (TNN) en la cuenca del río Conchos; en barra se muestra la anomalía estandarizada, en línea discontinua el promedio de los días para cada región y en línea continua el valor mínimo de la temperatura mínima por año. Elaboración propia.

en la montaña por lo que las temperaturas mínimas extremas se encuentran en los límites latitudinales de la región de estudio.

A lo largo del periodo de análisis se observan algunos pulsos de temperaturas extremadamente frías reflejados para toda la cuenca (1953, 1956, 1962, 1964, 1973, 1975, 1987 y 1988) donde su rango de valores de TNN va desde -5°C a -20°C . Entre las latitudes 28 y 31, la década de 1980 muestra un periodo de transición iniciando con valores de TNN altos, a mediados de la misma década vuelve al comportamiento que tenía en décadas anteriores para finalizar con la etapa de valores de TNN muy bajos, siendo a partir de 1990 y hasta el final del análisis solo se presentó un año (1997) en el que toda la cuenca registró valores de TNN inferiores a -5°C , haciendo excepción de ese año frío, el aumento de la temperatura mínima extrema se ha venido dando gradualmente, siendo en la latitud 30 donde se hace notar este aumento de la temperatura mínima extrema.

Para el último año se notan temperaturas menores en los límites latitudinales (mayor a 31°N y menor a 27°N), sin embargo, no tiene gran impacto para toda la cuenca con respecto a otros años que fueron más intensos, además de que no se comportó de manera uniforme para toda la cuenca por lo que no se podría

considerar como un pulso extremo del índice TNN.

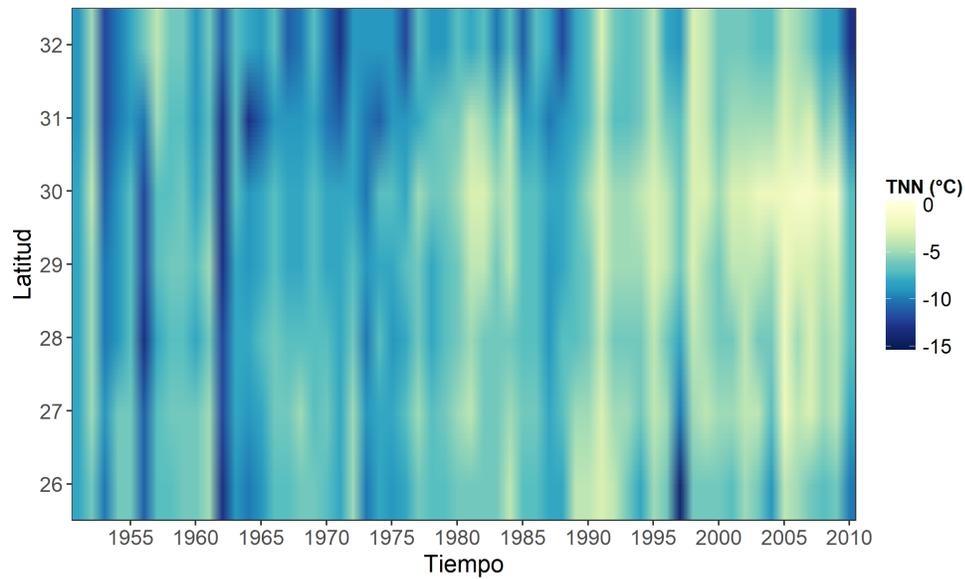


Figura 3.13: Diagrama *Hovmöller* de la temperatura mínima extrema (TNN) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.1.5. Días secos consecutivos (CDD)

La ausencia de la precipitación juega un papel muy importante en la cuenca del río Conchos, por lo que se ha seleccionado el índice CDD para analizar las zonas en las que haya sufrido algún cambio significativo. Si RR_{ij} es la cantidad diaria de precipitación en el día i del periodo j , CDD es el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1mm \quad (3.5)$$

El promedio de días secos consecutivos en el periodo 1951-2010 para la cuenca del río Conchos oscila entre 70 y 235 días, como se muestra en el mapa de la Figura 3.14. Ahí se observa el mayor número de CDD muy puntual en la región 1, 3 y 4, mientras que la región 2 se nota un poco más uniforme, superando los 100 días aproximadamente. También se puede notar que los CDD tienen una relación con la precipitación total (PRCPTOT), pues los mismos puntos donde hay mayor número de CDD es donde la precipitación es de menor valor (Figura 3.14).

El comportamiento de este índice en sus cuatro regiones es muy diferente entre ellas. De manea general, analizando el *Código de barras* de la Figura 3.15,

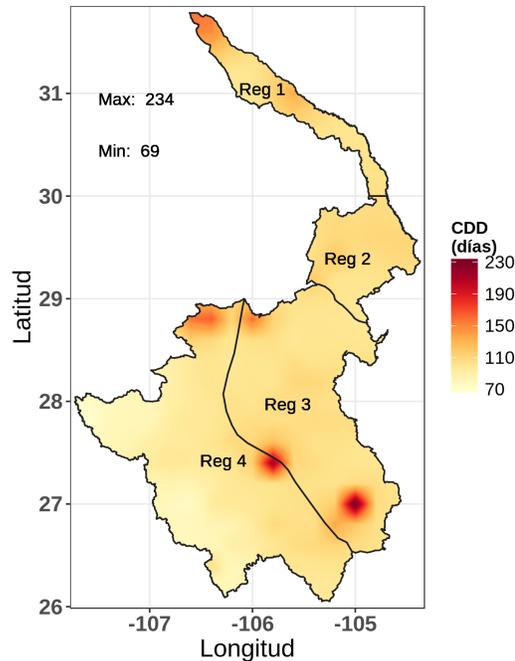


Figura 3.14: Mapa promedio de los días secos consecutivos en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

la cuenca muestra con claridad los dos periodos secos en las décadas de 1950 y 1990. Además se nota que los pulsos mencionados en el párrafo anterior se plasman en los años 1962, 1971, 1976, 1978 y 1988. Las cuatro regiones y la cuenca en general muestran un mismo patrón lineal, la media de los CDD de las regiones 1, 2 y 3 se encuentran por arriba de los 100 días secos consecutivos, mientras la región 4, compensando el comportamiento de la cuenca, está por debajo de los 100 días secos. Para la década final del análisis, los CDD en la región 1 estuvieron por debajo de la media, siendo la única de las cuatro zonas que no presenta días secos superiores a su media, la región 4 se nota más vulnerable a comparación con el resto, pues la ausencia de precipitación prolonga el número de días secos.

Analizando el diagrama *Hovmöller modificado* de la Figura 3.16, de 1951 a 1957 los días secos estuvieron predominando toda la cuenca, incluso a los 2800 m se encuentra el mayor número de días con ausencia de precipitación rebasando los 300 días, también se notan varios periodos a manera de pulsos en los que los CDD estuvieron más intensos en la mayor parte de la cuenca del río Conchos, sin embargo, la intensidad de la duración de los periodos secos se ve fuertemente afectada a la cuenca baja, entre los 800 y 1600 metros. Para la última década se observa que existe una disminución de los CDD del año 2001 al 2005, no obstante

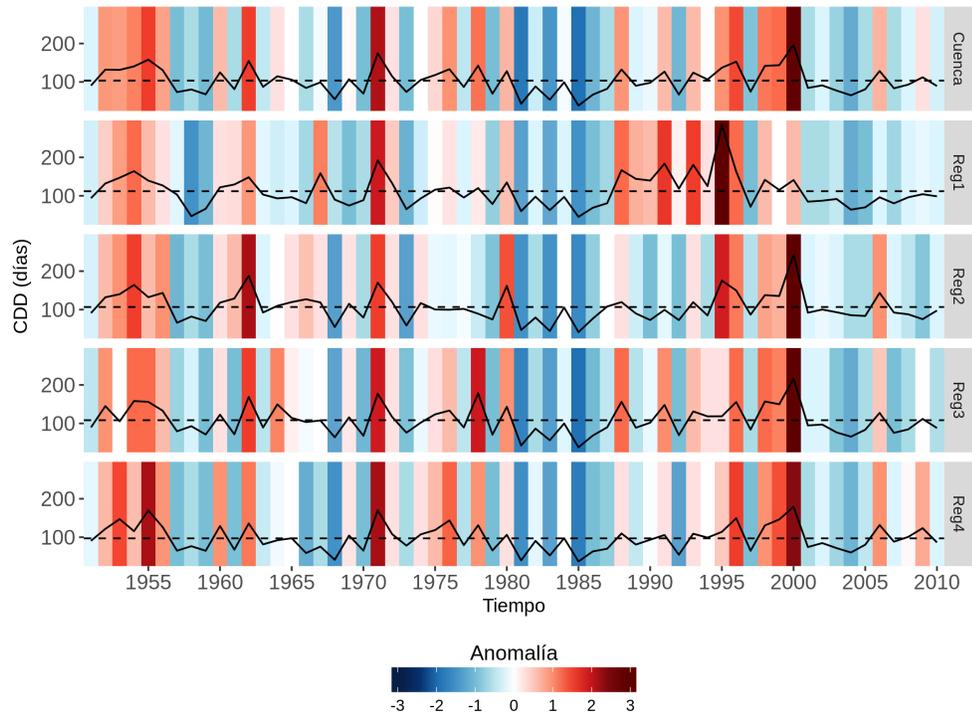


Figura 3.15: Diagrama *Código de barras* de los días secos consecutivos (CDD) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

los últimos cinco años (2006-2010) se vuelve a percibir un incremento de los días secos consecutivos.

