

IPICYT

**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

Tendencia climática en el centro-norte de México

Tesis que presenta

Josué Arellano Palacios

Para obtener el grado de

Maestro en Geociencias Aplicadas

Directores de tesis

Dr. José Noel Carbajal Pérez

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez

San Luis Potosí, S.L.P., agosto de 2021

Constancia de aprobación de tesis



Constancia de aprobación de la tesis La tesis “**(Tendencia climática en el centro-norte de México)**” presentada para obtener el Grado de Maestro(a) en Geociencias Aplicadas fue elaborada por (**Josué Arellano Palacios**) y aprobada el **día de mes de año** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Dr. José Noel Carbajal Pérez

Director

Dr. Luis Felipe Pineda Martínez

Director

Dr. José Tuxpan Vargas

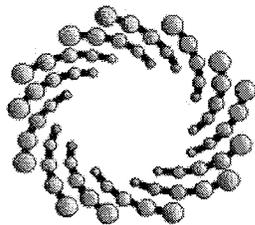
Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada con el apoyo del Centro Nacional de Supercómputo (CNS) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. José Noel Carbajal Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. 1007296) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C



IPICYT

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 073 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 13 días del mes de agosto del año 2021, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dr. José Alfredo Ramos Leal	Presidente	IPICYT
Dr. José Tuxpan Vargas	Secretario	IPICYT
Dr. José Noel Carbajal Pérez	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó el C.

Josué Arellano Palacios

sobre la Tesis intitulada:

Tendencia climática en el centro-norte de México

que se desarrolló bajo la dirección de

Dr. José Noel Carbajal Pérez
Dr. Luis Felipe Pineda Martínez (UAZ)

El Jurado, después de deliberar, determinó

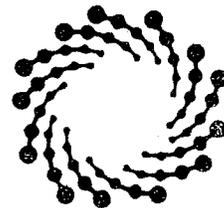
APROBARLO

Dándose por terminado el acto a las 14:20 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 13 días del mes de agosto de 2021.


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado



IPICYT
SECRETARÍA ACADÉMICA
INSTITUTO POTOSINO DE
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y TECNOLÓGICA, A.C.

Dedicatorias

Con mucho amor y cariño:

*A mis padres, quienes en todo momento me han
brindado su apoyo en cada uno de los proyectos que
decido emprender.*

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. y a la División de Geociencias Aplicadas por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A mi director, el Dr. Noel Carbajal por todo el apoyo brindado fuera y dentro del aula, así como las constantes discusiones científicas que me permitieron llevar a cabo este trabajo.

A mi director, el Dr. Felipe Pineda por sus comentarios y correcciones sobre este trabajo, los cuales fueron fundamentales para la conclusión de esta tesis.

A los miembros del comité tutorial, por sus observaciones y comentarios tan acertados sobre este trabajo.

Al Mtro. Hiram Meza, la Lic. Citlali Villa y el Dr. Christian Álvarez por el apoyo brindado con cada uno de los problemas y dudas que surgieron en el transcurso de este trabajo, estoy muy agradecido con ustedes.

A mi familia, por mostrar su apoyo en todo momento fuera y dentro del ámbito académico.

A Diego, gracias por apoyarme fuera y dentro del ámbito académico sin duda el IPICYT me dejó un gran amigo.

A mis amigos de generación de la maestría en Geociencias Aplicadas, gracias por todos los momentos que compartimos juntos, son el mejor grupo de compañeros que he tenido.

Contenido

Constancia de aprobación de tesis	ii
Créditos Institucionales	iii
Dedicatorias	v
Agradecimientos.....	vi
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas	xii
Resumen	xiv
Abstrac	xv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Antecedentes	3
1.2 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Aspectos fundamentales del clima y su dinámica.....	7
1.5.1 Definición de clima.....	7
1.5.2 Efecto invernadero.....	7
1.5.3 Cambio climático natural.....	9
1.5.4 Cambio climático antropogénico	9
1.5.5 Variabilidad climática	10
1.6 Modelos de clima regional.....	10
CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO	12
2.1 Climatología	13
2.2 Uso de suelo y vegetación	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	18
3.1 Modelo WRF	18
3.2 Módulos.....	19
3.2.1 WRF Pre-processing System (WPS).....	19
3.2.2 Advanced Research WRF (ARW)	20
3.3 Parametrizaciones físicas.....	21
3.4 Datos ERA-5	23
3.5 Datos MODIS AQUA + TERRA	24
3.6 Datos USGS GLCC.....	25
3.7 Simulaciones de clima.....	26

3.8	Análisis comparativo y validación	28
3.9	Tendencias.....	30
3.10	Variables meteorológicas y oscilaciones	32
CAPÍTULO 4. RESULTADOS		34
4.1	Análisis comparativo	34
4.2	Anomalías anuales.....	36
4.2.1	Temperatura	36
4.2.1.1	Verano	36
4.2.2	Humedad.....	38
4.2.2.1	Verano	38
4.2.3	Temperatura	41
4.2.3.1	Invierno.....	41
4.2.4	Humedad	43
4.2.4.1	Invierno.....	43
4.3	Correspondencia entre variables meteorológicas - AMO, PDO, ENSO	45
4.3.1	Variables meteorológicas – ENSO	47
4.3.2	Variables meteorológicas – PDO	51
4.3.3	Variables meteorológicas – AMO.....	53
4.4	Anomalías Decadales.....	55
4.5	Tendencias.....	58
4.6	Tendencias estacionales	61
4.7	Series de tiempo	64
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN		70
5.1	Distribución decadal de temperatura y humedad promedio sobre el DCH.....	70
5.2	Tendencias promedio sobre el NDCH y SDCH.....	72
5.3	El ENSO y sus impactos en el Jet Stream.....	74
5.4	Importancia de estudios de eventos extremos sobre el DCH.....	75
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		78
REFERENCIAS.....		81
ANEXOS		87

Lista de figuras

Figura 1. Elaboración propia, muestra el balance de energía, mismo que representa el efecto invernadero. RS , RA , RT , β , γ representan, radiación proveniente del Sol, radiación que emite la atmósfera (GEI), radiación que emite la superficie terrestre, radiación de onda corta y radiación de onda larga, respectivamente.....	9
Figura 2. Tomada de Anderson et al, 2008, ejemplifica la resolución y el nivel de detalle que se obtiene al hacer uso de modelos de clima regional, pasando de 400 a 12 km.	11
Figura 3. Área de estudio con elevación de terreno.....	12
Figura 4. Clasificación de la República Mexicana en regiones climáticas por (Vidal, 2005).....	15
Figura 5. Precipitación media anual sobre México de acuerdo a la SEMARNAT.	16
Figura 6. Cambio de uso de suelo y vegetación para el periodo 1976 – 2009 en México, de acuerdo con INECC, 2010.	17
Figura 7. Muestra las componentes en el WPS y como estas alimentan al ARW, tomada de Skamarock et al., 2019.....	20
Figura 8. Diagrama que muestra de relación directa entre diferentes esquemas de parametrizaciones.	23
Figura 9. Clasificación MODIS Terra+Aqua correspondiente al año 2019 para la zona de estudio. Recuperado de https://search.earthdata.nasa.gov/search/ el 26 de enero de 2021.	25
Figura 10. Clasificación de uso de suelo y vegetación de acuerdo a la USGS – GLCC.	26
Figura 11. Sesgo de temperatura promedio mensual entre WRF y CRU para el periodo 1980-2019.	35
Figura 12. Sesgo de temperatura máxima (a) y mínima (b) promedio mensual para el periodo 1980-2019.	35
Figura 13. Anomalías de temperatura de verano (JJA) regiones en azul corresponden a veranos menos cálidos y regiones en rojo a veranos más cálidos respecto del periodo de referencia.	38
Figura 14. Anomalías de humedad de verano (JJA) regiones en azul corresponden a veranos más húmedos y regiones en café a veranos menos húmedos respecto del periodo de referencia.....	40
Figura 15. Anomalías de temperatura de invierno (DJF) regiones en azul corresponden a invierno menos cálidos y regiones en rojo a inviernos más cálidos, respecto del periodo de referencia.	43

Figura 16. Anomalías de humedad de invierno (DJF) regiones en azul corresponden a inviernos más húmedos y regiones en café a inviernos menos húmedos respecto del periodo de referencia.....	45
Figura 17. Delimitación del Desierto de Chihuahua en su porción norte (NDCH) y sur (SDCH).....	47
Figura 18. Regiones en donde es monitoreado el ENSO, el recuadro en rojo muestra la región 3.4 de El Niño región utilizada para calcular el ONI. Recuperado de: https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one el 3 de abril de 2021.	48
Figura 19. Muestra la fase positiva de la PDO sobre el pacífico norte en donde las anomalías de temperatura de la superficie del mar son negativas océano adentro y positivas en la costa, la fase negativa muestra un comportamiento opuesto. Recuperado de https://www.daculaweather.com/4_pdo_index.php el 20 de abril de 2021.	52
Figura 20. Muestra el patrón típico de una fase positiva de la AMO en donde la región del atlántico norte se encuentra con anomalías positivas de temperatura. Recuperado de https://eos.org/research-spotlights/ocean-dynamics-may-drive-north-atlantic-temperature-anomalies el 20 de abril de 2021.	54
Figura 21. Anomalías decadales de temperatura del periodo 1980 – 2019.	56
Figura 22. Muestra las anomalías de razón de mezcla a nivel decadal para el periodo 1980 – 2019.	57
Figura 23. Muestra las tendencias espaciales en donde: (a) es la temperatura promedio (° C) y (b) la razón de mezcla promedio (g/kg). Los valores corresponden al cambio total para el periodo 1980 – 2019.....	59
Figura 24. Muestra las tendencias espaciales en donde: temperatura máxima (a) y temperatura mínima (b). Los valores corresponden al cambio total de temperatura para el periodo de 1980 – 2019.....	60
Figura 25. Muestra las tendencias espaciales de verano en donde: (a) es la temperatura promedio y (b) la razón de mezcla promedio, en ambos casos se consideraron los meses de JJA.....	62
Figura 26. Muestra las tendencias espaciales de invierno en donde: (a) es la temperatura promedio y (b) la razón de mezcla promedio, en ambos casos se consideraron los meses de DEF.	64
Figura 27. Distribución espacial de los puntos extraídos	65
Figura 28. Muestra la serie de tiempo de temperatura promedio del periodo 1980 – 2019 para el punto extraído correspondiente al Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde.	66
Figura 29. Muestra la serie de tiempo de temperatura promedio del periodo 1980 – 2019 para el punto extraído correspondiente a Ciudad Juárez, Chihuahua.....	66

Figura 30. Muestra el aumento total de temperatura promedio para las ciudades situadas dentro del DCH, en donde: Chihuahua (CH), Cd. Juárez (CJ), Delicias (DL), Durango (DG), Fresnillo (FR), Matehuala (MT), Monclova (MC), Parral (PR), Saltillo (ST), San Luis Potosí (SLP), Torreón (TR) y Zacatecas (ZC).	68
Figura 31. Muestra el aumento total de temperatura promedio para los puntos correspondientes a cultivos o reservas, situados dentro del DCH, en donde: Lincoln National Forest (LNF), Fort Apache Reservation (FAR), Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde (ACV), Colonia Búfalo (CB), La Estanzuela (LE), La Nopalera (LN), Campo Alto (CA), Sierra Madre Occidental (SMO), Sierra Madre Occidental 2 (SMO2), Sierra Madre Occidental 3 (SMO3), Durango-Zacatecas (DG), Durango-Zacatecas 2 (DZ2), Las Tablas (LT), Cultivos al Norte de Jalisco (NJC), Reserva La Biosfera Mapimí (RBM), Colonia el Valle (CV), El Uno (EU), Jagueyes (JG), Noria de Junco (NJ) y Atascaderos (AT).	69
Figura 32. Muestra la distribución de temperatura promedio mensual de cada década para el NDCH.	72
Figura 33. Muestra la distribución de temperatura promedio mensual de cada década para el SDCH.	72
Figura 34. Muestra los patrones típicos observados de la corriente en chorro durante eventos de La Niña (a) y El Niño (b) así como sus impactos sobre la temperatura y humedad. Recuperada de https://www.climate.gov/news-features/featured-images/how-el-ni%C3%B1o-and-la-ni%C3%B1a-affect-winter-jet-stream-and-us-climate el 20 de abril de 2021.....	75
Figura 35. Muestra los cambios totales de temperatura promedio, máxima y mínima para las ciudades situadas en el DCH. Valores marcados con un (*) no son significativos estadísticamente.	77

Lista de tablas

Tabla 1. Características del diseño del dominio.....	27
Tabla 2. Correlación de variables meteorológicas - el ONI, a nivel anual y estacional para ambas regiones del DCH. En donde, razón de mezcla (MR) y temperatura (TEMP) y valores en negritas indican un nivel de significancia estadística $\geq 95\%$.	49
Tabla 3. Correlación entre variables meteorológicas y ambas fases del ENSO. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística \geq al 95 %	50
Tabla 4. Correlación de variables meteorológicas y la PDO, a nivel anual y estacional. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística \geq al 95 %.....	53
Tabla 5. Correlación de variables meteorológicas y la AMO para ambas regiones del DCH, en donde MR (razón de mezcla) y TEMP (temperatura promedio). Valores en negritas representan significancia estadística $\geq 90\%$	54
Tabla 6. Correlación de variables meteorológicas y las oscilaciones AMO y PDO para ambas regiones del DCH. Los valores resaltados en negritas indican correlaciones estadísticamente significativas $\geq 95\%$	58
Tabla 7. Muestra los cambios de temperatura y humedad promedio sobre el DCH a nivel anual y estacional al aplicar la prueba no paramétrica Mann-Kendall y obtener la pendiente de Sen. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística $\geq 95\%$	73
Tabla 8. Muestra los cálculos de error (BIAS y RMSE) con unidades [°C] y la correlación, usando CRU y las simulaciones numéricas. Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.	125
Tabla 9. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.....	126
Tabla 10. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura de verano promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.	127
Tabla 11. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura de invierno promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall, la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.	128
Tabla 12. Muestra los cálculos de error (BIAS y RMSE) con unidades [g/kg] y la correlación, usando NARR y las simulaciones numéricas. Los campos están	

indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.
..... 129

Tabla 13. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para la razón de mezcla promedio para el ciclo anual y estacional, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año ($\text{g kg}^{-1}/ \text{año}$). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón..... 130

Resumen

Los cambios observados en el clima demuestran que el planeta está experimentando variaciones estadísticamente significativas en el estado medio del valor climatológico de cada una de las variables meteorológicas. Es por ello que resulta indispensable estudiar los cambios de estas variables en periodos largos de tiempo mediante el uso de diferentes bases de datos y métodos. Un ejemplo de ello es la implementación de modelos numéricos de clima regional los cuales utilizan salidas de modelos de clima global con el objeto de realizar una reducción de escala dinámica.