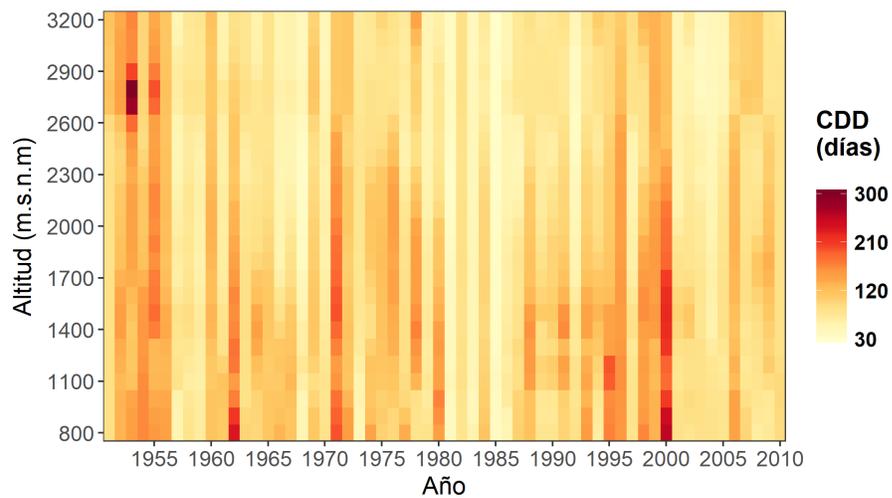


Figura 3.16: Diagrama *Hovmöller modificado* de los días secos consecutivos (CDD) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.1.6. Precipitación total anual (PRCPTOT)

La Figura 3.17 muestra el promedio de la precipitación total anual en la cuenca del río Conchos, a diferencia de la Figura 1.3 del Capítulo 1, el índice PRCPTOT solo toma en cuenta la precipitación en días húmedos, es decir, donde RR_{ij} es la cantidad diaria de precipitación en el día i del periodo j , si l representa el número de días en j entonces:

$$PRCPTOT = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (3.6)$$

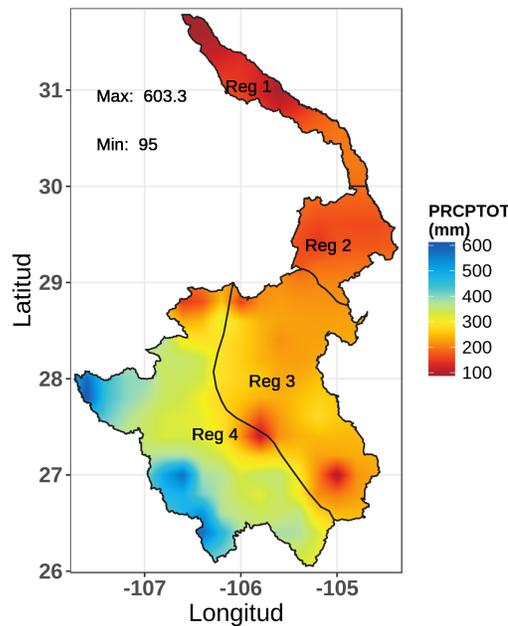


Figura 3.17: Mapa promedio de la precipitación total en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951-2010. Elaboración propia.

En el *Código de barras* de la Figura 3.18 la cuenca en general se muestran tres periodos muy prolongados, dos secos y uno húmedo, el primer periodo seco se mantuvo a lo largo de quince años (1951-1965) excepto 1958 que fue un año húmedo. Posteriormente, el periodo húmedo se presenta desde 1966 hasta 1987, teniendo solo tres años por debajo del promedio (1969, 1975 y 1982), de 1988 a 1991 se presenta un periodo de transición en donde dos años son secos y los siguientes dos son húmedos para dar paso a la sequía de 1990, que abarca desde 1992 a 2003. Para las cuatro regiones de la cuenca, los periodos secos y húmedos

se comportan de manera diferente; la región 4 en la década de 1950 fue más propensa a la sequía de ese periodo a diferencia de la sequía de 1990; esta región tiene una variabilidad similar a la de la cuenca en general. Las regiones 1, 2 y 3 se mostraron más propensas a la sequía más reciente, siendo la región 2 en la que mayor duración tuvo la sequía de 1990. En los últimos años de análisis, la región 1 se ha comportado más húmeda que el resto, mientras que la 3 y 4 en el 2010 se encuentran arriba del promedio, para dar paso a la sequía del 2011 que no se muestra en el periodo de análisis.

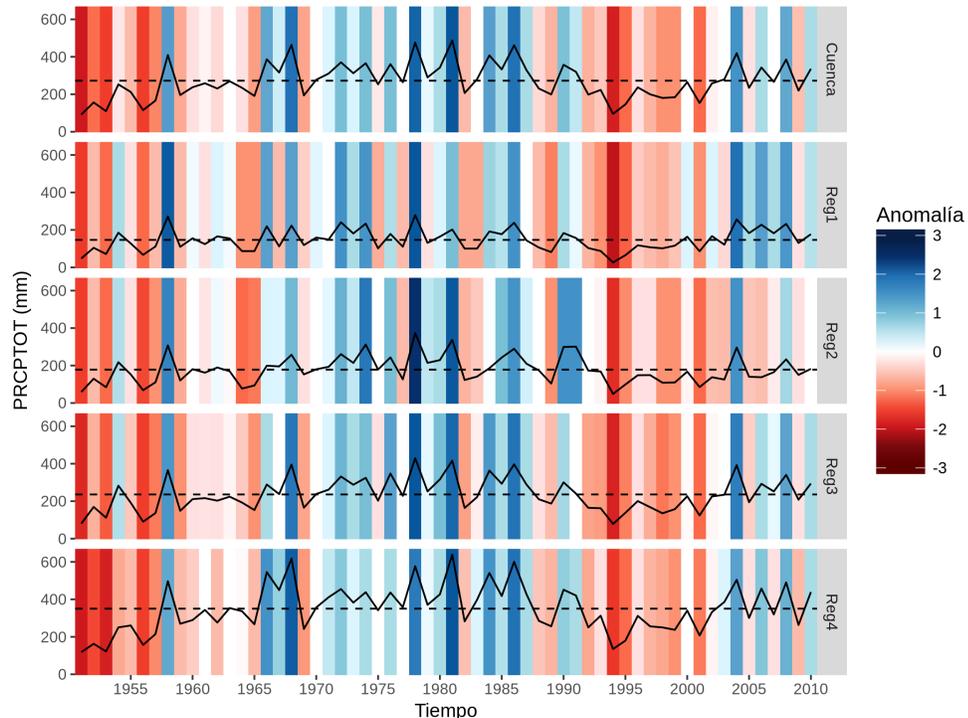


Figura 3.18: Diagrama Código de barras de la precipitación total (PRCPTOT) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la cuenca del Conchos se caracteriza por ser un región árida y semiárida debido a las altas presiones propias de la circulación general en donde los vientos son descendentes (Carlos González-Herrera and María L. García-Amaral and Gerardo Mollinedo-Beltrán and Olga Correa-Miranda, 2015), por lo que los valores de precipitación en algunos sitios de la cuenca son muy bajos. En la Figura 3.19 Se pueden notar las dos sequías (1950 y 1990) mencionadas por Ortega-Gaucin (2013) que afectaron severamente a toda la cuenca del Conchos. Además de los periodos secos, también se observa un periodo húmedo (1965-1985) en zonas inferiores a la latitud 29; de igual manera ocurre un aumento de la precipitación en la misma región para la primer década del siglo XXI. Al rededor de 1985 y a partir de la latitud 31 se percibe la escasez

de precipitación, pero no es sino hasta la década de 1990 donde esta escasez se extiende a toda la cuenca como una gran sequía. La latitud 29 se puede definir como la zona de transición entre la zona húmeda y la zona seca, pues los valores más altos de PRCPTOT se sitúan al sur de la cuenca.

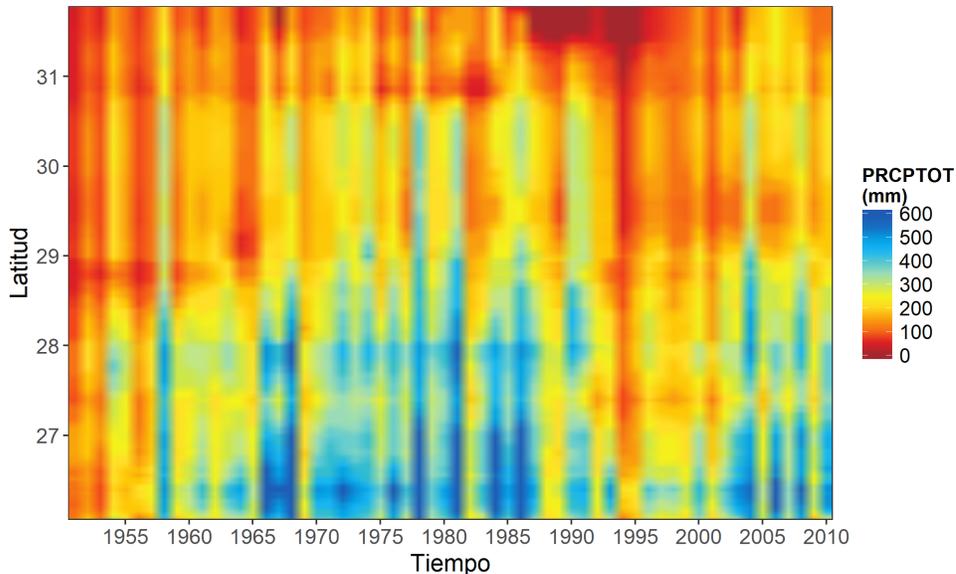


Figura 3.19: Diagrama *Hovmöller* de la precipitación total (PRCPTOT) en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.2. Índice Normalizado de Precipitación (SPI)

Los cambios en las series temporales para el periodo 1951-2010 del SPI desde la escala 1 mes a la escala 12 meses, haciendo énfasis en el SPI-12, los valores anómalos de precipitación tanto secos como húmedos tienen una variación significativa en las que se pueden identificar los periodos secos y húmedos (Figura 3.20). Los cambios en los periodos consecutivos del SPI implican un cambio en la forma de precipitar en la cuenca del río Conchos, y por ende, en su clima (Montero et. al., 2017).

En la Figura 3.20 se muestra el SPI en escalas de 1 a 12 meses para la cuenca y sus cuatro regiones en la que se han encontrado resultados interesantes para el análisis; se observan los dos periodos intensos de sequía hidrológica (décadas de 1950 y 1990) mencionados por Ortega-Gaucin (2013). El largo periodo de sequía que abarcó desde 1993 a 2003 presenta un severo déficit de precipitación. Analizando las cinco series, la región 4 fue la más afectada en cuanto al periodo de sequía de 1950, ya que fueron siete años consecutivos en los que la disminución

de precipitación predominó para esa porción de la cuenca. Dicha región contrasta el comportamiento general de la cuenca, ya que su comportamiento es muy diferente del resto de las regiones. 1958 fue un año predominantemente húmedo en toda la cuenca, donde la región 1 resultó la más húmeda para ese año. En los primeros años de la década de 1960 las condiciones para las cinco series se mostraron normales, sin embargo, posterior a la mitad de esa misma década las regiones 1 y 2 mostraron dos años secos para dar paso al extenso periodo húmedo en el que tuvo predominancia en toda cuenca, aunque hubo pequeños pulsos de periodos secos, no fue suficiente para establecer un periodo seco importante entre 1966 y 1987.

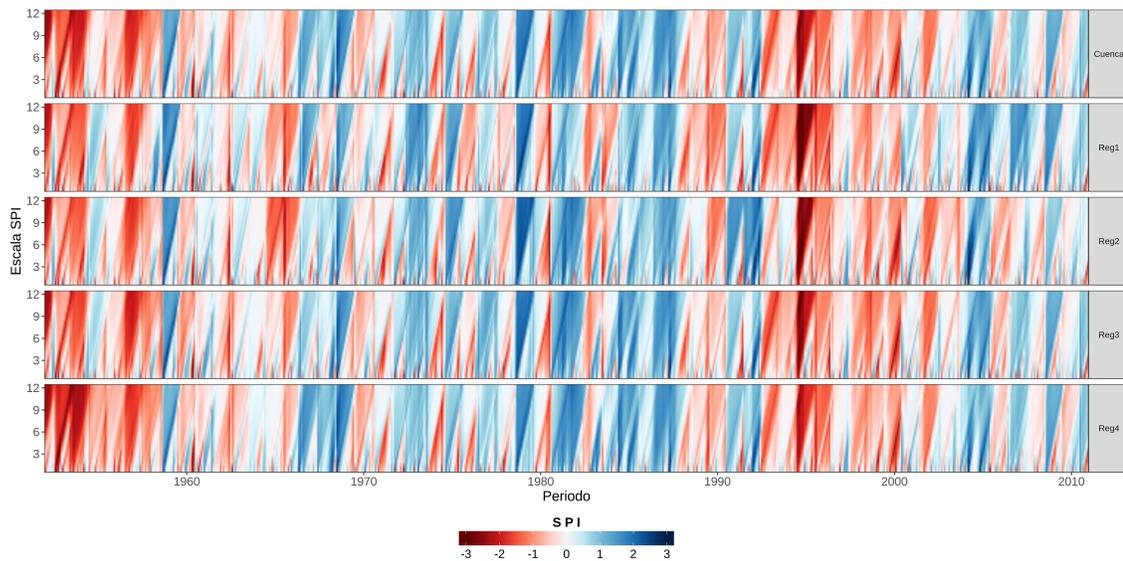


Figura 3.20: Índice Normalizado de Precipitación (SPI) en escalas 1 a 12 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

En los tres primeros años del periodo húmedo (1966, 1967 y 1968), la región 1 fue la única en los que tuvo un déficit en el año 1967; 1978 fue el año más húmedo para las cinco series, superando el valor 2 de SPI, lo que se considera como extremadamente húmedo. Para finales de la década de 1980 y principios de 1990 se nota un periodo de transición, como se había mencionado en el índice PRCPTOT analizado en el apartado anterior, donde hubo dos años secos (1988 y 1989) y dos húmedos (1990 y 1991). La región 2 presentó mayor humedad en estos dos años) para dar paso a la gran sequía de los noventa, que se extiende hasta principios del presente siglo. 1994 es un año extremadamente seco, acercándose a valor 3 de SPI en la cuenca y sus cuatro regiones, la duración de la sequía para la región 1 fue de 11 años (1992-2002), mientras para la 2 se extendió un año más (1992-2003), las regiones 3 y 4 la experimentaron en menor duración (diez años,

1992-2001). Para los últimos años del análisis se han mostrado años húmedos, sin embargo, en 2011 inicia otra sequía severa (Ortega-Gaucin, 2013), la cual podría analizarse en trabajos futuros. Los eventos de sequía de la década de 1950 y 1990 también se corroboran en los trabajos de Kim et al. (2002) y Velasco et al. (2004).

Relacionando el SPI con resultados mostrados por Ortega-Gaucin (2013) referente a sequías hidrológicas intensas en cuatro presas de almacenamiento que se sitúan en la cuenca del Conchos, en el diagrama Hovmöller modificado de la Figura 3.21 se encuentran marcados los periodos de sequía intensos para las presas San Gabriel, La Boquilla, Francisco I. Madero y Luis L. León con respecto a su valor de elevación.

La presa San Gabriel, situada a 1800 msnm muestra seis periodos intensos, tal como se señala en la Tabla 3.1. Los resultados del SPI muestran que en cinco de seis casos coinciden con lo mencionado por Ortega-Gaucin y sólo en el periodo 1979-1980 no hay coincidencia.

La presa La Boquilla, con una altitud cercana a los 1300 msnm presenta cuatro sequías intensas dentro del periodo de análisis (Tabla 3.1). De igual manera, los periodos tienen una alta correspondencia en el diagrama Hovmöller modificado de la Figura 3.21, en el que sólo el año 2004 se presenta como húmedo. Se hace mención del largo periodo de 1997 al 2005, sin embargo, con el SPI se identifica que este periodo comienza en el año de 1992.

San Gabriel	La Boquilla	Francisco I. Madero	Luis L. León
1950-1954	1950-1954	1950-1951	1947-1957
1962-1965	1956-1957	1964-1965	1994-2005
1979-1980	1961-1965	1982-1983	
1982-1983	1997-2005	1992-1995	
1994-1995		1997-2005	
1997-2005			

Tabla 3.1: Tabla de periodos de sequías intensas en embalses ubicados en la cuenca del río Conchos. Modificado de Ortega-Gaucin (2013).

La presa Francisco I. Madero (1200 msnm) a pesar de que se menciona el periodo 1950-1951, se extiende dos años más, para terminar el año 1954 y volviendo a responder con otros tres años secos que van desde 1955 a 1957. En la Tabla 3.1 se muestran los cinco periodos mencionados por Ortega-Gaucin (2013). Observando el SPI, se podría concretar que es posible de unir los dos

últimos periodos para establecer 14 años de sequía, desde 1992 al 2005.

Finalmente, la presa Luis L. León, ubicada en la parte baja de la cuenca (1080 msnm) muestra sólo dos periodos de sequía intensa (1947-1957 y 1994-2005), mismos que se encuentran altamente correlacionados con los dos grandes sequías que afectaron a la cuenca del río Conchos. En la figura 3.21 además de los periodos de sequía tanto cortos como largos, se muestran claramente en color rojo, si bien, la sequía de los cincuenta fue de gran afectación para las regiones superiores a los 2500 msnm.

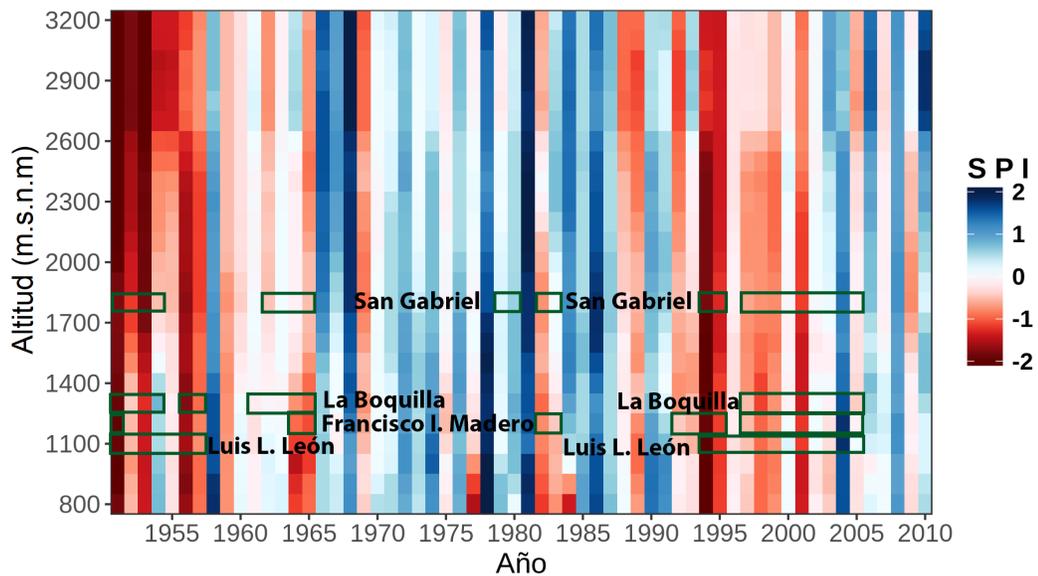


Figura 3.21: Diagrama *Hovmöller modificado* del Índice Normalizado de Precipitación (SPI) identificando sequías intensas en presas ubicadas en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

3.3. Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

Similar al SPI, el SPEI revela algunos puntos muy importantes a destacar. Dado que este índice incluye la evapotranspiración potencial, la temperatura juega un papel muy importante al influir en la condiciones de las sequías.

El SPEI muestra comportamientos similares al SPI descrito en el apartado anterior. Como se muestra en la Figura 3.22, en las escalas 1 a 12 meses se notan claramente los dos periodos intensos de sequía ya mencionados (décadas de 1950 y 1990). Cabe destacar que en los cincuenta, década en la que las temperaturas

máximas fueron muy extremas, aunado al severo déficit de precipitación en toda la cuenca, la sequía de ese periodo se nota más severa que la de los años noventa; sin embargo, para el periodo de estudio no se cuenta con los datos anteriores a 1951 con los que se podría percibir el inicio de esta gran sequía. Ortega-Gaucin (2013) señala que para unas regiones del Conchos, el inicio de esa sequía fue en 1949.

El periodo seco de los noventa que se extiende hasta los primeros años del siglo XXI. El SPEI muestra para la cuenca y sus cuatro regiones la misma duración, desde 1992 hasta el años 2003. Los periodos húmedos fueron dominantes desde mediados de los sesenta hasta mediados de los ochenta, teniendo pequeños pulsos de sequía pero poco duraderos. Con el SPEI también se corroboran los periodos secos en las presas de almacenamiento San Gabriel, La Boquilla, Francisco I. Madero y Luis L. León que describe Ortega-Gaucin (2013).

Para finales de la primer década del siglo XXI, los periodos húmedos han sido los que dominan en la mayor parte de la cuenca, sin embargo, los valores de SPEI en las escalas 1 a 6 meses, se observa a finales del 2010 el inicio de la sequía que tuvo lugar en el año 2011, la cual Ortega-Gaucin (2013) la cataloga como intensa, incluso se prolonga hasta el año 2012 para algunas regiones en las que se encuentran situadas las presas La Boquilla y Francisco I. Madero.

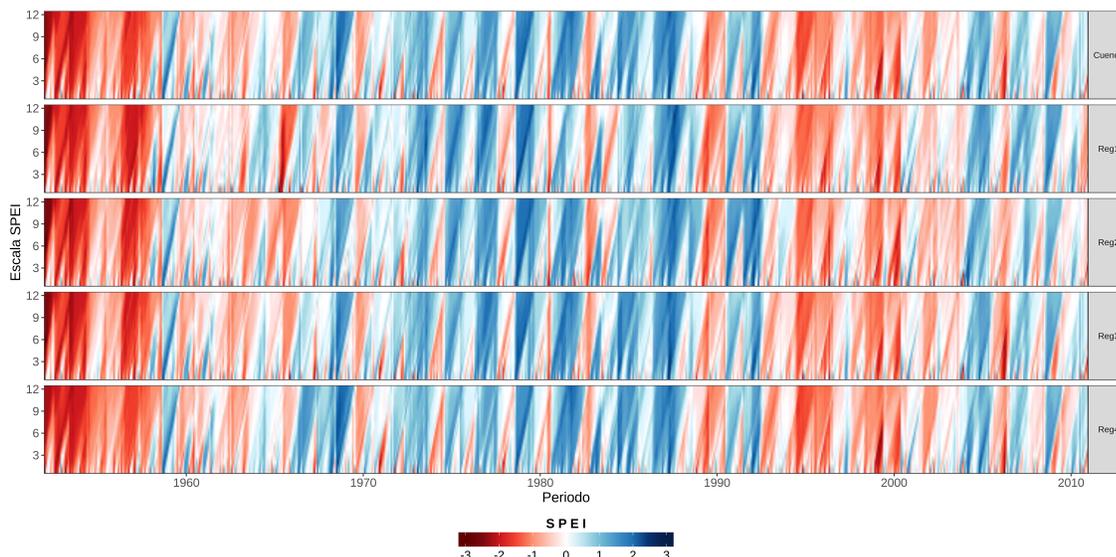


Figura 3.22: Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) en escalas de 1 a 12 en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