Este estudio centra su atención en analizar los cambios observados en el clima en la región del Desierto de Chihuahua (DCH) mediante el uso del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en donde las salidas de temperatura y razón de mezcla del modelo fueron utilizadas para cuantificar las tendencias de estas variables para el periodo de 1980-2019 a nivel anual y estacional. A su vez, se estableció una asociación de las anomalías de temperatura y humedad a oscilaciones climáticas conocidas como El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

Los resultados más relevantes indican que durante el ciclo anual y de verano el DCH experimentó un incremento de humedad en la porción norte (NDCH) y sur (SDCH), mientras que durante el invierno experimentó una disminución en ambas regiones. La temperatura evidenció un incremento en el ciclo anual, de verano e invierno siendo el NDCH la región de mayor calentamiento. Finalmente, las oscilaciones mostraron teleconexiones teniendo que El Niño (La Niña) genera inviernos más fríos (cálidos) en el SDCH; la AMO y temperatura muestran una relación directa sobre el DCH a nivel decadal y; la AMO (PDO) indican una relación directa (inversa) con la humedad sobre el SDCH.

Abstrac

The observed changes in the climate show that the planet is experiencing statistically significant variations in the mean state of the climatological value of each of the meteorological variables. That is why it is essential to study the changes in these variables over long periods of time by using different databases and methods. An example of this is the implementation of numerical regional climate models which use outputs from global climate models in order to perform a dynamic scale reduction.

This study focuses its attention on studying the observed changes in the climate in the Chihuahuan Desert region (DCH) through the use of the Weather Research and Forecasting (WRF) model, where the temperature and mixing ratio outputs of the model were used to quantify the trends of these variables for the period 1980-2019 at an annual and seasonal level. In turn, an association of temperature and humidity anomalies was established with climatic oscillations known as El Niño and the Southern Oscillation (ENSO), the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

The most relevant results suggest that during the annual and summer cycle the DCH experienced an increase in humidity in the northern (NDCH) and southern (SDCH) portions, while during the winter it experienced a decrease in both regions. The temperature showed an increase in the annual, summer and winter cycle, being the NDCH the region with the greatest warming. Finally, the oscillations showed teleconnections with El Niño (La Niña) generating colder (warmer) winters in the SDCH; AMO and temperature show a direct relationship on DCH at the decadal level and; the AMO (PDO) indicate a direct (inverse) relationship with humidity on the SDCH.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los cambios observados en el clima desde comienzos de la revolución industrial en 1950 han aumentado debido a las concentraciones químicas de los gases de efecto invernadero (GEI) como lo son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), entre otros. El primero de ellos es considerado el más peligroso debido a su tiempo de residencia en la atmósfera. El aumento de éstos intensifica el efecto de calentamiento del planeta debido al efecto invernadero (EI) de la Tierra (Hartman, 2016).

El constante aumento de los GEI ha causado que el sistema climático se caliente como lo son los océanos y la atmósfera, generando la reducción de cubiertas de hielo y nieve, que a su vez resulta en un aumento en el nivel del mar (IPCC, 2014). Además, se ha encontrado que los desiertos se están expandiendo (Thomas N., Nigam S., 2017) y que la temperatura y las ondas de calor están en aumento en el noroeste de México (Martínez-Austria et al., 2015), así como la frecuencia de eventos extremos (Quintero et al., 2012).

Como resultados de estos cambios, las sequías han ido en aumento en el norte del país como lo señala (García, 2000), causando escasez de alimentos, baja disponibilidad de agua y muerte de ganado (Endfield, G., y Fernández, I., 2006). Lo cual resalta la importancia del modelado del clima en donde las evaluaciones de clima regional en México y otros países, puedan contribuir a la creación de políticas y acuerdos en donde se reduzcan las emisiones de GEI (Liverman & O'Brien, 1991) como los acuerdos de París.

El modelado del clima (pasado y futuro) resulta entonces, importante para crear medidas de adaptación y/o mitigación para hacer frente al cambio climático y a las tendencias que se han venido presentado, sobre todo en las regiones más vulnerables (INECC, 2018). Consecuentemente, los estudios regionales son importantes ya que los globales no cuentan con la resolución espacial adecuada que pueda identificar claramente detalles sobre la costa, montañas, vegetación, y

así, de acuerdo con los resultados obtenidos aplicar las medidas adecuadas (Gramelsberger, G., y Feichter, J., 2011).

Las salidas numéricas de los modelos por sí solas no deben de ser tomadas como la verdad absoluta, ya que es importante realizar un análisis comparativo entre diversas fuentes de datos y modelos de clima regional. Esto con la finalidad de entender si las tendencias de las variables meteorológicas están de acuerdo en la magnitud del cambio y en si existe o no una tendencia. Esto representa un mayor nivel de confianza sobre las regiones o puntos en los que existe una tendencia climática a fin de darles seguimiento mediante el uso de escenarios de cambio climático. Es posible identificar los problemas presentes y tener una noción de los futuros ayudando a gestionar el riesgo. Esto implica crear planes para disminuir riesgos mediante una administración correcta del agua, crear medidas de seguridad alimentaria aplicando métodos para proteger cultivos y hacer frente a los eventos extremos a través de un buen manejo del uso de suelo, demanda de energía para satisfacer las necesidades de confort, entre otros aspectos relevantes.

1.1 Planteamiento del problema

El aumento en la tendencia y frecuencia de eventos extremos causado por los humanos desde 1950 ha tenido efectos importantes. El IPCC, 2014, con una confianza del 95% menciona que la actividad humana es la responsable del calentamiento global, la cual conlleva al aumento de temperaturas, disminución de precipitación, problemas de seguridad alimentaria, escasez de agua potable, desertificación entre otros problemas.

Por lo tanto, es fundamental realizar estudios de clima regional para conocer las tendencias de variables meteorológicas y los efectos que han tenido y tendrán en el Desierto de Chihuahua (DCH), México. De esto modo será posible establecer políticas y soluciones a los problemas que puedan surgir o bien realizar medidas de mitigación y/o adaptación al cambio climático, gestionando de manera eficiente los recursos que puedan ser afectados en términos de disponibilidad.

1.2 Antecedentes

La Tierra está experimentando un calentamiento global, con la temperatura promedio del planeta es más alta, por lo que el calentamiento global es un hecho inequívoco. El calentamiento global se debe principalmente a actividades antropogénicas que contribuyen a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo). Se sabe que entre mayor cantidad de GEI se emitan a la atmósfera, mayor será el calentamiento (Farmer, G. T., & Cook, J., 2013).

Tejeda et al, 2008, indican que de acuerdo con los escenarios de cambio climático, la temperatura y humedad relativa en las zonas 2 (semiárida) y 3 (árida) referidas por (Garcia, E., 1988) habría aumentado la temperatura de 1° a 2° C para el 2030, y la humedad relativa habría disminuido entre un 5% a 9% tanto en enero como en julio, meses representativos de la estación de invierno y verano, respectivamente.

Por su parte, Pavía, et al, 2008, a partir de estaciones meteorológicas obtuvo tendencias lineales de la temperatura promedio anual y estacional, así como la significancia estadística de las mismas para los periodos de 1940-1969 y 1970-2004, reportando que para el periodo reciente el país ha experimentado una tendencia positiva (calentamiento), principalmente en el noroeste y centro del país. Mientras, que los estados de Zacatecas y Durango están experimentando tendencias negativas. Además, demostraron que las fases del fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés, no tienen influencia directa en las tendencias encontradas, pero sí lo están con los enfriamientos y calentamientos de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). En las estaciones ubicadas dentro del DCH se obtiene que en la porción norte las tendencias son de aumento, mientras que en la porción sur que comprende parte de los estados de Durango y Zacatecas se encontraron varias estaciones con tendencias negativas. Finalmente, a nivel estacional sobre el DCH se encontró que la temperatura máxima en invierno ha disminuido y que la de verano ha aumentado,

mientras que la mínima en invierno de manera general ha aumentado y en verano ha disminuido.

Méndez et al, 2009, estudiaron la variabilidad de la precipitación y temperatura en México y su relación con la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés) para el periodo 1950-2007 utilizando alrededor de 500 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país. Ellos reportan que la fase positiva de la PDO da lugar a mayor lluvia durante el invierno y a menor durante el verano. Mientras que para la temperatura sólo existe una relación con la temperatura máxima que se encuentra en fase con la PDO durante el verano y fuera de fase durante el invierno.

Brito-Castillo, et al, 2009, reportan que el calentamiento, resultado del incremento de GEI, ha tenido impactos en la reducción del rango de temperatura diurna en el norte del estado de Zacatecas, México, como consecuencia del rápido incremento en la temperatura mínima. Mientras que, en el sur del estado, el rango de temperatura diurna está aumentando debido al aumento de las temperaturas máximas y disminución de las mínimas.

Karmalkar et al, 2011, realizaron proyecciones de cambio climático para temperatura máxima y mínima sobre México y Centroamérica. Ellos encontraron que en la región las temperaturas estarían aumentando para el 2070-20100 tanto para la estación cálida como para la fría con un rango de 1.4° a 6.5° C y 1.7° a 5.2° C, respectivamente. Sin embargo, no indican cuál es la significancia estadística de estos aumentos de temperatura.

Magaña, 2012, señala que con la herramienta Climate Predictability Tool (CPT, por sus siglas en inglés) es posible aumentar la resolución espacial de los escenarios de Cambio Climático del IPCC para las variables temperatura y precipitación y realizar estudios de cambio climático a una escala regional reduciendo errores sistemáticos producto de diferentes fenómenos y procesos físicos que no pueden ser modelados en modelos globales. Encontraron que es muy probable que el noroeste de México experimente grandes incrementos en la temperatura y disminución de precipitación en comparación con el resto del país. Lo anterior daría

lugar a sequías prolongadas lo que se traduciría en un problema sobre la disponibilidad del agua como lo sugieren las proyecciones para el periodo 2020-2030, afectando principalmente a Baja California, Chihuahua y Sonora.

Cavazos et al, 2019, realizaron una intercomparación de diferentes modelos de clima regional en los que seleccionaron dos áreas de estudio: la región del monzón y la de sequía de medio verano. La primera, cubre parte del desierto de Chihuahua en donde al analizar las tendencias de temperatura encontraron que esta ha aumentado en las últimas décadas presentando niveles de significancia estadística mayores al 95%. Por su parte, reportan una relación inversa entre la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) y la precipitación.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su quinto informe menciona que, para diferentes horizontes de tiempo (2030, 2045, 2079, 2100) las tendencias globales de variables meteorológicas presentarán cambios a nivel mundial, es decir, lugares en donde la temperatura es alta, lo será aún más, regiones frías tenderán a ser más frías (aunque existen excepciones como el Ártico que se encuentra bajo una tendencia de disminución de áreas cubiertas de hielo). Mientras, que la precipitación tenderá a disminuir en algunas regiones y serán más áridas aunado con el efecto del aumento de la temperatura (IPCC, 2014).

1.2 Justificación

La relevancia de esta investigación se debe al problema que actualmente enfrenta la humanidad, así como las especies animales y vegetales, ya que el cambio climático se ha visto acelerado debido al aumento de GEI en la atmósfera. Esto ha generado mayor calentamiento en la troposfera, que es en donde tiene lugar la meteorología relacionada con la vida, generando el aumento de días cálidos, la disminución o aumento de la humedad, que en conjunto generan sequías prolongadas o inundaciones extremas, lo cual trae problemas económicos, de seguridad alimentaria y salud.

El clima del DCH se caracteriza en gran medida por ser árido y semiárido (García, E., 1988) debido a su posición geográfica (cercanía con el trópico de cáncer), a la orografía y a los múltiples fenómenos meteorológicos, lo cual provoca que la

humedad no sea tan abundante como en la porción sur del país. Uno de los problemas a enfrentar sería la falta del recurso hídrico y cómo este puede verse afectado si esta región del país se encuentra en una tendencia de aumento de temperatura y/o disminución de humedad. Además, el aumento de temperatura sobre esta región también tendría efectos negativos, por ejemplo; la disminución de vida vegetal, tal como lo reporta de manera experimental (Pérez, F., 2021) en la porción sur del DCH.

Actualmente, es posible hacer uso de modelos de clima regional que permiten realizar estudios en mesoescala, es decir, pasar de una escala global a una con alta resolución espacial. Esto da un mejor nivel de confianza para poder modelar el clima pasado y hacer proyecciones futuras para conocer en qué medida los valores de las variables meteorológicas están cambiando. Esto permite conocer los impactos que tendrían para la sociedad, considerando la posibilidad de crear medidas de mitigación que ayuden a tener una mejor gestión de recursos.

1.4 Objetivos

General:

- Analizar las tendencias de variables meteorológicas en el periodo de 1980-2019 en el centro-norte de México con especial atención en la región del Desierto de Chihuahua.

Específicos:

- Identificar regiones con tendencias de aumento o disminución de humedad, y de enfriamiento o calentamiento, para la temperatura.
- Asociar diferentes patrones de la distribución espacial de las variables meteorológicas a oscilaciones conocidas, las cuales pudieran estar modulando el clima sobre el DCH.

1.5 Aspectos fundamentales del clima y su dinámica

1.5.1 Definición de clima

Puede ser definido como la síntesis del tiempo meteorológico de un lugar determinado, definido por métrica como la media y la variabilidad de las variables meteorológicas como la temperatura, precipitación, viento, humedad y otras variables termodinámicas y dinámicas, en un periodo recomendado de 30 años. Además, el clima también está definido por la latitud, altitud, acercamiento a cuerpos de agua y el relieve (Hartmann,2016). Con esto, se entiende que el clima es dinámico y que por lo tanto es posible hablar de un cambio climático, el cual puede ser definido de la siguiente manera:

- Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) el cambio climático se puede definir como variaciones estadísticamente significativas en el estado medio del clima para un periodo extenso, típicamente de décadas o más.
- Por su parte, la Convención del Grupo de Trabajo en Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como un cambio del clima el cual es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global en adición a la variabilidad climática natural observada sobre periodos de tiempo comparables.

1.5.2 Efecto invernadero

La atmósfera terrestre está compuesta de diversos gases que permiten la vida en la Tierra, entre ellos se encuentran los que conforman una mayor fracción como el nitrógeno, argón, hidrogeno y oxígeno, entre otros con menor concentración. Dentro de estos gases existen algunos que son clasificados como gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas en inglés) como lo son vapor de agua, dióxido de carbono, metano, ozono y clorofluorocarburos (Ahrens, D., & Henson, R., 2021).