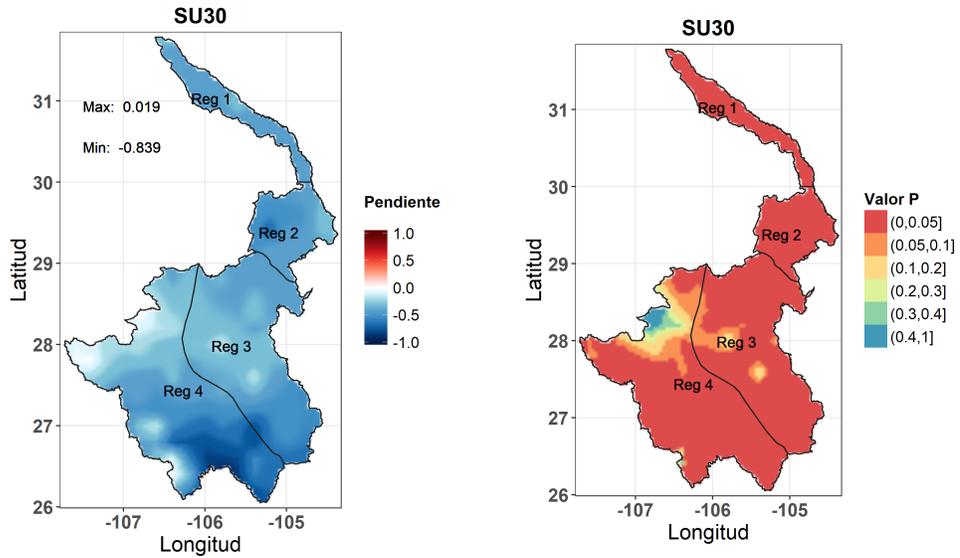
3.4. Análisis de tendencias

En un análisis estadístico a detalle en la cuenca del río Conchos, se consideró observar las tendencias lineales y su significancia estadística para los índices SU30, FD0, TXX, TNN, PRCPTOT, CDD, SPI y SPEI. En este análisis se identifican espacialmente las zonas que tienen cambios en las tendencias, además del nivel de confianza utilizando los valores P . Los índices relacionados con la temperatura máxima y temperatura mínima son los que reflejan un mayor nivel de confianza para la mayor parte de la cuenca, mientras que los índices de precipitación sólo muestran unas pequeñas porciones en las que su significancia estadística es muy importante.

En la Figura 3.23 se muestran las tendencias para los índices días de verano (3.23a) y Días de heladas (3.23c). Los Días de verano, en la mayor parte de la cuenca muestran una tendencia a la baja, por lo que los SU30 están disminuyendo. En la Figura 3.23b se muestra la significancia estadística con el valor P en la mayor parte de la cuenca, por lo que el nivel de confianza está establecido en casi la totalidad de la cuenca. En el otro extremo, los Días de heladas también se muestran con una tendencia a la disminución de los días fríos. Sin embargo, el nivel de confianza se muestra entre las regiones 2 y 3, dejando sólo una mínima parte a las regiones 1 y 4 (Figura 3.23d). De lo anterior, se puede decir que en la parte baja de la cuenca los SU30 y los FD0 están disminuyendo considerablemente.

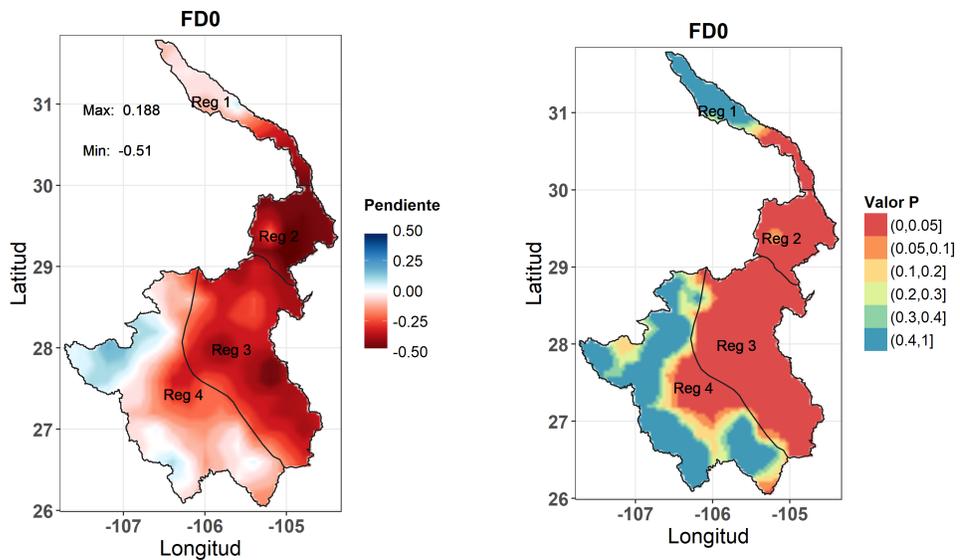
Continuando con el análisis de tendencias de los índices relacionados con los extremos de temperatura, en la Figura 3.24 se muestran los índices TXX y TNN con sus respectivas tendencias y valor P . La temperatura máxima extrema (TXX), al igual que los días de verano, muestra una pendiente negativa en aproximadamente 90 % de la cuenca (Figura 3.24a), mientras que la temperatura mínima extrema (TNN) muestra un tendencia a la alza (Figura 3.24c); para ambos índices, el valor P se encuentra distribuido de una manera similar, dando los niveles de confianza en las regiones 1, 2 y 3; mientras que la región 4 presenta sólo algunas porciones con significancia estadística (Figura 3.24b y 3.24d).

Los índices relacionados con la temperatura máxima y la temperatura mínima, en promedio y generalizado para toda la cuenca, presentan tendencias negativas como el SU30 (-0.434), FD0 (-0.209) y TXX (-0.035); a diferencia a los tres mencionados, el índice TNN presenta una tendencia positiva (0.066, Figura 3.25). Como se mencionaba en la descripción de los mapas de valores de probabilidad



(a) Valores de pendiente de los días de verano.

(b) Valores de probabilidad de los días de verano.

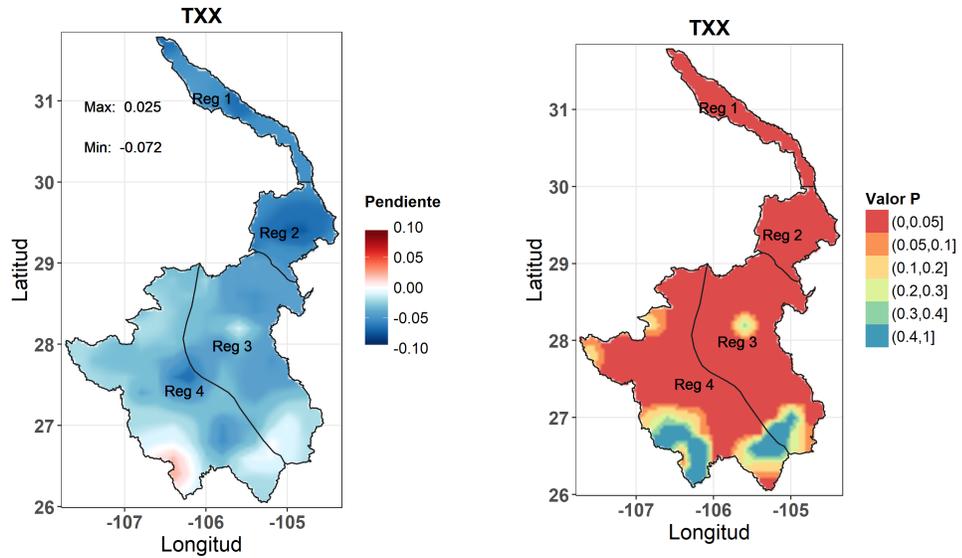


(c) Valores de pendiente de los días de heladas.

(d) Valores de probabilidad de los días de heladas.

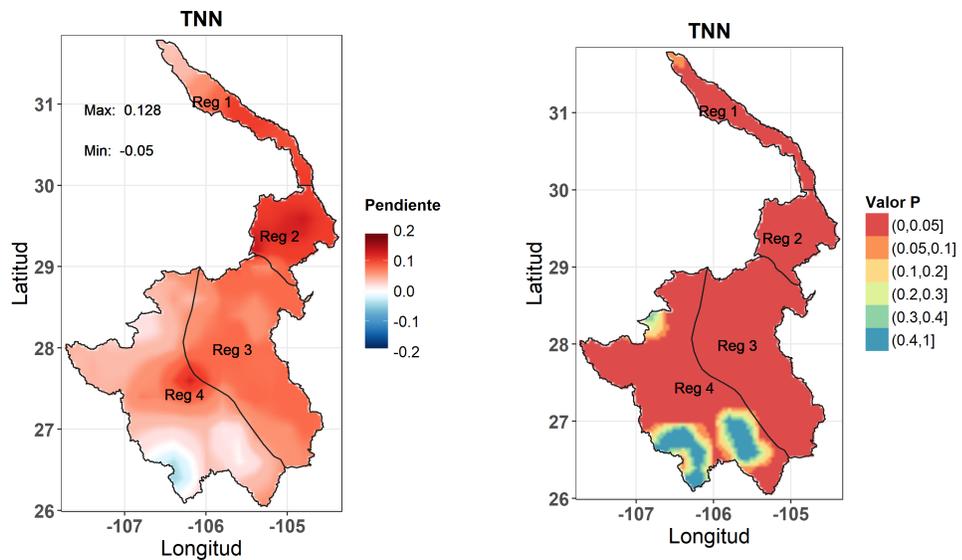
Figura 3.23: Tendencias y valores P de los índices SU30 y FDO en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

de estos cuatro índices, el valor de probabilidad en promedio para la cuenca se encuentra por debajo de 0.005 de estos índices relacionados con temperaturas máximas y mínimas, lo que su significancia estadística es bastante alta. De esta manera, se corrobora que la tendencia espacial con la tendencia lineal sobre el tiempo coinciden en estos índices en su mayoría.



(a) Valores de pendiente de la temperatura máxima extrema.

(b) Valores de probabilidad de la temperatura máxima extrema.

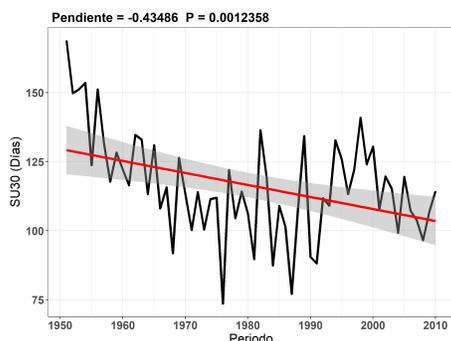


(c) Valores de pendiente de la temperatura mínima extrema.