Para entender cómo funciona el efecto invernadero nos referimos a la figura 1, en donde (R_S) es la radiación proveniente del Sol, fuente de energía de la Tierra que

se encuentra emitiendo radiación constantemente en forma de onda corta (β), la cual viaja a través de la atmósfera en forma de radiación (gama, ultravioleta, infrarroja y luz visible). La radiación ultravioleta es en su mayoría absorbida por el ozono situado en la estratosfera, mientras que una fracción (R_S) de la radiación proveniente del sol atraviesa la atmósfera como si esta fuera transparente hasta incidir en la superficie provocando un calentamiento (Farmer, G. T., & Cook, J., 2013). Posteriormente, la superficie terrestre al contar con albedo emite energía de regreso hacia el espacio (R_T) en forma de radiación infrarroja que es de onda larga (γ). Esto puede ser explicado como sigue: esta radiación en su intento de escape se encuentra nuevamente con la atmósfera (R_A) que no le permite escapar completamente, pues los gases de efecto invernadero atrapan parte de esta radiación y hacen que esta sea reemitida hacia la superficie generando mayor calentamiento en la parte baja de la atmósfera produciendo el calentamiento necesario para el desarrollo de la vida como la conocemos a una temperatura promedio global de 15 °C (Smirnov, B., 2020). En la Figura 1, si todo el sistema está en equilibrio, entonces la condiciones en la parte superior no cambian y por tanto $R_S + R_a + \gamma R_T = 0$ y además $\beta R_S + R_a - R_T = 0$. Al disminuir γ , por la presencia de gases de efecto invernadero, menos radiación escapa al espacio produciendo un calentamiento.

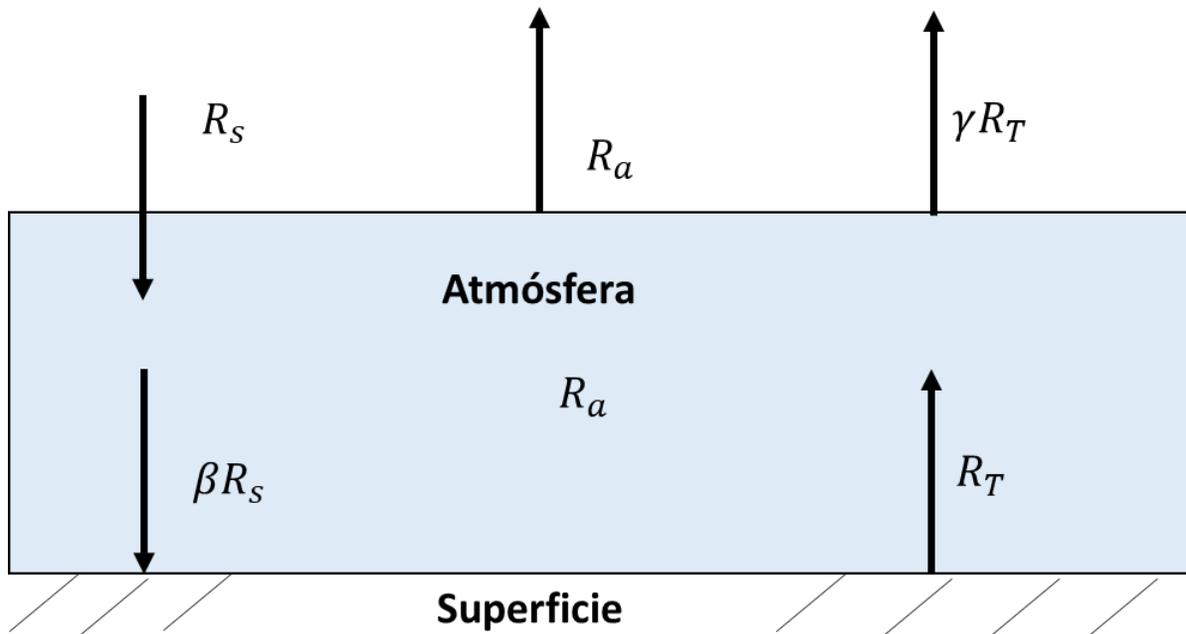


Figura 1. Elaboración propia, muestra el balance de energía, mismo que representa el efecto invernadero. R_S , R_A , R_T , β , y γ representan, radiación proveniente del Sol, radiación que emite la atmósfera (GEI), radiación que emite la superficie terrestre, radiación de onda corta y radiación de onda larga, respectivamente.

1.5.3 Cambio climático natural

Este cambio es el que, como su nombre lo dice, ha existido de manera natural producto de cambios en la configuración astronómica del planeta y los movimientos de las derivas continentales que están en constante desplazamiento causando cambios en la circulación oceánica y atmosférica. Por su parte, se debe tener en cuenta que este cambio es consecuencia de variaciones internas y externas. Las primeras, se conforman por cambios en la atmósfera, océano y superficie terrestre; las segundas, son aquellos cambios extraterrestres como las variaciones de luminosidad solar, de la órbita terrestre y, de las erupciones volcánicas que también entran aquí.

1.5.4 Cambio climático antropogénico

Este cambio, como su nombre lo indica, es el que ha surgido por las actividades humanas las cuales han generado un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo cual ha tenido como consecuencia un calentamiento troposférico, reteniendo mayores cantidades de energía en el océano

y atmosfera, las cuales, son liberadas en forma de fenómenos meteorológicos cada vez más extremos. Con el calentamiento, se tienen temperaturas superficiales más altas y mayor evaporación, que resulta en fuertes lluvias en algún punto del globo que a su vez generan grandes inundaciones. Además, es un hecho irrefutable que el cambio climático antropogénico existe, pues desde el inicio de la revolución industrial a la fecha, la concentración de CO₂ en la atmósfera pasó a poco más de 400 ppm, cuando la concentración se mantuvo casi constante en 278 ppm durante miles de años hasta antes del inicio de la revolución industrial.

1.5.5 Variabilidad climática

Debido a que el planeta en latitudes bajas es más caliente que en latitudes altas, se genera un gradiente térmico que hace que la energía sea transportada por advección hacia los polos a través de medios de transporte que pueden ser, sistemas climáticos oscilatorios o corrientes atmosféricas y oceánicas. Las oscilaciones impactan de manera positiva o negativa, un ejemplo de ello es el ENSO, el cual, durante su fase fría (La Niña) o caliente (El Niño) pueden generar años con inviernos más fríos en algún punto del planeta, mientras que en otros puede tener impacto en forma de fuertes sequías.

1.6 Modelos de clima regional

Los modelos globales de clima (MGC) proporcionan información valiosa para estudios de clima, sin embargo, dada su baja resolución espacial no es posible realizar una planeación adecuada para que regiones vulnerables mitiguen o se adapten al cambio climático (IPCC, 2013). Es aquí en donde entra un aumento en la resolución de escala de clima regional (método conocido como *downscaling*) a través de los MCR (ver figura 2), la cual se puede realizar bajo un enfoque dinámico o estadístico, brindando una proyección y representación más detallada sobre los cambios del clima en una región en particular, así como de los eventos extremos (sequías, inundaciones, etc). El estadístico consta de modelación estadística lineal o no lineal a partir de datos climáticos, fisiográficos y de pronósticos de los MGC, una de sus ventajas es que requiere menor trabajo computacional, pero no incluye las retroalimentaciones del sistema climático. Por su parte, el dinámico hace uso de

las salidas de los MGC como condiciones iniciales, pasando de resoluciones espaciales de 200 km a 50 km e incluso a 10 km, una de sus ventajas es que captura mejor los eventos extremos y su varianza. En ambos métodos, la habilidad del modelo se ve afectada por las estaciones del año (Warmer, 2011).

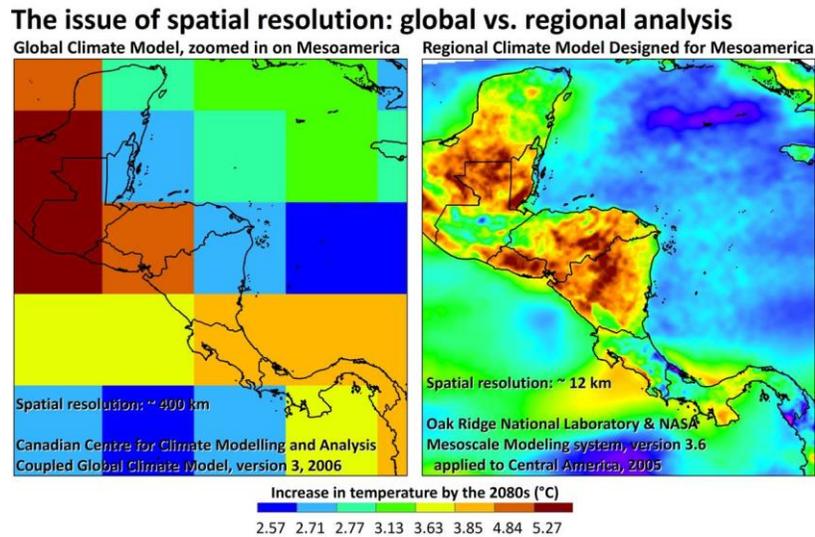


Figura 2. Tomada de Anderson et al, 2008, ejemplifica la resolución y el nivel de detalle que se obtiene al hacer uso de modelos de clima regional, pasando de 400 a 12 km.

CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO

La figura 3, corresponde al área de estudio en donde se encuentra el Desierto de Chihuahua (DCH), situado en la porción centro-norte del país misma que se caracteriza por ser una región árida con escasas precipitaciones en el ciclo anual, altas temperaturas en el verano y bajas en el invierno. E dominio establecido para las simulaciones numéricas se encuentra delimitado por las longitudes 96° – 111° W y las latitudes 21° - 34° .

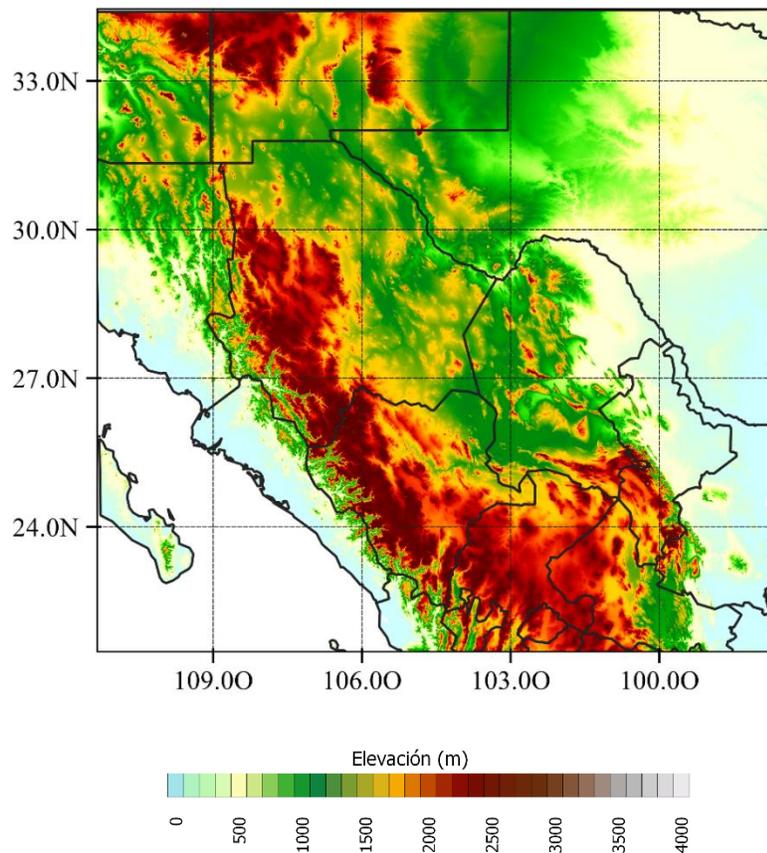


Figura 3. Área de estudio con elevación de terreno.

2.1 Climatología

El clima del DCH a lo largo de toda su extensión es variable ya que en el ciclo anual se ve influenciado por fenómenos meteorológicos tropicales y extratropicales (Magaña et al, 1999). La topografía juega un rol importante, pues el centro-norte del país se encuentra en la región conocida como el Altiplano Mexicano que cuenta con una elevación promedio de 2000 msnm disminuyendo hasta los 1000 msnm hacia el norte del país. Dicho Altiplano está rodeado por un sistema de montañas: la Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental y el Eje Volcánico Transversal (Domínguez, O., y Pérez, G., 2009). Estas actúan como barreras que impiden el ingreso de humedad causando que la zona sea árida.

Durante el invierno se tienen los mínimos de temperatura, principalmente en el norte del país y en regiones montañosas de ambas Sierras Madres debido a las intrusiones de masas de aire frío (Magaña, V., et al, 1999.2). Durante el verano es común que en esa misma región se presenten altas temperaturas, sobre todo en las zonas semiáridas, en donde las temperaturas pueden alcanzar 40° C o más (Contreras, C., 2005; Magaña, V., et al., 1999).

En el caso de la precipitación, se tiene que durante el invierno pueden ocurrir debido al paso de frentes fríos en los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, así como en regiones Nuevo León y Tamaulipas. Por su parte, el Monzón de América del Norte aporta hasta el 50 % de precipitación anual en regiones de los estados del oeste (Sinaloa, Sonora, Durango y Chihuahua) según reportan (Adams & Comrie, 1997) durante los meses de julio, agosto y septiembre (Douglas, M., et al, 1993). Mientras que, el centro recibe sus mayores precipitaciones en los meses de verano debido a la influencia de fenómenos tropicales (Magaña et al, 1999).

También Magaña, et al., 1999, reporta que el clima puede ser estudiado desde un punto de vista de la interacción océano-atmósfera-continente, es por ello que él mismo realizó un estudio para conocer cómo el ENSO afecta las temperaturas y los regímenes de precipitación durante estados de El Niño y La Niña. En dicho estudio se encontró que durante un evento de El Niño las precipitaciones invernales son por

arriba de lo normal (climatología) en el norte y centro del país, debido a la frecuente intrusión de frentes fríos. En contraste, durante eventos de La Niña las precipitaciones invernales son por debajo de lo normal en la misma región del país. En el caso de la temperatura, se tiene que, durante inviernos de El Niño, éstas se encuentran por debajo de lo normal en el centro-norte del país. Por su parte, durante eventos de La Niña las temperaturas en el invierno son por arriba de lo normal en la misma región del país a excepción de Sonora.

Para el verano, durante eventos de El Niño las lluvias en el centro-norte del país se encuentran dentro de lo normal o ligeramente por debajo de lo normal. Para el caso de La Niña también se tienen condiciones cercanas a lo normal, sin embargo, Sinaloa y Chihuahua parecen presentar lluvias por debajo de lo normal, mientras que el resto de la región se encuentra ligeramente por arriba de lo normal. En relación a la temperatura, las anomalías durante eventos de El Niño son por debajo de lo normal en el noroeste del país, mientras que para el resto de la región centro-norte son ligeramente por arriba de lo normal. Finalmente, para eventos de La Niña las anomalías de temperatura son positivas llegando a estar dentro de lo normal para la misma región.