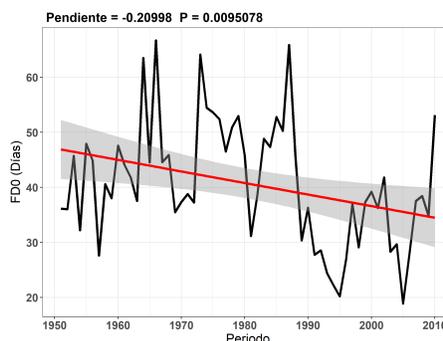
(d) Valores de probabilidad de la temperatura mínima extrema.

Figura 3.24: Tendencias y valores P de los índices TXX y TNN en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

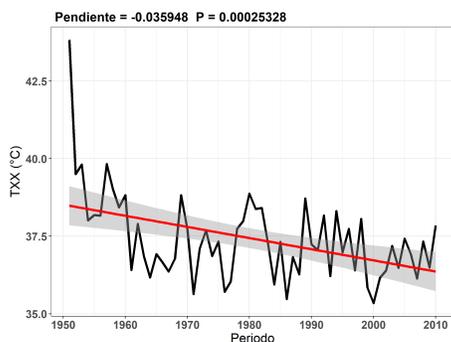
En la precipitación, la cuenca del río Conchos se muestra variada en cuanto a la distribución de las tendencias para los índices PRCPTOT, CDD, SPI y SPEI. Se pueden observar diversos comportamientos dentro de una misma región. La precipitación total muestra pendientes positivas en la parte de la montaña y en los límites de las regiones 3 y 4, mientras que los valores negativos se encuentran en los mismos límites, sólo que emplazado hacia el sur (Figura 3.26a).



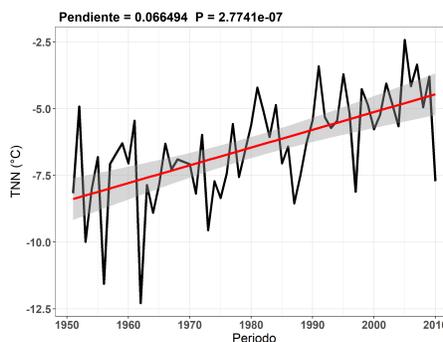
(a) Tendencia lineal de los días de verano (SU30).



(b) Tendencia lineal de los días de heladas (FD0).



(c) Tendencia lineal de la temperatura máxima extrema (TXX).

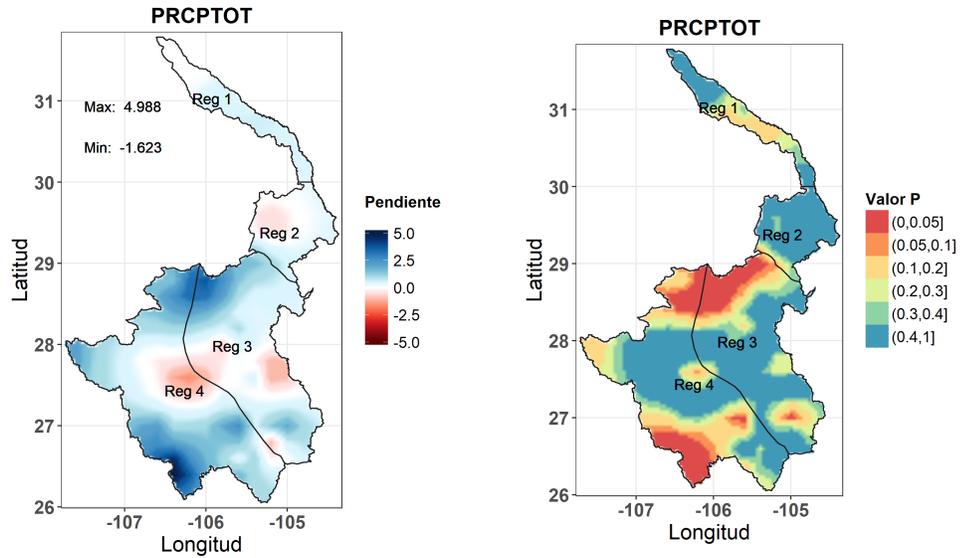


(d) Tendencia lineal de la temperatura mínima extrema (TNN).

Figura 3.25: Tendencias y valores P de los índices SU30, FD0, TXX y TNN en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951 a 2010. Se muestra en rojo la pendiente y en gris muestra el intervalo de confianza, el valor de pendiente, valor de probabilidad en la parte superior. Elaboración propia.

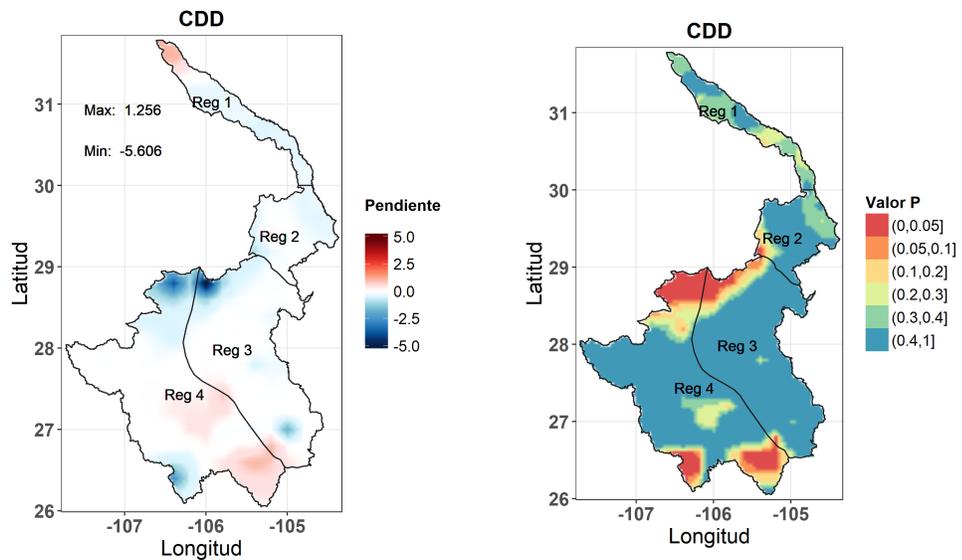
Los días secos consecutivos (CDD) muestran una disminución en la tendencia en los límites de la región 3 y 4, misma en la que el la PRCPTOT está aumentando, por lo que tiene una alta correspondencia el aumento de la precipitación con la disminución de los días secos (Figura 3.26c). Observando las figuras 3.26b y 3.26d se puede notar claramente que la significancia estadística se concentran en las mismas regiones de la cuenca.

El SPI muestra también una alta correspondencia con la precipitación total; su tendencia muestra que los límites de la región 3 y 4 tienden a ser secos, así como gran parte de la región 2 y una pequeña porción de la región 1. La región 3, cercana a la latitud 29, muestra una tendencia positiva, por lo que se considera húmedo para esa porción. También se muestra una gran relación con el aumento de precipitación y la disminución de los días secos (Figura 3.27a). El valor P para el SPI se ve marcado en la misma zona donde la tendencia es positiva, este resultado refuerza la relación con los dos índices anteriores (Figura 3.27b).



(a) Valores de pendiente de la precipitación total.

(b) Valores de probabilidad de la precipitación total.

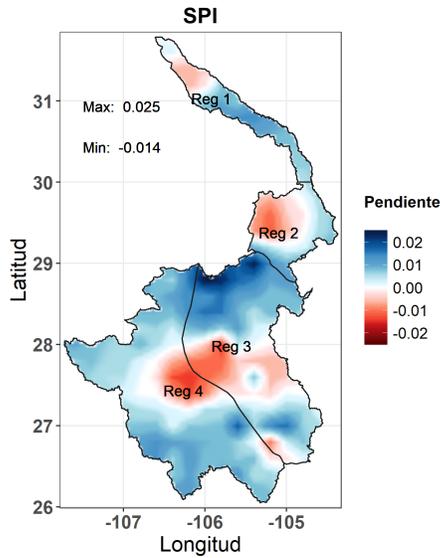


(c) Valores de pendiente de los días secos consecutivos.

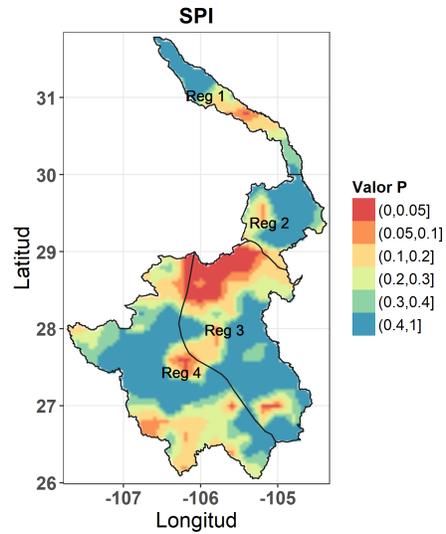
(d) Valores de probabilidad de los días secos consecutivos.

Figura 3.26: Tendencias y valores P de los índices PRCPTOT y CDD. Elaboración propia.

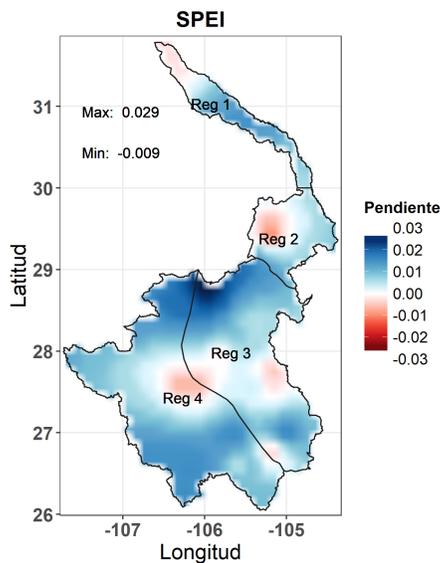
Para el SPEI, en la mayor parte de su superficie muestra una tendencia positiva (más húmedo), además de tener una alta similitud con la tendencia espacial del SPI. Pequeñas áreas en las regiones 1, 2 y 4 muestran una tendencia negativa (Figura 3.27c). La tendencia positiva se muestra dominante para este índice. El valor P para el SPEI en la Figura 3.27d muestra que las regiones 1, 3 y 4 tienen una significancia estadística alta y con un porcentaje en superficie del 20.6 %.



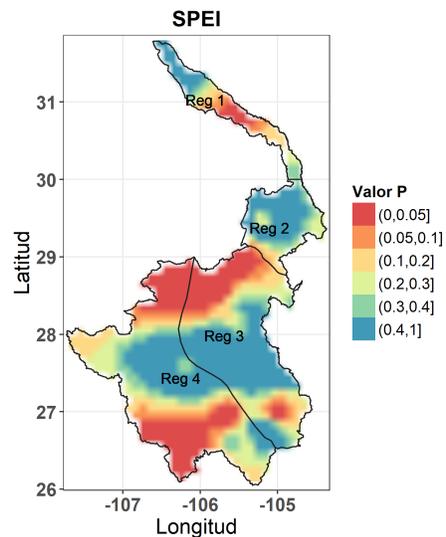
(a) Valores de pendiente del SPI.