Vidal, (2005) regionalizó la República Mexicana en 11 regiones climáticas, en donde cada una de ellas fue clasificada e identificada en función de los fenómenos meteorológicos dominantes, régimen de precipitación y distribución anual de temperatura (ver figura 4). Es necesario mencionar que México en su mayor parte tiene un “clima monzónico” esto quiere decir que existen dos estaciones marcadas una cálida y húmeda (verano) y otra fría y seca (invierno) mientras que el otoño y primavera son consideradas como estaciones de transición. Por lo tanto, durante el invierno la región 4 (que comprende en su mayoría el desierto de Chihuahua) se encuentra dentro de la faja subtropical de alta presión en donde tienen lugar los anticiclones de los océanos Pacífico y Atlántico (Granados et al, 2012). Durante la época invernal se presentan fluctuaciones de temperatura y precipitación lo cual se debe a que los vientos alisios que convergen en la Zona Intertropical de Convergencia (ZIC) se desplazan hacia latitudes menores y a su vez, las zonas de

alta presión ya mencionas también se desplazan hacia el sur rompiendo el bloqueo de las masas de aire frío permitiendo que estas incursionen dentro de esta región generando algunas precipitaciones, ambiente frío y recurrentes heladas.



Figura 4. Clasificación de la República Mexicana en regiones climáticas por (Vidal, 2005).

Por otra parte, durante el verano (mayo a octubre) la ZITC y las altas presiones se desplazan hacia latitudes mayores generando que las altas presiones bloqueen el ingreso de masas de aire frío y que por lo tanto esto genere mayor calentamiento. Además, en esta época del año (julio-septiembre) se originan las mayores precipitaciones producidas por el Monzón de Norteamérica mismo que en la región de Sonora y Chihuahua llega a proporcionar más del 60 % de precipitación anual (Douglas., A, et al. 1993) de los 100 a 700 mm que llueven en la región de acuerdo con SEMARNAT (Fig. 5). 1

1 http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_PMedia.html. Consultado por última vez el 7 de febrero de 2021.

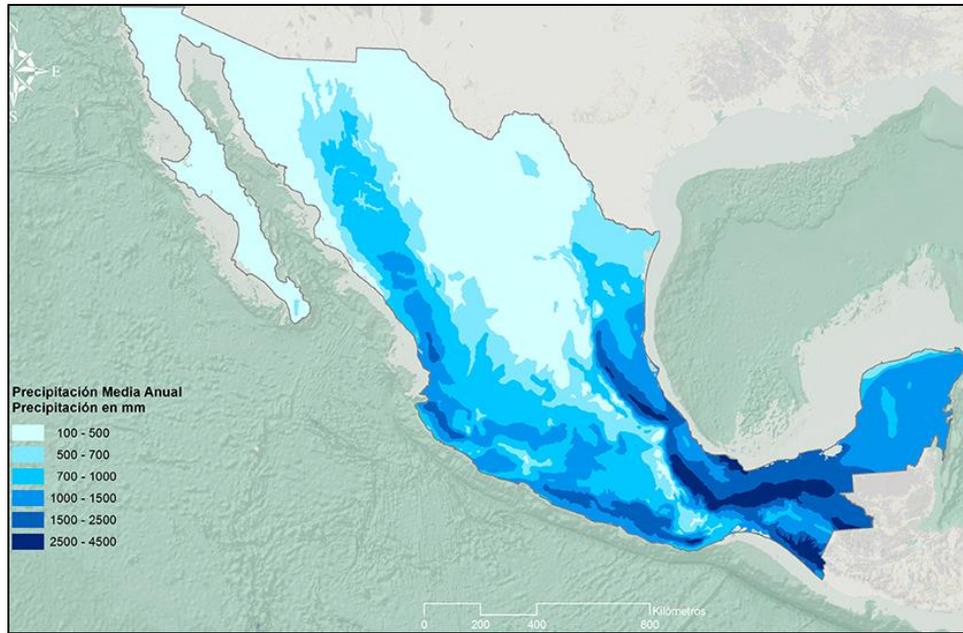


Figura 5. Precipitación media anual sobre México de acuerdo a la SEMARNAT.

Por su parte, la temperatura promedio anual sobre el DCH oscila entre los 12° y 22° C y de 6° y 12° C en las zonas más altas especialmente en las inmediaciones de la Sierra Madre Occidental. Por lo que, de acuerdo con la SEMARNAT el clima de esta región es clasificado como árido y semiárido.²

2.2 Uso de suelo y vegetación

El Desierto de Chihuahua (DCH) tiene una extensión entre 507, 000 km² (Granados et al, 2011) y 630, 000 km² (World Wildlife Fund) siendo el desierto de mayor extensión en Norteamérica y que cuenta con la mayor cantidad de especies del mundo. Entre las especies vegetales cuenta con matorral desértico micrófilo, matorral desértico crassicaule, matorral desértico rosetófilo, chaparrales, nopaleras, vegetación de dunas, vegetación halófito, encinares, bosques de pino piñonero, pastizales, entre otras (Rzedowski, 1978). Los pastizales o zacatales cubren casi en su totalidad las zonas planas en donde existe mayor humedad y menor temperatura, estimando que ocupan alrededor del 9 % de la superficie total del DCH.

² http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html. Consultado por última vez el 7 de febrero de 2021.

Por su parte, los pastizales de navajita se desarrollan entre los 1300 y 1900 msnm cubriendo una superficie aproximada de 5 % del total (Granados. D., et al, 2011). Mientras que, de acuerdo con (INEGI, 2010) el DCH se compone por cuatro principales tipos de vegetación: pastizal halófilo, pastizal natural, matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo.

El DCH a pesar de ser una zona árida con bajo régimen de precipitación ha sido adaptado a campos de cultivo en donde los pastizales se han convertido en áreas agrícolas como se puede observar en la figura 6, que muestra los procesos de cambio de uso de suelo y vegetación del periodo 1976-2009 de acuerdo con (INECC, 2010). Pues, de acuerdo a las imágenes de satélite de 2006 a 2011 más de 69,000 ha en la zona de Valles Centrales, Chihuahua fueron convertidas en campos de cultivo (Pool, D., et al, 2014).



Figura 6. Cambio de uso de suelo y vegetación para el periodo 1976 – 2009 en México, de acuerdo con INECC, 2010.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Modelo WRF

El Weather Research and Forecasting (WRF) es un Sistema de modelado atmosférico ampliamente usado por la comunidad científica para realizar investigación y predicciones numéricas del tiempo. Este modelo inició su desarrollo en la mitad de los noventas con la finalidad de crear un modelo capaz de efectuar predicción numérica del tiempo. Hasta la fecha, este ha pasado por actualizaciones que tratan de representar mejor los procesos físicos en la atmósfera, teniendo en la actualidad la versión 4 y sus actualizaciones, en este trabajo se hace uso de la versión 4.1.1. El WRF fue desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (a través del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y NOAA Earth System Research Laboratory (ESRL)), the United States Air Force, the Naval Research Laboratory y, la University of Oklahoma, and the Federal Aviation Administration.

Este modelo cuenta con dos módulos, el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) y el Advanced Research WRF (ARW). El primero es soportado por NCEP y se utiliza para estudios de Mesoescala que pueden ir de metros a kilómetros en la horizontal. El segundo, que es el empleado en este trabajo, es la componente del modelo en la cual se realiza la integración numérica del dominio madre y los dominios anidados. El núcleo ARW del WRF en su versión 4 cuenta con las siguientes características:

- Es de tipo no-hidrostático.
- Coordenada vertical híbrida sigma-presión que sigue el terreno, con superficies de presión constantes en el tope del modelo.
- Malla horizontal escalonada tipo Arakawa C.

- El tiempo de integración se hace bajo el esquema Runge-Kutta de segundo y tercer orden con pequeños pasos de tiempo para ondas acústicas y de gravedad.
- Las condiciones iniciales pueden ser tridimensionales para datos reales y, bi- y tridimensionales para datos idealizados.
- Microfísica, cuenta con esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos que incorporan explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.
- Física de la superficie, cuenta con modelos multicapas de superficie terrestre variando de un simple modelo termal a modelos con vegetación y humedad del suelo, incluyendo cobertura de hielo y nieve.
- Física de la radiación atmosférica, esquemas de onda corta y larga con múltiples bandas espectrales y un esquema simple de onda corta adecuado para aplicaciones climáticas y meteorológicas, incluyendo efectos de nubes y flujos superficiales.
- Capa límite planetaria, cuenta con un esquema de energía cinética turbulenta y esquemas no locales.

3.2 Módulos

El funcionamiento del WRF se compone por cinco submódulos divididos en dos módulos principales (véase figura 7):

3.2.1 WRF Pre-processing System (WPS)

En este, se introducen los datos de terreno y meteorológicos para ser pre-procesados en los siguientes tres módulos (véase figura 7):

Geogrib.exe: este es el primer paso a considerar, aquí se definen el (los) dominio (dominios) de interés con las especificaciones de tipo de proyección, ubicación (latitud y longitud), número de puntos de malla, dominios anidados y resolución. Así

como los datos terrestres, es decir, uso de suelo y vegetación, cuerpos de agua, topografía, etc.

Ungrib.exe: este submódulo decodifica (descomprime) los datos meteorológicos de entrada de superficie y niveles de presión, típicamente en formato GRIB, para que puedan ser leídos a un formato aceptado por el WRF.

Metgrib.exe: como última parte del preprocesamiento, este submódulo se encarga de interpolar los datos meteorológicos al dominio del modelo, combinando la información pre-procesada en los dos módulos previos.

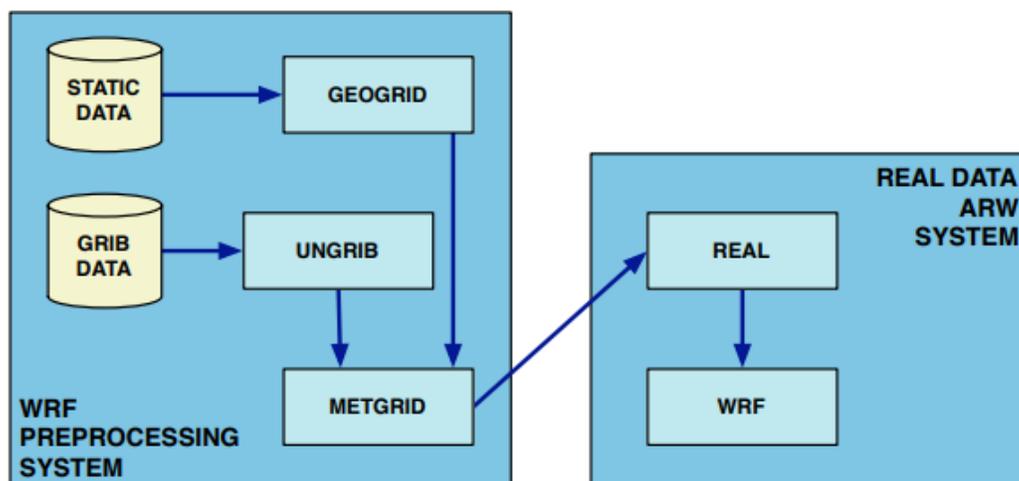


Figura 7. Muestra las componentes en el WPS y como estas alimentan al ARW, tomada de Skamarock et al., 2019.

3.2.2 Advanced Research WRF (ARW)

Por último, se tiene el módulo ARW que es uno de los dos núcleos que contiene el WRF, incluye la advección, gradiente de presión, Coriolis, difusión, etc. Es completamente compresible, cuenta con una coordenada vertical híbrida sigma-presión que sigue el terreno basada en presión hidrostática seca y en la parte superior del modelo se tiene una superficie de presión constante. Así, este módulo se compone por los siguientes dos submódulos:

Real.exe: este es utilizado para casos reales, aquí se crean los archivos con las condiciones iniciales y límites para casos reales mediante interpolación vertical a coordenadas eta (η), haciendo uso de los datos previamente preprocesados en el módulo WPS.

Wrf.exe: aquí es donde se da inicio a la integración numérica del modelo usando las condiciones límite creadas en el real.exe. Para realizar la integración numérica es necesario establecer parámetros adecuados a las necesidades del estudio, como lo son el paso del tiempo y parametrizaciones físicas.

3.3 Parametrizaciones físicas

Existen diversos fenómenos de pequeña escala o poco comprendidos que no pueden ser resueltos explícitamente debido a que computacionalmente existe una barrera que hace imposible resolver estos de manera satisfactoria, pues, la capacidad computacional se encuentra limitada ya que estas tienen una capacidad finita puesto que trabajan en forma binaria. Por lo tanto, encontramos que las ecuaciones de movimiento de la atmósfera son ecuaciones diferenciales parciales no lineales que describen procesos de forma continua en el espacio-tiempo. Para acercarse a un proceso real de mesoescala, se requeriría muy alta resolución, pero resulta imposible resolver fenómenos en forma tridimensional en mallas de centímetros o unas decenas de metros. De modo que, esos procesos físicos son descritos bajo esquemas de parametrizaciones, es decir, un enfoque algorítmico o estadístico que hacen uso de otras variables para poder representar efectos como cobertura de nubes, radiación de onda corta y larga, convección, transferencia de agua en el sistema suelo-plantas-atmósfera, turbulencia, difusión, entre otros.

Como parte de la integración numérica de las simulaciones es necesario seleccionar parametrizaciones físicas adecuadas al tipo de estudio y región que será simulada, dichas parametrizaciones están directamente relacionadas para obtener los flujos de calor y humedad en superficie (ver figura 8), mismas que son descritas a continuación:

Transferencia de radiación: la radiación es la propagación de energía en ondas electromagnéticas de onda corta (OC) y onda larga (OL) lo cual es fundamental en la atmósfera ya que es la fuente de energía que al incidir en una esfera (Tierra) crea calentamientos diferenciales generando gradientes y, por ende, circulación oceánica y atmosférica que se encargan de equilibrar el sistema climático llevando calor o frío a zonas con déficit.

Capa límite planetaria (CLP): esta es la capa más baja de la tropósfera cubriendo desde la superficie hasta aproximadamente los primeros 3 km de altura misma que se caracteriza por ser una zona de fricción y de mezcla turbulenta. Su principal función es transportar energía, momento, calor y humedad. Además, tiene un rol importante en la mezcla y dispersión de contaminantes. Este esquema de parametrización al ser activado realiza el cálculo de la difusión vertical en lugar de ser calculado por el esquema de difusión.

Cumulus: esta parametrización permite representar la lluvia convectiva y resuelve corrientes ascendentes y descendentes y, perfiles de tendencia de calor y humedad. Aunque esta parametrización es usada para resoluciones espaciales mayores a 10 km, mientras que para menores a 3 km no es necesario activar esta opción.

Microfísica: esta parametrización se encarga de resolver los procesos de vapor de agua, nubes y precipitación, proporcionando tendencias de calor y humedad y, lluvia no convectiva en superficie. Se debe tomar en cuenta que no es necesario usar un esquema de *graupel* para dominios con resoluciones mayores a 10 km pero a resoluciones muy altas sí es necesario activar ese esquema.