(b) Valores de probabilidad del SPI.



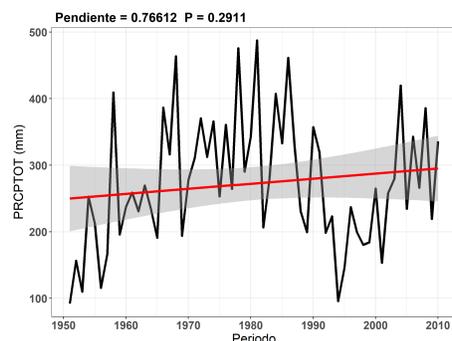
(c) Valores de pendiente del SPEI.



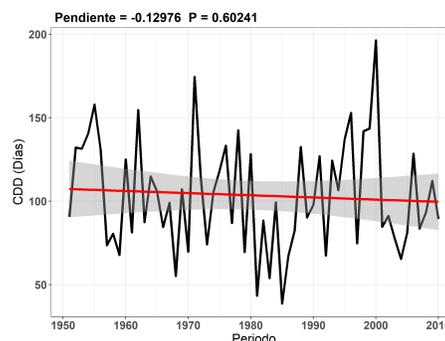
(d) Valores de probabilidad del SPEI.

Figura 3.27: Tendencia y valor P del Índice Normalizado de Precipitación y del Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración. Elaboración propia.

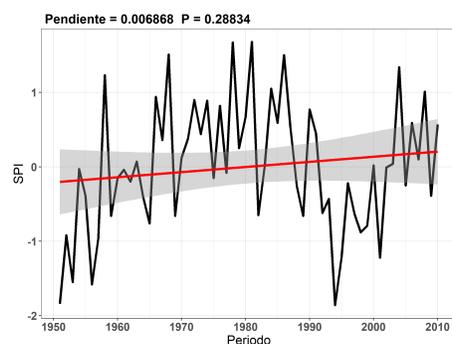
Las tendencias lineales a través del tiempo de análisis para los índices relacionados con la precipitación muestran aspectos muy interesantes como la disminución de los días secos consecutivos, el aumento de la precipitación total. También se corrobora con los mapas anteriores que la región del Conchos tiende a un comportamiento húmedo hacia los últimos años. Sin embargo, la significancia estadística no es tan alta como en los índices de temperatura (Figura 3.28).



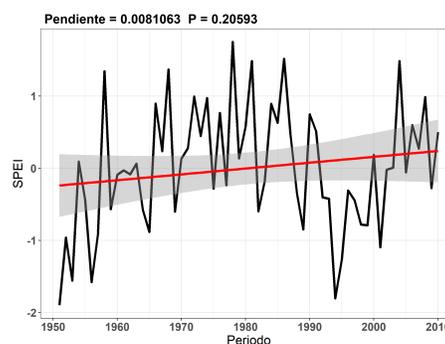
(a) Tendencia lineal de la precipitación total (PRCPTOT).



(b) Tendencia lineal de los días secos consecutivos (CDD).



(c) Tendencia lineal del Índice Normalizado de Precipitación (SPI).



(d) Tendencia lineal del Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI).

Figura 3.28: Tendencias y valores P de los índices PRCPTOT, CDD, SPI y SPEI en la cuenca del río Conchos en el periodo 1951 a 2010. Se muestra en rojo la pendiente y en gris muestra el intervalo de confianza, el valor de pendiente, valor de probabilidad en la parte superior. Elaboración propia.

Como se observó en las figuras 3.23b, 3.23d, 3.24b y 3.24d de esta sección, la significancia estadística muestra un porcentaje superficie considerable para los índices SU30, FD0, TXX y TNN, por lo que el grado de confianza para la cuenca es relativamente alto en el sentido de la gran extensión de territorio que ocupa la cuenca del río Conchos (Tabla 3.2).

Índice	Porcentaje Superficie	Índice	Porcentaje Superficie
SU30	86.8 %	PRCPTOT	10.7 %
FD0	53.3 %	CDD	6.8 %
TXX	78.1 %	SPI	5.9 %
TNN	85 %	SPEI	20.6 %

Tabla 3.2: Tabla de porcentaje de superficie ocupada por los valores P estadísticamente significativos en la cuenca del río Conchos. Elaboración propia.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Las evidencias de cambio climático a nivel regional son apenas identificables para la cuenca del río Conchos. Los índices que muestran algún cambio en el comportamiento del clima son los índices relacionados con la temperatura mínima como los días de heladas (están disminuyendo) y la temperatura mínima extrema (está aumentando). Sin embargo, los índices que están relacionados con la temperatura máxima también tienen cambios significativos, los días de verano y la temperatura máxima extrema están disminuyendo.

Como ya se mencionó en el párrafo anterior, la temperatura mínima extrema está aumentando y la temperatura máxima extrema está disminuyendo, es claro que el rango diurno de temperatura (DTR: diferencia entre la temperatura máxima extrema y la temperatura mínima extrema) también esté disminuyendo hacia los últimos años del periodo de análisis.

Los índices relacionados con la precipitación han mostrado que algunas porciones de la cuenca del río Conchos muestran tendencias al incremento, como en la zona de la montaña y la zona cerca a la latitud 29 N. Los cuatro índices que analizan la tendencia utilizando la variable precipitación tienen una correspondencia alta, la PRCPTOT va en aumento, los CDD disminuyen y la tendencia del SPI y SPEI va hacia un comportamiento húmedo para esas dos pequeñas regiones.

Respecto al SPI y el SPEI se ha identificado que durante las últimas décadas los periodos tanto húmedos como secos han sido más duraderos, tomando en cuenta la escala de 12 meses, por lo que se puede corroborar con lo mencionado por el IPCC (2007, 2014) en sus reportes, que son algunas de las consecuencias del incremento de los extremos a escala regional.

El Índice Normalizado de Precipitación y Evapotranspiración muestra claramente que al combinar la precipitación con la evapotranspiración se observa que, la sequía de la década de 1950 se comportó más extrema en comparación con la de 1990; sin embargo, la duración de la segunda sequía mencionada fue más extensa, esto es, desde 1992 hasta el 2005.

Los periodos de sequía en la cuenca del río Conchos entre 1951 y 2010 han sido más recurrentes.

El cambio climático a escala regional, en este caso, en la cuenca del río Conchos, se comienza a manifestar por medio de algunos indicios tales como el aumento de la temperatura mínima y periodos de sequía mas duraderos y recurrentes. El hecho de que la duración promedio de las anomalías tengan períodos largos nos hace pensar que podría tener una influencia de las oscilaciones planetarias de baja frecuencia como la AMO y/o la PDO, por lo que requiere realizar más estudios profundizando en el tema y corroborar con lo antes mencionado.

4.2. Recomendaciones

Es importante para un futuro a corto plazo realizar investigaciones referentes al cambio climático utilizando índices que nos ayuden a identificar indicios de algún tipo de anomalía, no sólo en la cuenca del río Conchos, sino en otras regiones hidrológicas para conocer la variabilidad climática en nuestro país.

Para las investigaciones referentes al clima, es recomendable contar con una base de datos nacional, ya sea por estaciones o en malla, para precipitación y temperatura que haya tenido un estricto control de calidad, además de ser completamente homogeneizada y sin datos ausentes dentro de un periodo base con el fin de tener una alta confiabilidad en los resultados que se puedan obtener.

Se recomienda que se tenga una mejor estrategia para al menos conservar el número de estaciones climáticas actuales, y que no siga decreciendo. Además, se recomienda que se incentiven programas de calibración y mantenimiento de las estaciones. El hecho de no contar con datos climáticos suficientes y de buena calidad, provocaría que los análisis climáticos no tengan una alta confiabilidad.

Para futuros trabajos en la región, puesto que estamos en la recta final de la segunda década del siglo XXI, se recomienda realizar análisis con una base de datos homogeneizada y actualizada hasta el año 2017. Así, se tendrá una mejor perspectiva de los cambios interanuales sobre el clima en la cuenca del río Conchos.

Apéndice A

Estaciones en la cuenca del río Conchos utilizadas para el control de calidad y homogeneización

	Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Elevación
1	08002	AVALOS	-106.01	28.61	1435
2	08005	BALLEZA	-106.35	26.96	1657
3	08006	BANDERAS	-105.57	31.00	1060
4	08009	BELISARIO DOMINGUEZ	-106.51	28.17	1640
5	08011	COLONIA BUFALO (SMN)	-105.17	27.28	1380
6	08013	CAMARGO (CFE)	-105.25	27.67	1250
7	08014	C.A.E. DELICIAS	-105.47	28.18	1170
8	08019	MEOQUI (SMN)	-105.49	28.27	1150
9	08021	CARICHI	-107.06	27.92	2080
10	08025	CAMARGO (SMN)	-105.17	27.69	1223
11	08026	CUAUHTEMOC	-106.90	28.40	1935
12	08027	DELICIAS (SMN)	-105.47	28.20	1170
13	08029	JIMENEZ (SMN)	-104.91	27.14	1380
14	08030	JUAREZ (SMN)	-106.49	31.74	1120
15	08033	COLONIA BUFALO (DGE)	-105.17	27.30	1380
16	08039	CUCHILLO PARADO	-104.90	29.43	909
17	08040	CHIHUAHUA (OBS)	-106.13	28.67	1509
18	08044	DELICIAS (DGE)	-105.46	28.19	1173
19	08049	LUIS L. LEON	-105.31	28.98	1080
20	08050	EL MAGUEY	-106.16	27.59	1700
21	08051	EL MEZQUITE	-104.67	29.53	820
22	08054	EL ORO	-105.85	26.86	2027
23	08056	PRESA EL REJON (SMN)	-106.12	28.61	1464
24	08057	EL SITIO	-106.29	27.57	1600

25	08060	EL TULE (SMN)	-106.25	27.05	1580
26	08061	EL VERGEL (SMN)	-106.39	26.47	2740
27	08072	GUADALUPE	-105.38	29.16	1420
28	08078	PRESA PARRAL	-105.73	26.91	1770
29	08081	JIMENEZ (DGE)	-104.92	27.13	1370
30	08083	JULIMES	-105.43	28.42	1120
31	08085	LA BOQUILLA	-105.41	27.54	1323
32	08092	LAS BURRAS	-105.43	28.52	1093
33	08099	MAJALCA	-106.48	28.80	2119
34	08102	MEOQUI (DGE)	-105.48	28.27	1155
35	08105	NONOAVA (SMN)	-106.73	27.47	1640
36	08108	OJO CALIENTE	-105.22	27.70	1222
37	08109	CHIHUAHUA PALACIO DE GOBIERNO	-106.09	28.64	1435
38	08112	POSTA ZOOTECNICA	-106.24	28.68	1587
39	08113	PRESA CHIHUAHUA (SMN)	-106.17	28.57	1532
40	08114	PRESA EL REJON (DGE)	-106.25	28.63	1560
41	08120	PLANTA ROSETILLA (CFE)	-105.33	28.22	1160
42	08123	SAN FRANCISCO DE BORJA (SMN)	-106.70	27.88	1664
43	08126	SAN JUANITO	-107.60	27.97	2400
44	08127	SAN LORENZO	-106.48	28.16	1600
45	08130	SANTA BARBARA	-105.82	26.80	1969
46	08133	SANTA RITA	-104.90	27.52	1312
47	08135	SAUCILLO	-105.30	28.04	1187
48	08136	SATEVO	-106.11	27.95	1380
49	08137	SIERRA ROMURACHIC	-107.37	27.85	2457
50	08147	CHIHUAHUA UNIVERSIDAD	-105.99	28.71	1350
51	08151	VALLE DE ALLENDE (SMN)	-105.40	26.94	1600
52	08152	VALLE DE ZARAGOZA (SMN)	-105.81	27.46	1340
53	08153	VALLE DE ZARAGOZA (DGE)	-105.81	27.45	1350
54	08156	VILLA CORONADO	-105.16	26.74	1516
55	08157	VILLA DE ALDAMA	-105.91	28.84	1270
56	08158	VILLALBA	-105.82	27.98	1280
57	08162	CAMARGO (DGE)	-105.18	27.70	1250
58	08165	CHIHUAHUA	-106.08	28.63	1428
59	08169	EL TULE I (DGE)	-106.27	27.05	1580
60	08174	INDUSTRIAS UNIDAS	-105.47	28.15	1200
61	08178	LA PRIETA	-105.65	26.93	1625
62	08180	MACLOVIO HERRERA	-105.14	29.06	980
63	08183	NONOAVA (DGE)	-106.73	27.47	1640
64	08185	PRESA CHIHUAHUA (DGE)	-106.17	28.58	1548
65	08186	PRESA TORREONCILLOS	-105.56	26.68	1720
66	08187	ROSETILLA	-105.30	28.25	1160
67	08188	SAN FRANCISCO DE BORJA (DGE)	-106.68	27.90	1640
68	08189	SAN PEDRO	-105.00	29.33	924
69	08194	VILLA LOPEZ	-105.04	27.00	1424

70	08196	HACIENDA TRES HERMANOS	-106.15	27.75	1502
71	08199	KILOMETRO 99 CANAL PRINCIPAL	-105.52	28.13	1205
72	08202	PRESA FRANCISCO I. MADERO	-105.63	28.17	1242
73	08203	LOS OJOS	-106.40	29.20	1560
74	08212	CARRETERA CAMPANA	-105.98	28.63	1410
75	08213	JUAREZ (DGE)	-106.49	31.74	1135
76	08241	PRESA TARAHUMARA	-104.50	29.53	795
77	08247	COYAME (DGE)	-105.25	29.45	1220
78	08250	ESCUELA SEC. CAMARGO	-105.17	27.70	1221
79	08251	ESCUELA SUP. DE ZOOTECNIA	-106.01	28.56	1500
80	08260	VALLE DE ALLENDE (DGE)	-105.38	26.95	1610
81	08264	AGOSTADERO	-106.67	26.95	2300
82	08267	EL VERGEL (DGE)	-106.39	26.48	2740
83	08270	LA MESA	-105.96	28.77	1250
84	08273	PARRAL A. EL HORMIGUERO	-105.62	26.90	1836
85	08274	SAN MARCOS	-106.34	28.81	1660
86	08278	RANCHO EL RETIRO	-106.30	28.90	1600
87	08297	CREEL	-107.60	27.80	2340
88	08300	EL SOCORRO	-105.62	28.42	1180
89	08303	C.E.M. CIUDAD DEPORTIVA	-105.98	28.70	1350
90	08304	ESCUELA DE AGRICULTURA	-105.47	28.19	1170
91	08305	PARRAL (OBS)	-105.67	26.92	1720
92	08306	PRESA LA BOQUILLA	-105.40	27.54	1280
93	08310	SANTA ROSALIA DE CUEVAS	-106.48	28.05	1680
94	08311	COLINA	-105.37	27.58	1214
95	08316	EL ALAMO	-104.86	29.56	940
96	08317	VILLA MATAMOROS	-105.58	26.76	1740
97	08318	ESCUELA SEC. JUAREZ	-106.43	31.63	1171
98	08319	LA LAGUNA	-107.55	27.83	2321
99	08320	LOS LLANITOS	-106.22	26.66	1740
100	08322	EL VERGEL (CFE)	-106.38	26.48	2740
101	08323	CARTONERA	-106.03	28.70	1410
102	08327	EL TULE II (DGE)	-106.27	27.05	1580
103	10061	ROSARIO	-105.64	26.51	1800
104	10062	SAN ANTONIO	-105.35	26.43	1665
105	10141	CANUTILLO	-105.37	26.53	1700
106	10173	SAN GABRIEL	-105.56	26.44	1750

Tabla A.1: Estaciones utilizadas para el control de calidad y homogeneización en la cuenca del río Conchos.

Apéndice B

Descripción de los 27 índices del ETCCDI (Zhang y Yang, 2004)

1. FD, Días de heladas. Recuento anual de días en que TN (temperatura mínima diaria) $< 0^{\circ}C$.

Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j , cuente el número de días cuando:

$$TN_{ij} < 0^{\circ}C$$

2. SU, Días de verano. Recuento anual de los días en que TX (temperatura máxima diaria) $> 25^{\circ}C$.

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j , cuente el número de días cuando:

$$TX_{ij} > 25^{\circ}C$$

3. Id, Días con hielo. Recuento anual de los días en que TX $< 0^{\circ}C$.

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j , cuente el número de días cuando:

$$TX_{ij} < 0^{\circ}C$$

4. TR, Noches tropicales. Recuento anual de los días en los que $TN > 20^{\circ}C$.
Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j , cuente el número de días cuando:

$$TN_{ij} > 20^{\circ}C$$

5. GSL, Estación de crecimiento (Growing Season Length).

Sea T_{ij} la temperatura media en el día i del periodo j . Cuente el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} > 5^{\circ}C$$

Y la primera ocurrencia después del 1ro de julio(1ro de enero en el hemisferio sur) de por lo menos 6 días consecutivos con:

$$T_{ij} < 5^{\circ}C$$

6. TXx, Temperatura máxima extrema. Valor máximo de la temperatura máxima diaria.

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j , la temperatura máxima diaria máxima es entonces:

$$TXx = \max(TX_{ij})$$

7. TNx, Temperatura mínima más alta. Valor máximo de la temperatura mínima diaria.

Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i del periodo j , temperatura mínima diaria máxima es entonces:

$$TNx = \max(TN_{ij})$$

8. TXn, Temperatura máxima más baja. Valor mínimo de la temperatura máxima diaria.

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i del periodo j , la temperatura

máxima diaria mínima es entonces:

$$TXn = \min(TX_{ij})$$

9. TNn, Temperatura mínima extrema. Valor mínimo de la temperatura mínima diaria.

Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i del periodo j , la temperatura mínima diaria mínima es entonces:

$$TNn = \min(TN_{ij})$$

10. Tn10p, Frecuencia de noches frías.

Sea TN_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn^{en10} el día del calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje del tiempo en el que:

$$Tn_{ij} < Tn_{in10}$$

11. Tx10p, Frecuencia de días frescos.

Sea TX_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn^{en10} el día del calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje del tiempo en el que:

$$Tx_{ij} < Tx_{in10}$$

12. Tn90, Frecuencia de noches cálidas.

Sea Tn_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn^{en90} el día del calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje del tiempo en el que:

$$Tn_{ij} < Tn_{in90}$$

13. Tx90p, Frecuencia de días calurosos.

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx^{en90} el

día del calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. El índice indica el porcentaje del tiempo en el que:

$$Tx_{ij} > Tx_{in90}$$

14. WSDI, Duración de los periodos cálidos (Warm Spell Duration Index).

Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea Tx^{en90} el día del calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tx_{ij} < Tx_{in90}$$

15. CSDI, Duración de los periodos fríos (Cold Spells Duration Index).

Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea Tn^{en90} el día del calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tn_{ij} < Tn_{in10}$$

16. DTR, Rango diurno de temperatura (Diurnal Temperature Range).

Sean Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día i en el periodo j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$DTRJ = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I}$$

17. Rx1day, Precipitación máxima en un día.

Sea RR_{ij} el total de precipitación diaria en el día i en el periodo j . Entonces los valores máximos de 1 día para el periodo j son:

$$Rx1dayj = \max(RR_{ij})$$

18. Rx5day, Precipitación máxima en 5 días.

Sea RR_k la cantidad de precipitación para el intervalo de 5 terminando en k , periodo j . Entonces los valores máximos de 5 día para el periodo j son:

$$Rx5dayj = \max(RR_kj)$$

19. SDII, Índice simple de intensidad diaria (Simple Daily Intensity Index).

Sea RR_wj la cantidad diaria de precipitación en días húmedos w ($RR \geq 1mm$) en el periodo j . Si W representa el número de días húmedos en j , entonces:

$$SSDII = \frac{\sum_{w=1}^W RR_wj}{W}$$

20. R10, Días con lluvia mayor a 10 mm.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10mm$$

21. R20, Días con lluvia mayor a 20 mm.

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20mm$$

22.- Rnn, Días con lluvia mayor a nn mm. Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Si nn representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, cuente el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nnmm$$

23. CDD, Días secos consecutivos (Consecutive Dry Days).

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1mm$$

24.-CWD, Días húmedos consecutivos (Consecutive Wet Days).

Sea RR_{ij} la cantidad diaria de precipitación en el día i en el periodo j . Cuente el más grande número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1mm$$

25. R95pTOT, Días muy húmedos.

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y sea RR_{wn95} el percentil 95th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R95pj = \sum_{W=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde} \quad RR_{wj} > RR_{wn95}$$

26. RP99p, Días extremadamente húmedos.

Sea RR_{wj} la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo $w(RR \geq 1.0mm)$ en el periodo j y se RR_{wn99} el percentil 99th de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si W representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99pj = \sum_{W=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde} \quad RR_{wj} > RR_{wn99}$$

27. PRCPTOT, Precipitación total anual en días húmedos.

Sea RR_{ij} la cantidad de precipitación diaria en el día i en el período j . Si I representa el número de días en j , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij}$$

Apéndice C

Malla homogeneizada de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, periodo 1951-2010 e Índices de cambio climático en malla

Las mallas homogeneizadas generadas en *Climatol* y los índices de cambio climático en formato malla utilizados en este trabajo de investigación se encuentran disponibles en los siguientes links de descarga:

http://gradiente.imta.mx/content/databases/mallas/conchos_1951-2010.nc

<https://1drv.ms/u/s!AiF5FoMxoOKyhG1zVmK0PWY-gyXe>

Apéndice D

Componentes y estructura obtenida en el cálculo del SPI y SPEI

- call: la llanda SPI para generar el objeto.
- fitted: series de tiempo con los valores del SPI.
- coefficients: matriz con los valores de la función de distribución de distribución utilizada a los datos.
- scale: escala utilizada para generar el objeto *spei*.
- kernel: parámetros y valores del núcleo utilizado para genera el objeto *spei*.
- distributiomn: función de distribución utilizada.
- fit: método de ajuste utilizado para generar el objeto *spei*.
- na.value: valor NA del parámetro utilizado.

```
$ call          : language spi(data = Basin[, "PRCP_B"],
  scale = 12)
$ fitted        : Time-Series [1:720, 1] from 1951 to 2010
$ coefficients: num [1:2, 1, 1:12]
$ scale         : num 12
$ kernel        :List of 3
..$ type       : chr "rectangular"
..$ values: num [1:12] 0.0833 0.0833 0.0833 0.0833 0.0833
$ distribution: chr "Gamma"
$ fit          : chr "ub-pwm"
- attr(*, "class")= chr "spei"
```