Interacción física con la superficie de la Tierra: este se compone de dos partes fundamentales: la capa de superficie y el modelo de superficie terrestre (LSM, por sus siglas en inglés). El primero tiene como propósito calcular las velocidades de fricción y coeficientes de intercambio con los cuales es posible calcular flujos de calor y humedad proporcionando velocidad de fricción al esquema de CLP; además de que cada esquema tiene variaciones en la función de estabilidad y longitudes de rugosidad. Mientras que el LSM usa la información meteorológica del esquema de

capa de superficie y de los esquemas anteriormente descritos (Fig. 8) para calcular flujos de calor y humedad en cada punto de superficie terrestre y oceánica.

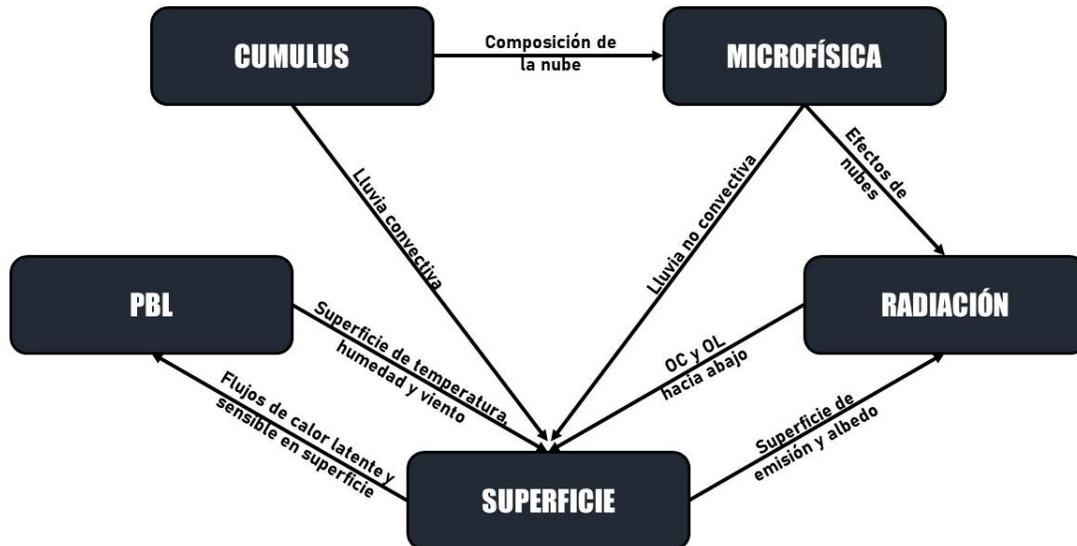


Figura 8. Diagrama que muestra de relación directa entre diferentes esquemas de parametrizaciones.

3.4 Datos ERA-5

Como se mencionó en la descripción del modelo WRF, este necesita ser alimentado con condiciones iniciales para poder resolver las ecuaciones de movimiento. En consecuencia, fue seleccionada la base de datos ERA 5 (Hersbach et al., 2018) del proyecto de reanálisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés) (<https://cds.climate.copernicus.eu/#/search?text=ERA5&type=dataset>). Esta base reemplaza a los datos ERA-interim que dejaron de producirse en agosto de 2019 así, ERA 5 cuenta con datos cada 6 horas, 30 km de resolución espacial, resolución temporal de 1979 al presente y con 37 niveles en la vertical, los datos mensuales se encuentran disponibles dentro de tres meses inmediatos al mes presente y los diarios después de cinco días al día presente.

Los datos cuentan con diversas fuentes de información a partir de las cuales fueron creados lo cual los hace robustos y adecuados para el estudio aquí presentado, entre las fuentes de información se tienen observaciones de diversos satélites, datos *in situ* como observaciones de superficie en tierra y mar, radiosondeos, radares, sondas y datos de aeronaves, composiciones de radar para precipitación y, satélites combinados. Cada una de estas fuentes aporta datos de humedad, columna de vapor de agua, agua líquida de nubes, precipitación y velocidad del viento sobre el océano, temperatura, tope de las nubes, vector de viento, ozono, humedad del suelo, altura de las olas, presión en superficie, viento a 10 metros, perfiles de humedad, profundidad de nieve y, lluvia.

3.5 Datos MODIS AQUA + TERRA

El espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) cuenta con un combinado de los satélites Terra y Aqua para crear la *Malla de Modelado Climático Anual de Tipo de Cobertura Terrestre*, una base datos que cuenta con una clasificación de uso de suelo y vegetación a nivel global a una resolución espacial de 0.05° y temporal de 2001 al presente, actualizándose anualmente. Dicha clasificación es realizada bajo los criterios del Programa Internacional de Biosfera-Geosfera que consta de 17 clases (Figura. 9). Por último, estos datos se encuentran bajo la clave MCD12C1 (Friedl, M., Sulla-Menashe, D., 2015) como mosaico global en proyección geográfica latitud/longitud (3600 filas x 7200 columnas) siendo una versión reproyectada de los datos MCD12Q1.

Es necesario mencionar que se realizó una reclasificación de los datos debido a que de acuerdo con la clasificación interpretada por WRF asigna el valor 17 a cuerpos de agua, mientras que MODIS le asigna el valor 0. Para realizar lo anterior, el formato original (HDF) se convirtió a GeoTiff mediante SAGA para poder trabajar el GeoTiff en QGIS y realizar la reclasificación, una vez realizada nuevamente se hizo uso de SAGA para pasar de GeoTiff a binario.

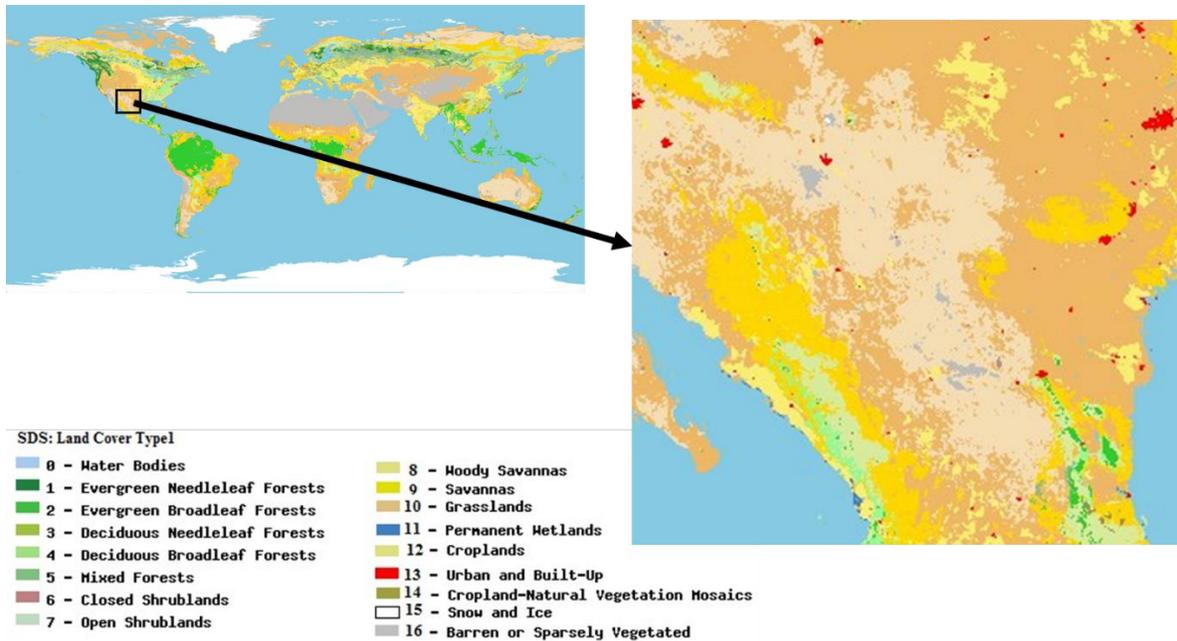


Figura 9. Clasificación MODIS Terra+Aqua correspondiente al año 2019 para la zona de estudio. Recuperado de <https://search.earthdata.nasa.gov/search/> el 26 de enero de 2021.

3.6 Datos USGS GLCC

La Caracterización de la Cobertura Terrestre Global (GLCC, por sus siglas en inglés) es una base de datos que cuenta con la clasificación de uso de suelo y vegetación de acuerdo a la clasificación de la USGS (Figura. 10). Esta es realizada de manera no supervisada de compuestos del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés) del satélite NOAA. Dicha fuente de datos fue realizada con base a imágenes del AVHRR para el periodo de abril de 1992 a marzo de 1993 y cuenta con una resolución espacial de 1 km (Schicker, 2011; Sertel et al, 2010).

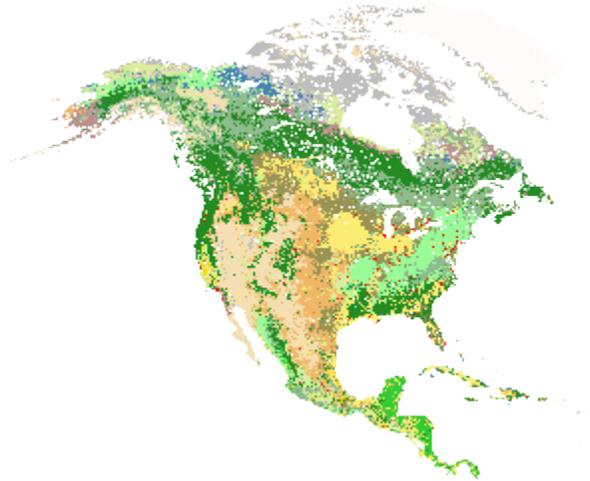


Figura 10. Clasificación de uso de suelo y vegetación de acuerdo a la USGS – GLCC.

3.7 Simulaciones de clima

En consideración al diseño de las simulaciones para la reducción de escala dinámica, estas fueron configuradas de acuerdo al área de estudio presentada en el capítulo 2, en donde se cubre un área comprendida entre la longitud de -96° a -111° y de latitud de 19° a 34°N , de manera resumida se presenta la tabla 1 con las consideraciones y especificaciones establecidas para el diseño de nuestras simulaciones. Asimismo, el modelado se realizó considerando un tiempo de *spin up*, el cual fue tomado un mes antes al inicio de cada año simulado (diciembre) esto se hizo simplemente para que el modelo no arrancara de cero y pudiera comenzar a representar adecuadamente los procesos físicos y a su vez, los valores de las variables meteorológicas. La selección de un solo mes se hizo bajo la premisa de que la atmósfera tiene una corta memoria y por lo regular no le lleva mucho tiempo responder a cambios en forma de fenómenos meteorológicos, totalmente contrario al océano que tiene una memoria larga y los procesos son más lentos.

Tabla 1. Características del diseño del dominio.

WRF VERSION 4.1.1		
Resolución	Espacial	15 km
	Temporal	1980-2019
	Vertical	37
Puntos	X	110
	Y	110
PARAMETRIZACIONES FÍSICAS	mp_physics	6
	cu_physics	6
	ra_lw_physics	3
	ra_sw_physics	3
	sf_sfclay_physics	1
	sf_surface_physics	2
	bl_pbl_physics	1
	sst_skin	1
	sst_update	1
	tmn_update	1
	usemonalb	.true.

Otra parte fundamental de un estudio de carácter climático es la consideración de que el uso de suelo y vegetación se encuentran en constante cambio ya sea por un proceso natural o por alguna intervención antropogénica. Resulta inexcusable actualizar esta cobertura de manera anual en nuestras simulaciones, para esto se hace uso de los datos MODIS Terra+Aqua previamente descritos, mismos que han sido reestructurados y convertidos a formato binario para introducirlos en el GEOGRIB.TBL y que puedan ser leídos por el modelo WRF.

Es necesario mencionar que la actualización del uso de suelo y vegetación solo es realizada para el periodo de 2000-2019. Por su parte, de 1980 a 1999 se hace uso de la clasificación de la USGS GLCC considerando como constante el uso de suelo y vegetación para este periodo.

3.8 Análisis comparativo y validación

Parangonar los resultados de las simulaciones en este estudio es fundamental pues de esta manera es posible conocer si otras mallas o salidas de modelos numéricos logran captar la misma variabilidad interanual y anual o si discrepan entre ellos. Se hace uso de una base de datos para comparar con los resultados aquí presentados dichos datos corresponden al CRU TS v4.04 (Harris et al., 2020) esta base de datos cuenta con una resolución espacial de 0.5° basada en el registro de estaciones meteorológicas alrededor del mundo así se deriva de la interpolación de anomalías climáticas mensuales de extensas redes de observaciones de estaciones meteorológicas. Con los cuales son comparadas las variables temperatura máxima, mínima y promedio. Para ello se presenta la distribución horizontal de las variables meteorológicas aquí analizadas, así como datos puntuales. Por su parte, la razón de mezcla es comparada con la base de datos NARR la cual cubre únicamente la región de Norteamérica con una resolución espacial de 32 km basada de un histórico de observaciones y cuentan con una mejor representación de las características del terreno.

Para presentar un análisis más completo del desempeño de las simulaciones respecto a las bases de datos previamente mencionadas fueron empleadas métricas estadísticas como: sesgo, raíz cuadrada del error cuadrático medio y correlación de Pearson, así como los valores de significancia estadística para cada uno de los puntos extraídos. A continuación, se describen estas métricas:

ERROR MEDIO

Es simplemente la diferencia promedio entre el valor simulado menos el observado, la cual es interpretada como el sesgo del pronóstico. De acuerdo a su formulación, los resultados pueden ser expresados como positivos o negativos, por consiguiente, nos permite conocer si el modelo está sobreestimando o subestimando, respectivamente. Matemáticamente esta métrica se establece de la siguiente manera:

$$EM = SESGO = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k) = \bar{y} - \bar{o} \quad (3.1)$$

En donde,

n = a los pares de observaciones y simulaciones

y_k = al valor simulado

o_k = al valor observado

\bar{y} = al valor medio simulado

\bar{o} = al valor medio observado

RMSE

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) expresa la raíz cuadrada de la diferencia promedio al cuadrado entre los pares de observaciones y simulaciones. Sin embargo, se debe considerar que este es muy sensible a valores atípicos; y que al elevar al cuadrado los pares de datos el error incrementa. En cambio, al elevar al cuadrado la diferencia de los pares de datos se obtienen valores necesariamente positivos, por lo que esta métrica va de 0 hacia los positivos, indicando una simulación perfecta si el resultado es 0. Finalmente, la raíz cuadrada es empleada para eliminar los cuadrados de las unidades de las variables meteorológicas y obtener errores con las mismas dimensiones. Matemáticamente el RMSE se expresa de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2} \quad (3.2)$$

En donde,

n = a los pares de observaciones y simulaciones

y_k = al valor simulado

o_k = al valor observado

\bar{y} = al valor medio simulado

\bar{o} = al valor medio observado

Correlación de Pearson

Esta es una medida de asociación que se obtiene entre dos variables como la razón de la muestra de las covarianzas de las variables y el producto de sus desviaciones estándar. Un punto importante a considerar es que Pearson no da información sobre errores asociados al desempeño de las simulaciones, sino que nos dice si existe una relación entre las variables. La relación se mide del -1 al 1, en donde un valor negativo indica que mientras una variable aumenta la otra disminuye, pero no necesariamente en la misma magnitud. En contraparte, un valor positivo indica que las dos variables aumentan o disminuyen en el mismo sentido, pero no en la misma magnitud. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (3.3)$$

En donde,

x_i = a los datos observados

\bar{x} = al promedio de los datos observados

y_i = a los datos simulados

\bar{y} = al promedio de los datos simulados

n = al número total de la muestra

3.9 Tendencias

Parte fundamental de un estudio climático es realizar un análisis de tendencias pues estas son las que nos darán información más completa sobre el comportamiento histórico de las variables de interés. Con esto, al contar un periodo de tiempo grande, es posible observar y distinguir entre la variabilidad interanual y decadal climática y un efecto de cambio climático. De esto modo, se podrán identificar las tendencias que han seguido las variables meteorológicas en los últimos 40 años.