Apéndice E

Propiedades de los archivos raster a utilizar para el Diagrama Hovmöller modificado

```
> altitud
class      : RasterLayer
dimensions : 1240, 840, 1041600 (nrow, ncol, ncell)
resolution : 0.005, 0.005 (x, y)
extent     : -108.1, -103.9, 25.9, 32.1 (xmin, xmax,
      ymin, ymax)
coord. ref. : +proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84 +
      towgs84=0,0,0
> index
class      : RasterBrick
dimensions : 1240, 840, 1041600, 60 (nrow, ncol, ncell,
      nlayers)
resolution : 0.005, 0.005 (x, y)
extent     : -108.1, -103.9, 25.9, 32.1 (xmin, xmax,
      ymin, ymax)
coord. ref. : +proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84 +
      towgs84=0,0,0
```

Referencias

- Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., y Choudhury, B. (1988). Improved Ground Hydrology Calculations for Global Climate Models (GCMs): Soil Water Movement and Evapotranspiration. *Journal of Climate*, 1(9), 921-941. Descargado de [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0921:IGHCFG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0921:IGHCFG>2.0.CO;2) doi: 10.1175/1520-0442(1988)001<0921:IGHCFG>2.0.CO;2
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein-Tank, A. M. G., ... Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5).
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Jour. of Climatology*, 6, 661-675.
- Beguiría, S., y Vicente-Serrano, S. M. (2017). SPEI: Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index [Manual de software informático]. Descargado de <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI> (R package version 1.7)
- Carlos González-Herrera and María L. García-Amaral and Gerardo Mollinedo-Beltrán and Olga Correa-Miranda. (2015). *Atlas de procesos y estructuras territoriales del estado de Chihuahua* (C. A. Editorial, Ed.). Colegio de Chihuahua.
- Castillo-Liñán, S. (2017). *Análisis de datos e índices de cambio climático en la cuenca del río Conchos* (Tesina de licenciatura). Universidad Veracruzana.
- CONAGUA. (2011). Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de la región hidrológica número 24 Bravo-Conchos. *Diario Oficial de la Federación*. Descargado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5192916&fecha=02/06/2011
- CONAGUA. (2012). *Estudios de investigación para caracterizar a las regiones del país en función del cambio climático, incluyendo los mapas asociados; II*

- Noroeste. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S., y Reichstein, M. (2013). Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113–2144. Descargado de <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/5/2113> doi: 10.3390/rs5052113
- Forkel, M., Migliavacca, M., Thonicke, K., Reichstein, M., Schaphoff, S., Weber, U., y Carvalhais, N. (2015). Codominant water control on global interannual variability and trends in land surface phenology and greenness. *Global Change Biology*, 21(9), 3414-3435. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12950> doi: 10.1111/gcb.12950
- for the Pacific Climate Impacts Consortium, D. B. (2014). climdex.pci.ncdf: Functions to compute CLIMDEX indices over a NetCDF grid [Manual de software informático]. Descargado de <http://www.r-project.org> (R package version 0.5-4)
- González-Villela, R., Montero-Martínez, M. J., y Santana-Sepúlveda, J. S. (2017). Repercusiones del cambio climático en el caudal ecológico del río Conchos (Chihuahua). En *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático* (p. 109-156). Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- Guijarro, J. A. (2016). *Homogeneización de series climáticas con Climatol 3.0*. Islas Baleares, España.
- Guijarro, J. A. (2018a). climatol: Climate Tools (Series Homogenization and Derived Products) [Manual de software informático]. Descargado de <https://CRAN.R-project.org/package=climatol> (R package version 3.1.1)
- Guijarro, J. A. (2018b). *Homogeneización de series climáticas con Climatol*. Islas Baleares, España. Descargado de http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf (Versión 3.1.1)
- Hawkins, E. (2018). *Warming stripes*. Climate Lab Book. <http://www.climate-lab-book.ac.uk/2018/warming-stripes/>. Consultado en Julio 2018.
- Hijmans, R. J. (2016). raster: Geographic Data Analysis and Modeling [Manual de software informático]. Descargado de <https://CRAN.R-project.org/package=raster> (R package version 2.5-8)
- Hovmöller, E. (1949). *The Trough-and-Ridge diagram*. *Tellus*, 1: 62–66.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge

- University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Descargado de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers [Book Section]. En T. Stocker et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1–30). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Descargado de www.climatechange2013.org doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- IPCC. (2014). *CAMBIO CLIMATICO 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso). Descargado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm.es.pdf
- Jiménez-González, G. (2002). Uso agrícola del agua en la Cuenca del Río Conchos. *Redescubriendo la Cuenca del Río Conchos*.
- 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.
- Kim, T.-W., Valdés, J. B., y Aparicio, J. (2002). Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, Mexico. *Water International*, 27(3), 420-430. Descargado de <https://doi.org/10.1080/02508060208687021> doi: 10.1080/02508060208687021
- Martinez-Austria, P., y Irula Lutzow, F. (2016, 09). Tendencias de precipitación y cambio climático en la cuenca del río Conchos, México. *Aqua LAC*, 8, 79-88.
- Mateos, E., Santana, J. S., Montero-Martínez, M. J., Deeb, A., y Grunwaldt, A. (2016). Possible climate change evidence in ten Mexican watersheds. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 91, 10 -19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.08.009>
- McKee, T. B., Doeskin, N. J., y Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proc. 8th Conf. on Applied Climatology*, 179-184.
- McKee, T. B., Doeskin, N. J., y Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple

Time Scales. *Proc. 9th Conf. on Applied Climatology*, 233-236.

- Montero-Martínez M. J. e Ibáñez-Hernández O. F. (2017). *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*. Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Montero-Martínez M. J., Santana-Sepúlveda J. S., Mateos-Farfán E. e Ibáñez-Hernández O. F. (2017). Análisis de precipitación extrema para la cuenca del río Conchos usando el índice normalizado de precipitación. En *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático* (p. 85-108). Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- Montero-Martínez, M. J., Santana-Sepúlveda, J. S., Pérez-Ortiz, N. I., Pita-Díaz, O., y Castillo-Liñan, S. (2018). Comparing climate change indices between a northern (arid) and a southern (humid) basin in Mexico during the last decades. *Adv. Sci. Res.*, 15, 231–237. Descargado de <https://www.adv-sci-res.net/15/231/2018/>
- Moreno-Sánchez, A., y Urbina-Soria, J. (2008). *Impactos sociales del cambio climático en México*. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Descargado de http://centro.paot.mx/documentos/pnud/impactos_sociales_CC.pdf
- OPACE2 y WMO Commission for Climatology. (2017). *Web site of the Task Team on HOMOGENIZATION*. Descargado de <http://www.climatol.eu/tt-hom/index.html>
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Guía del usuario sobre el Índice normalizado de precipitación*. (OMM-Nº 1090) (M. Svoboda, M. Hayes y D. Wood), Ginebra. Descargado de http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_es_2012.pdf
- Ortega-Gaucin, D. (2013, 09). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana*, 31, 167 - 180. Descargado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792013000400167&nrm=iso
- Ortiz, E. (2008). *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI, México).
- Paulhus, J. H. L., y Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129-133.
- Peña, A., y Trujillo, J. O. (2017). ¿Adaptación o sobrevivencia? Percepciones sociales del cambio climático en el municipio de Cusihuirachi, Chihuahua. En *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio*

- climático* (p. 231-258). Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- Peterson, T. C. (2005). Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 54, 3-7.
- Pierce, D. (2017). ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files [Manual de software informático]. Descargado de <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4> (R package version 1.16)
- Pérez-Ortiz, N. (2017). *Análisis de datos e índices de cambio climático en la cuenca del río Usumacinta* (Tesis de licenciatura). Universidad Veracruzana.
- R Core Team. (2018). R: A Language and Environment for Statistical Computing [Manual de software informático]. Vienna, Austria. Descargado de <https://www.R-project.org/>
- Rivas-Acosta, I., y Montero-Martínez, M. J. (2013). Downscaling technique to estimate hydrologic vulnerability to climate change: an application to the Conchos River Basin, Mexico. *Journal of Water and Climate Change*, 4(4), 440-457. Descargado de <http://dx.doi.org/10.2166/wcc.2013.037> doi: 10.2166/wcc.2013.037
- Rivas-Acosta, I., y Montero-Martínez, M. J. (2014, 12). Assessment of Surface Runoff Vulnerability to Climate Change in the Lerma-Chapala Basin, Mexico. , 140, 4201-4213.
- Rodríguez-González, B., y Pineda-Martínez, L. F. (2017). Análisis de la variabilidad de las precipitaciones en la región transfronteriza del centro-norte de México y el sur de los Estados Unidos. En *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático* (p. 59-84). Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.
- Salazar, A., y Masera, O. (2010). *México ante el Cambio Climático*. Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad, A.C.
- Serrano-Barrios, L., Vicente-Serrano, S., Flores, H., Tijerina-Chávez, L., y Vázquez-Soto, D. (2016, 04). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca Pacífico Norte de México (1961-2010). , 42.
- Torres, A., Cavazos, T., y Turrent, C. (2014). Land-sea thermal contrast and intensity of the North American Monsoon under climate change conditions. *Journal of Climate*, 27, 243-250.
- Velasco, I., Aparicio, J., Valdés, J., Velázquez, J., y Kim, T.-W. (2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. , 19(4), 37-53.
- Venema, V. K. C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J. A., Domonkos, P., ... Brandsma, T. (2012). Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past*, 8(1), 89–115. Descargado de

<https://www.clim-past.net/8/89/2012/> doi: 10.5194/cp-8-89-2012

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., y López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. Descargado de <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1> doi: 10.1175/2009JCLI2909

.1

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

Wagner, A. I., y Echeverría-Vaquero, J. (2004). Modelo dinámico para el análisis de escenarios prospectivos en la cuenca del río Conchos. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.

Wheatley, J. (2010). *Visualizing Drought*. Descripción y código disponible en URL: <http://joewheatley.net/visualizing-drought/>.

Wheatley, J. (2013). *20th Century Droughts*. Descripción y código disponible en URL: <http://joewheatley.net/20th-century-droughts/>.

Zhang, X., y Yang, F. (2004). RCLimDex (1.0) User Manual. *Climate Research Branch Environment Canada Downsview*, 1-23. Descargado de etccdi.pacificclimate.org/RCLimDex/RCLimDexUserManual.doc