Por lo tanto, aquí se presentan análisis de regresión de acuerdo a lo simulado para conocer el cambio que ha existido en este periodo para la temperatura promedio, máxima, mínima y, humedad a nivel espacial. Por su parte, para analizar las

tendencias de las variables de cada punto extraído es necesario que a las series de tiempo les sea aplicada una prueba no-paramétrica Mann-Kendall (Escalante et al., 2014; Cavazos et al., 2019; Ruiz et al., 2020) la cual ha sido usada ampliamente para distinguir tendencias de variables hidrometeorológicas. Puesto que, a diferencia de otras pruebas paramétricas resulta ser el adecuado ya que no es necesario que los datos presenten normalidad estadística debido a que los datos hidrometeorológicos presentan estacionalidad. Además, esta prueba ofrece una baja sensibilidad a series de tiempo no homogéneas o que tienen cambios abruptos lo que permite hacer uso del mismo en este estudio debido a que se hace uso de dos clasificaciones de uso de suelo una (USGS) constante para el periodo 1980-1999 y la otra (MODIS) con actualizaciones anuales para el periodo 2000-2019. Matemáticamente esta prueba se obtiene de la siguiente manera:

Primero, los datos deben de ser ordenados de la forma:

$$(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Para obtener el signo de la diferencia de cada par de valores siguiendo la siguiente regla,

$$\text{signo}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

Con lo previamente establecido, se procede a obtener el estadístico S de Mann-Kendall de la siguiente manera:

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

Para $n \geq 10$ el estadístico S se aproxima a una distribución normal en donde la media de S es cero y su varianza se obtiene de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)]$$

Finalmente, se obtiene el estadístico Z

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sigma}, & \text{si } S > 0 \\ 0, & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sigma}, & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

De esta manera, $Z > 0$ indica una tendencia en aumento y $Z < 0$ una en descenso, dicho de otra manera, tenemos que la hipótesis nula (H_0) establece que no hay tendencia y la hipótesis alternativa (H_1) establece que existe una tendencia en aumento o descenso según Z . Además, Z es usado para medir el nivel de significancia y a su vez para probar la hipótesis nula, tomando en cuenta que cuando,

$$|Z| > Z \left(\frac{1 - \alpha}{2} \right)$$

Se tiene una tendencia estadísticamente significativa, en donde α es el nivel de confianza elegido (0.05, 0.01 o 0.001).

Finalmente, la magnitud de la tendencia se obtiene con un procedimiento no paramétrico llamado pendiente de Sen y que se define como,

$$\beta = \left(\frac{x_j - x_k}{j - i} \right)$$

En donde x_j y x_k son los valores al tiempo j y k con $j > k$.

Parte fundamental de esto es proporcionar un panorama general sobre los cambios que ha habido en dicho periodo, y así esta información puede resultar valiosa para diferentes sectores que sean sensibles a cambios de estas variables.

3.10 Variables meteorológicas y oscilaciones

Las oscilaciones climáticas son aquellas que tienen un comportamiento cíclico, es decir, tienen fases positivas y negativas, en donde cada una de ellas repercute en el comportamiento de las variables meteorológicas en el planeta a nivel estacional, intraestacional, interanual, interdecadal o multidecadal. En este trabajo se presenta

un análisis a nivel intraestacional, interanual e interdecadal para relacionar las anomalías de temperatura y humedad a oscilaciones conocidas como el ENSO, PDO y AMO, con la finalidad de conocer las regiones del desierto de Chihuahua que son afectadas por estas oscilaciones.

Por consiguiente, se obtuvieron anomalías que son calculadas a través de un método simple pero que proporcionan información valiosa para estudios de carácter climático puesto que nos dice la variación de una variable respecto al valor climatológico. En donde, de acuerdo con la OMM el valor climatológico se obtiene a partir de un periodo base mayor o igual a 30 años. Matemáticamente una anomalía es obtenida de la siguiente manera:

$$x' = x - \bar{x}$$

En donde,

x' es la anomalía

x es el valor de una variable en un punto y tiempo dado.

\bar{x} es el valor promedio de una variable en un punto dado.

Por lo tanto, nuestras anomalías estarán oscilando alrededor del cero, en donde valores positivos indican un aumento de la variable en cuestión y los valores negativos indican un déficit de la variable respecto del valor climatológico de referencia (promedio).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Análisis comparativo

La validación de las simulaciones de variables meteorológicas como la temperatura y humedad resulta siempre importante debido a que estas deben de ser comparadas con datos observados para obtener una idea del trabajo numérico del modelo. En este caso, se ha seleccionado la base de datos del Climate Research Unit (CRU TS) en su versión v4.04 para comparar los resultados que se refieren a la temperatura. Para realizar esto fue necesario interpolar los datos CRU a la resolución empleada en las simulaciones, posteriormente se procedió a realizar cálculos espaciales de BIAS (sesgo) y Pearson. En lo que respecta a la razón de mezcla se utilizó la humedad específica de la base de datos NARR, esto se realiza bajo la premisa de que ambas variables son equivalentes.

La Fig. 11 muestra el sesgo de la temperatura promedio mensual, es decir, 480 meses correspondientes a los 40 años de estudio, ahí se puede observar que el WRF tiende a subestimar, sobre todo en regiones montañosas tal como se presenta en la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental. Mientras, que sobre el DCH se tienen sesgos que varían entre los 0.0° a -2.0° C, e incluso en algunas zonas existen sesgos positivos que van de los 0.5° a 1.5° C.

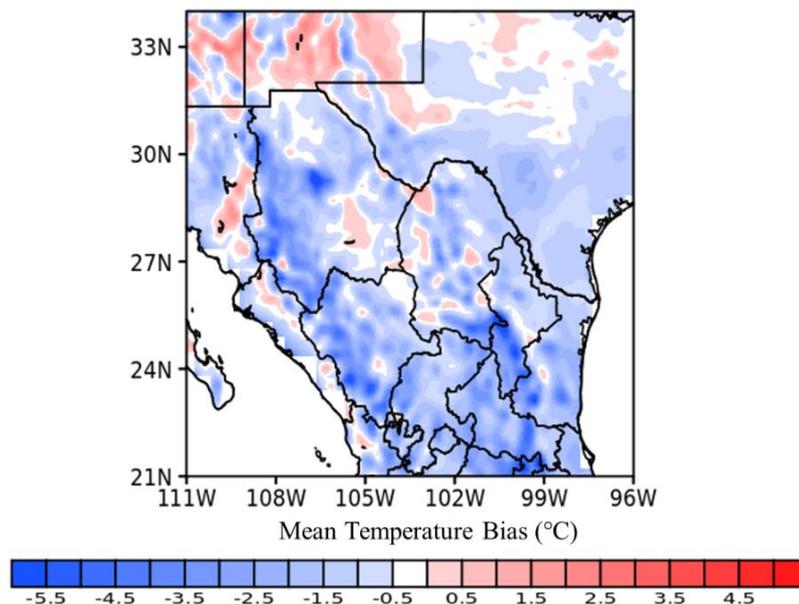


Figura 11. Sesgo de temperatura promedio mensual entre WRF y CRU para el periodo 1980-2019.

El sesgo de la temperatura máxima y mínima de promedio mensual se presenta en la Fig. 12a y 12b, respectivamente. Es evidente que la temperatura máxima tiene un sesgo frío en todo el dominio con valores que llegan a los 4° o 5° C sobre zonas montañosas, esto indica que probablemente el modelo no logra capturar adecuadamente el valor máximo de temperatura sobre estas regiones, o pudiera ser que los datos ERA-5 tienen problemas para representar estos valores sobre estas regiones. Por su parte, la temperatura mínima muestra sesgos calientes que varían entre los 0.5° a 2° C sobre la región del DCH e incluso algunos sesgos fríos sobre las Sierras y zonas montañosas con valores que rondan entre los -0.5° a -2° C.

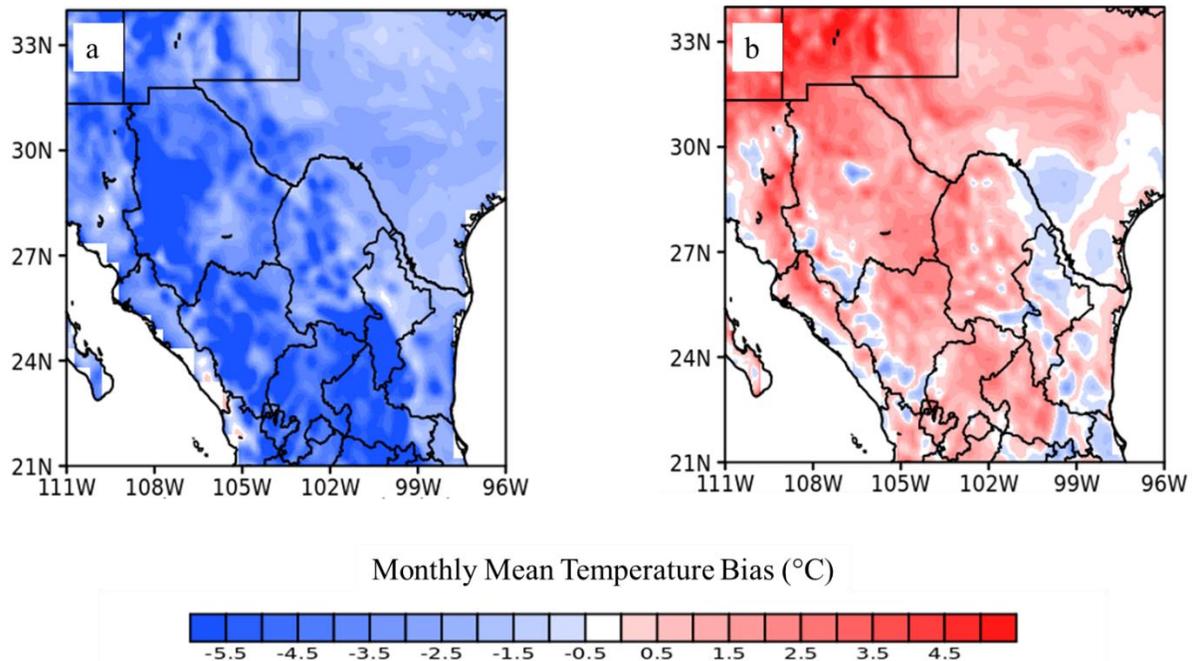


Figura 12. Sesgo de temperatura máxima (a) y mínima (b) promedio mensual para el periodo 1980-2019.

La correlación para temperatura promedio, máxima y mínima mensual pueden ser consultados en el anexo 1 en todos ellos se obtuvieron correlaciones por arriba de los 0.9. Por su parte, el sesgo y Pearson para verano e invierno pueden ser consultados en el Anexo 1, en esos mapas se observa como el verano muestra

sesgos fríos pequeños sobre regiones sin topografía compleja, mientras que en las zonas montañosas los sesgos aumentan. Asimismo, los datos muestran estar altamente correlacionados con valores por arriba de los 0.7 sobre el DCH. En contra parte, el invierno muestra sesgos bajos en toda la región e incluso el sesgo sobre las zonas montañosas es bajo contrario a lo que se observó con el verano. Por su parte, los valores de correlación están por arriba de los 0.7 sobre el DCH.

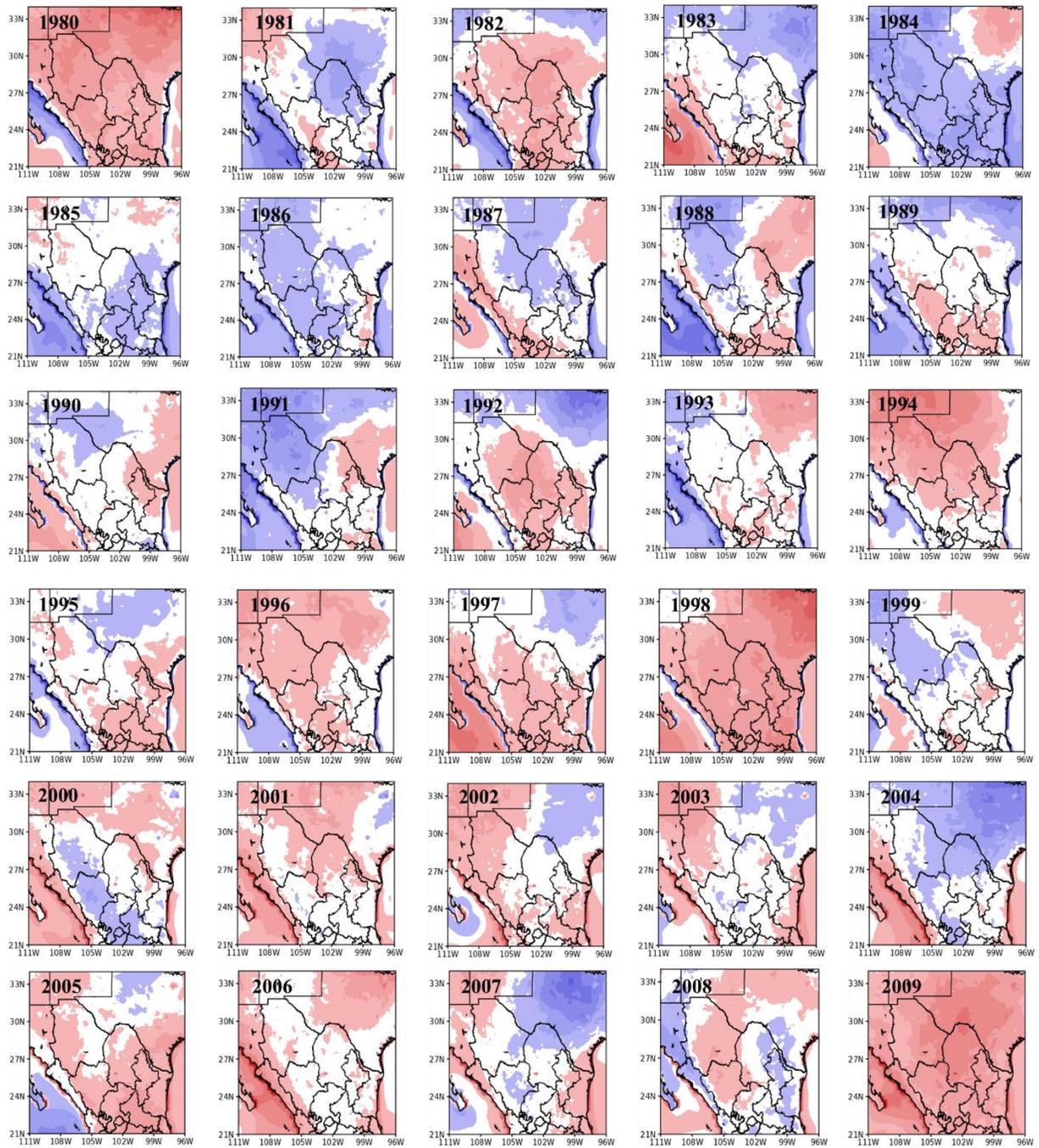
4.2 Anomalías anuales

Una manera de identificar años anómalamente más cálidos o más fríos es mediante el cálculo de anomalías (método descrito en el capítulo 3) el cual brinda un panorama espacial sobre el comportamiento de una variable meteorológica, en este caso la temperatura y humedad. De esto modo, se presentan los mapas de anomalía para verano e invierno para ambas variables:

4.2.1 Temperatura

4.2.1.1 Verano

Cada mapa de anomalía (Fig. 13) fue obtenido considerando junio, julio y agosto como meses representativos de verano, lo cual permite realizar un primer diagnóstico sobre el comportamiento de la temperatura en este periodo. En la región del DCH las anomalías negativas (regiones en azul) de temperatura son las que dominan en las primeras dos décadas y que conforme los años avanzan estas dejan de ser negativas teniendo años más cálidos para las últimas dos décadas, mostrando un calentamiento en el verano. Con esto, se ha detectado un periodo cálido que parece estar modulando el comportamiento de las anomalías sobre el área de interés.



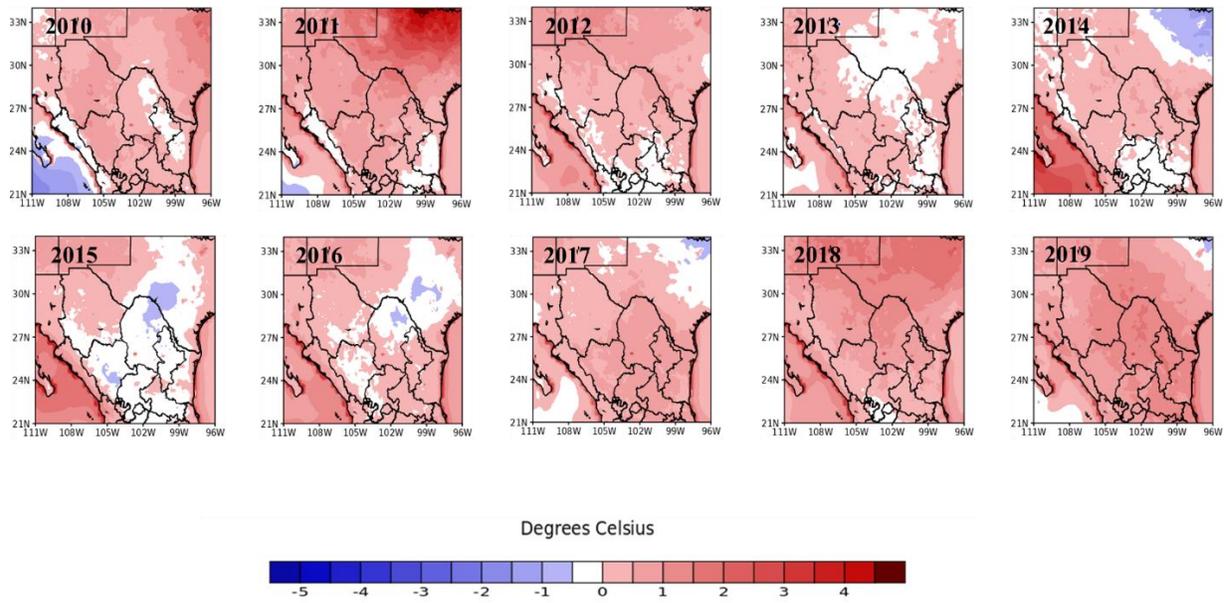


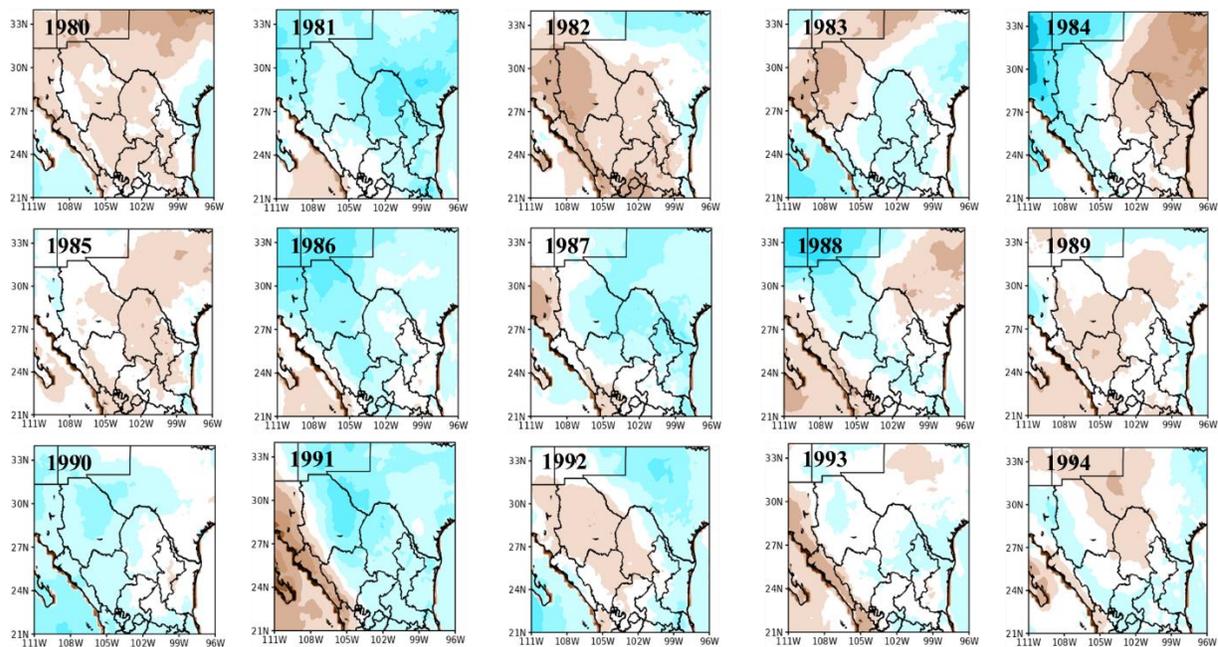
Figura 13. Anomalías de temperatura de verano (JJJ) regiones en azul corresponden a veranos menos cálidos y regiones en rojo a veranos más cálidos respecto del periodo de referencia.

4.2.2 Humedad

4.2.2.1 Verano

Continuando con el verano se presentan las anomalías de humedad (Fig. 14), en este caso razón de mezcla en g/kg, en donde se observa que las primeras dos décadas y parte de la tercera fueron en su mayoría veranos anómalamente secos (regiones en café), es decir, en donde el contenido de humedad fue menor. Por su parte, los años restantes fueron dominados en su mayoría por anomalías positivas (regiones en azul) lo que indica un mayor contenido de humedad sobre la región del DCH. No obstante, es necesario mencionar que existen años, por ejemplo 1991 y 2011, en los que las anomalías negativas (positivas) se limitan en el occidente del país mientras que en el DCH las anomalías son positivas (negativas) lo cual resulta congruente considerando que el paso de humedad de una zona a otra está limitada o bloqueada por la Sierra Madre Occidental.

Por otra parte, se tiene que existe una concordancia entre los años más cálidos (menos cálidos) de verano con los años más húmedos (menos húmedos) pero esto no sucede en todos los años, por ejemplo, 1980 tuvo un verano más cálido respecto del promedio, mientras que para ese mismo verano las condiciones de humedad fueron más secas, esto probablemente se deba a que el vapor de agua proveniente de los océanos no alcanza a adentrarse hacia el continente lo cual genera condiciones favorables de cielo despejado que permiten un mayor calentamiento por la entrada de radiación proveniente del Sol. En contraparte, también existen regiones más frías, pero con mayor contenido de humedad, por ejemplo 2007, esto sugiere que los vientos están transportando mayor vapor de agua hacia continente propiciando condiciones favorables para la formación de nubes lo cual a su vez genera un enfriamiento debido a que las nubes reflejan (efecto albedo) la radiación solar.



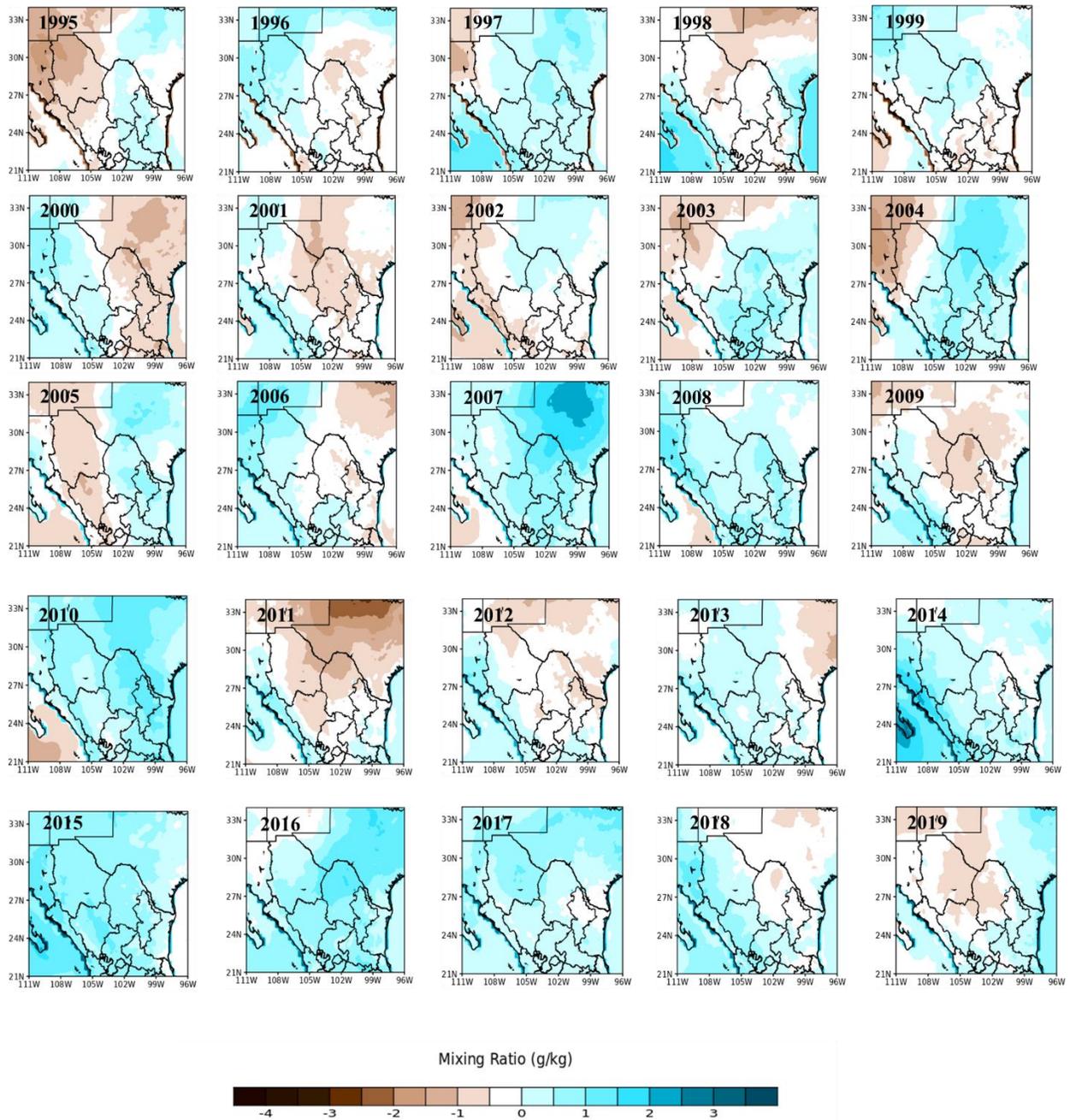


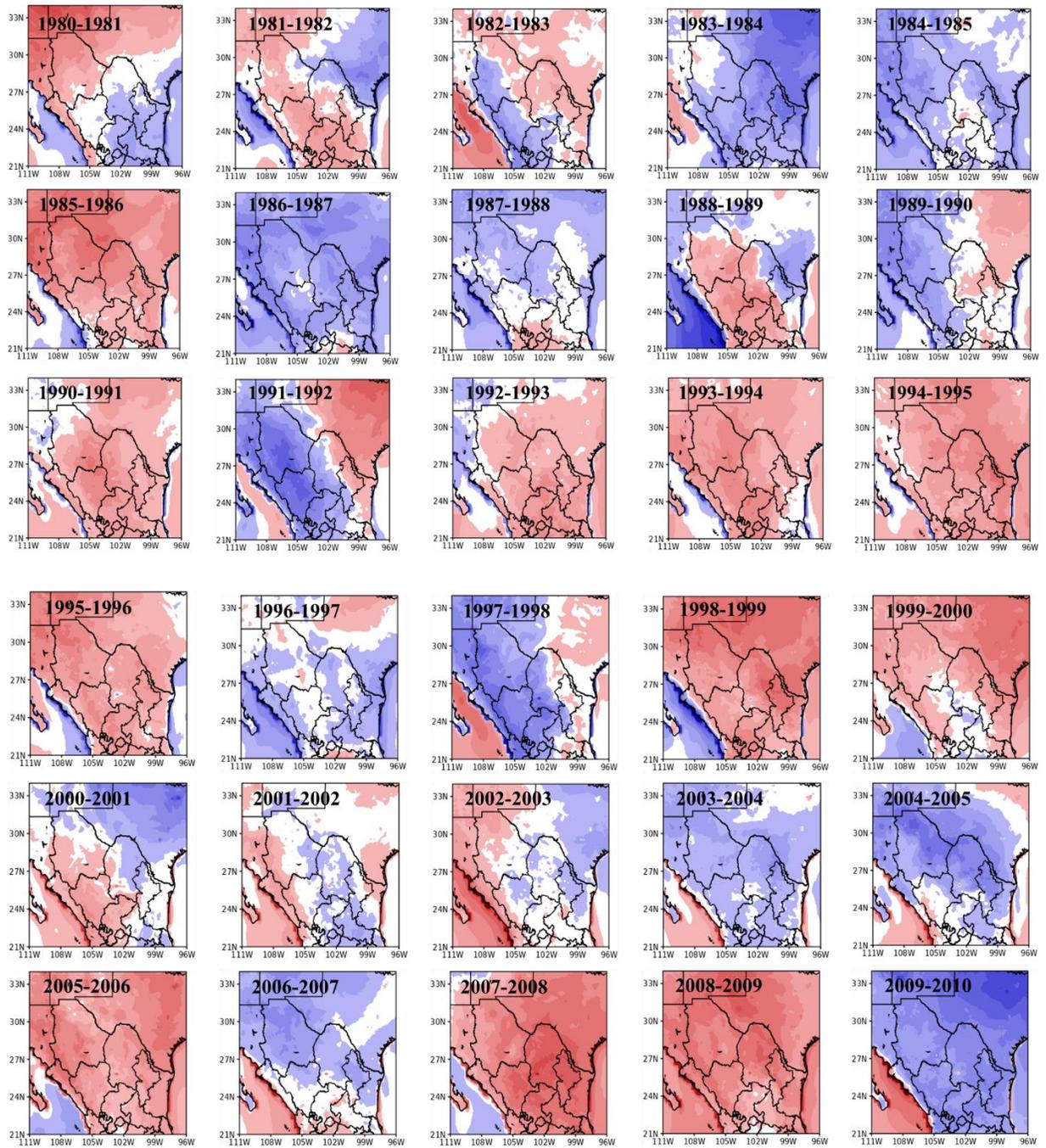
Figura 14. Anomalías de humedad de verano (JJA) regiones en azul corresponden a veranos más húmedos y regiones en café a veranos menos húmedos respecto del periodo de referencia.

4.2.3 Temperatura

4.2.3.1 Invierno

Como parte del análisis del comportamiento de la temperatura y humedad, se presentan los mapas de anomalías correspondientes a invierno, para este caso el invierno está definido por los meses de diciembre, enero y febrero. En la Figura 15 se observan los mapas de anomalías de temperatura en los cuales se pueden distinguir cómo las anomalías, a diferencia del verano, son más intercaladas, pero en los últimos quince años las anomalías positivas dominan sobre el DCH.

Es importante señalar que la mayoría de los años exhibe un comportamiento tipo dipolo, en donde mientras el continente y la región del DCH se encuentran bajo una anomalía positiva (negativa) el océano Pacífico manifiesta anomalías negativas (positivas), sin embargo, esto no se logra observar con el Golfo de México. Además, es interesante como las anomalías de temperatura muestran diferentes patrones, pero repetidos, por ejemplo, existen inviernos en los que las anomalías son dominantes o que incursionan desde el Golfo de México hacia el DCH, o del Pacífico e incluso del norte en donde las anomalías parecen provenir desde latitudes mayores.



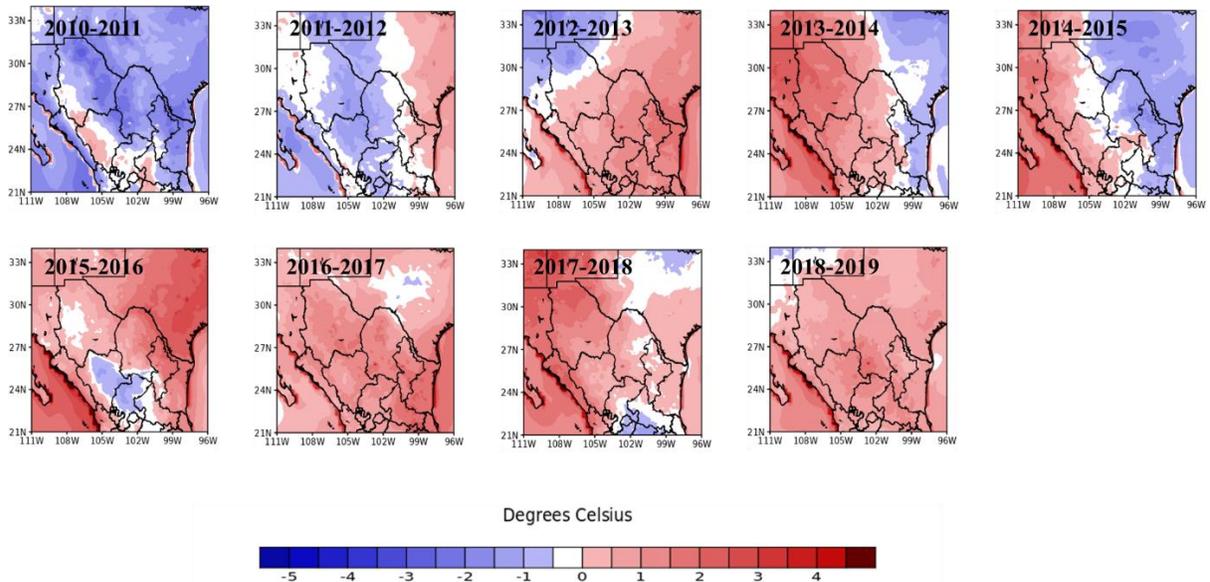


Figura 15. Anomalías de temperatura de invierno (DJF) regiones en azul corresponden a invierno menos cálidos y regiones en rojo a inviernos más cálidos, respecto del periodo de referencia.

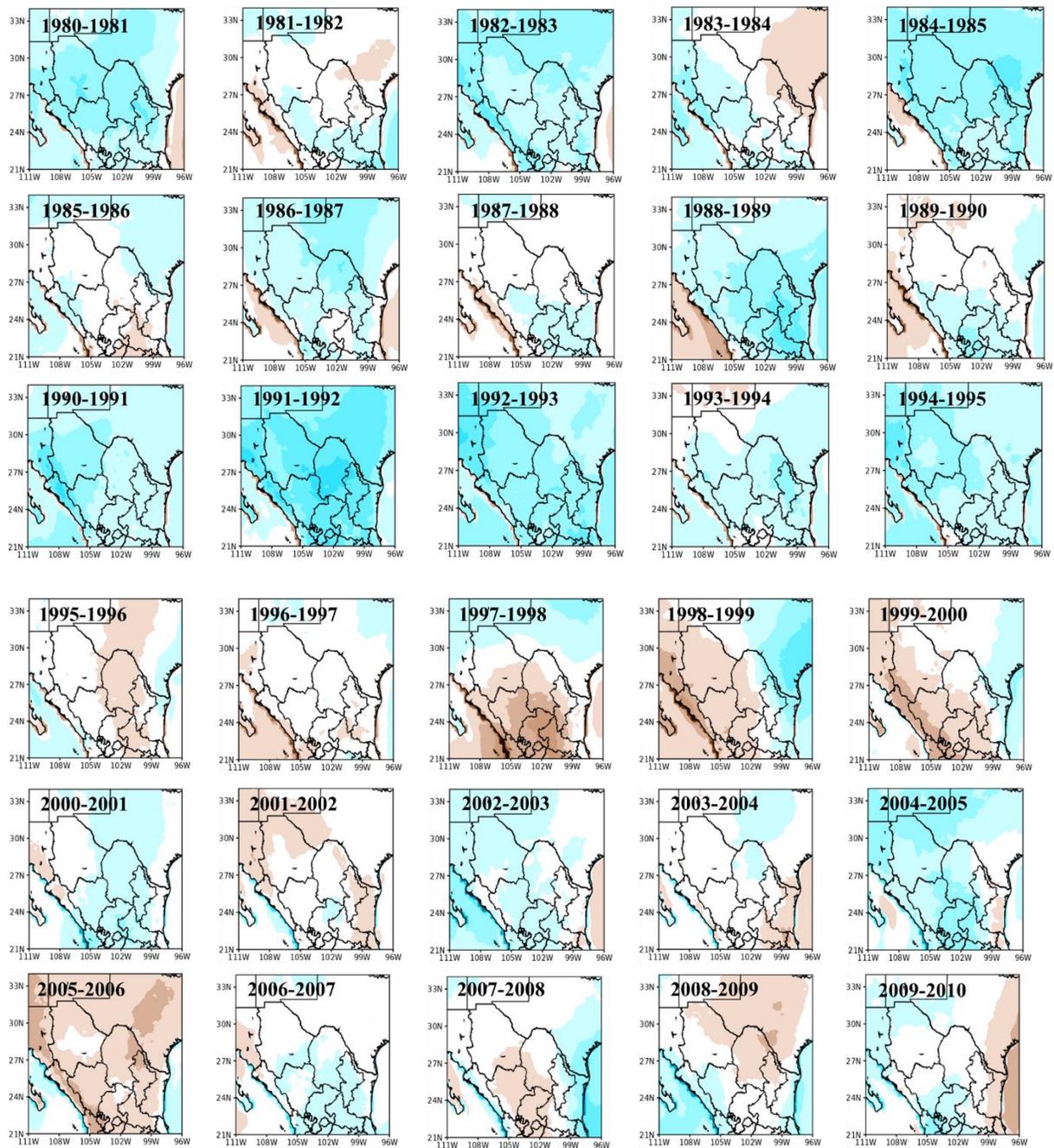
4.2.4 Humedad

4.2.4.1 Invierno

En la Figura 16 se pueden observar las anomalías de humedad (g/kg) correspondientes al invierno, en principio es posible identificar que existen dos periodos extensos, uno húmedo (1980-1981 a 1994-1995) y otro seco (1995-1996 a 2015-2016) y los últimos tres inviernos húmedos. Es importante señalar que existen inviernos en donde, por ejemplo, hubo mayor humedad sobre el continente, pero sobre el Pacífico la anomalía fue seca y en el Golfo de México fue húmeda o viceversa.

Por su parte, hubo inviernos con alto contenido de humedad como 1991-1992 o bien inviernos más secos como 2010-2011. Lo cual puede estar relacionado a sistemas invernales de mayor transporte de humedad o bien sistemas más secos ya que en ambos casos el dominio estuvo bajo anomalías negativas de temperatura, es decir, inviernos más fríos, sin embargo, el contenido de humedad fue diferente. Otra

posibilidad es que los océanos estuvieron más cálidos y los vientos transportaron el vapor de agua hacia continente. No obstante, en este trabajo no se analiza la dinámica atmosférica y el transporte de humedad, pero si su relación con oscilaciones, tema que será abordado más adelante.



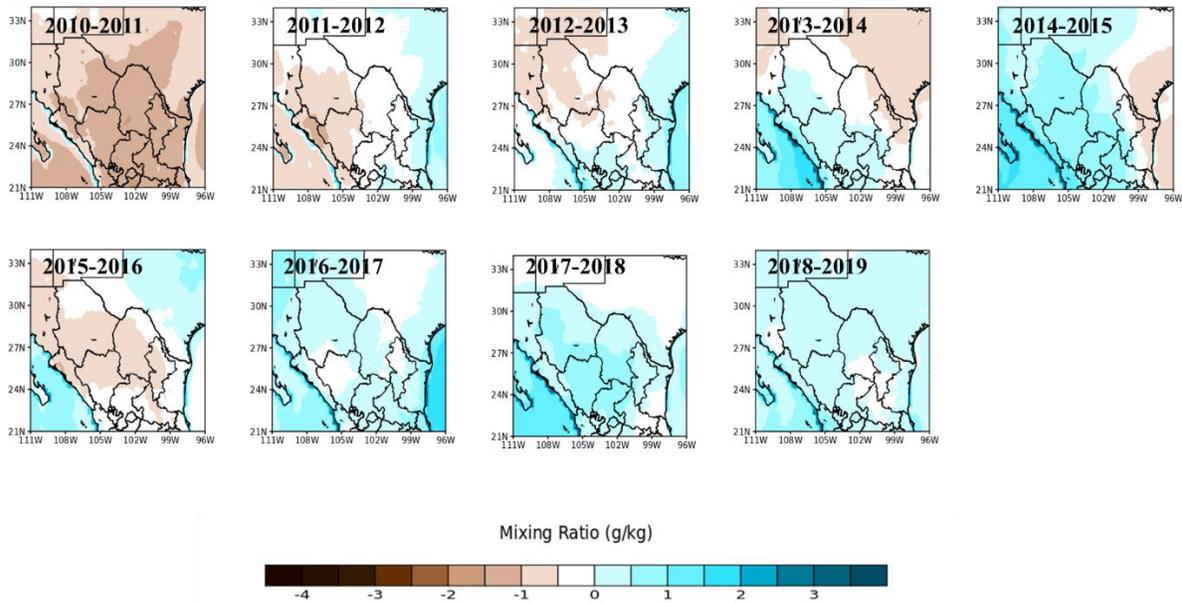


Figura 16. Anomalías de humedad de invierno (DJF) regiones en azul corresponden a inviernos más húmedos y regiones en café a inviernos menos húmedos respecto del periodo de referencia.

A manera de resumen, es posible distinguir como en ambas estaciones la temperatura ha ido en aumento mientras que la humedad en verano ha aumentado y en invierno ha disminuido. No obstante, existen años en los que se muestran anomalías muy fuertes ya sean positivas o negativas, lo cual indica que existe algún fenómeno de escala global e interanual – intraestacional que pudiera estar modulando el clima sobre el DCH. Por consiguiente, se decidió trabajar con oscilaciones conocidas como ENSO, PDO y AMO para tratar de establecer si existe una correspondencia entre estas oscilaciones y el comportamiento de las variables meteorológicas en la región del DCH.

4.3 Correspondencia entre variables meteorológicas - AMO, PDO, ENSO

Una vez detectados los cambios en la temperatura y humedad durante el invierno y el verano del periodo 1980-2019, fue necesario investigar cuanto se puede atribuir a oscilaciones. Dado que se observaron comportamientos anómalos con distintos patrones e incursiones como de la parte del Pacífico hacia el DCH o del Golfo de

México hacia la misma región, fue necesario pensar en oscilaciones que pudieran estar modulando el comportamiento de las variables meteorológicas sobre el DCH. Es por ello que fueron seleccionadas tres oscilaciones diferentes, una de tipo interanual El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO), una decadal la Oscilación del Pacífico (PDO) y una multidecadal la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO).

Para poder establecer una relación entre las oscilaciones y el DCH fue necesario delimitar el DCH en dos regiones, las cuales corresponden al Norte del Desierto de Chihuahua (NDCH) y el Sur (SDCH) del mismo (Fig. 17). La justificación de esta delimitación se debe a que el DCH, según el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) va desde el sur de los EUA hasta la porción sur del Altiplano Mexicano mismo que, como se mencionó en la zona de estudio, se encuentra rodeado por las Sierras Madre Occidental, Oriental, y la faja transversal volcánica mexicana. En consecuencia, se trató de evitar la influencia de estas zonas montañosas ya que al contar con un clima completamente diferente al del DCH pudieran influir de manera perjudicial los resultados del área de interés.

³ https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/desierto_chihuahuense/ consultado por última vez el 29 de abril de 2021.

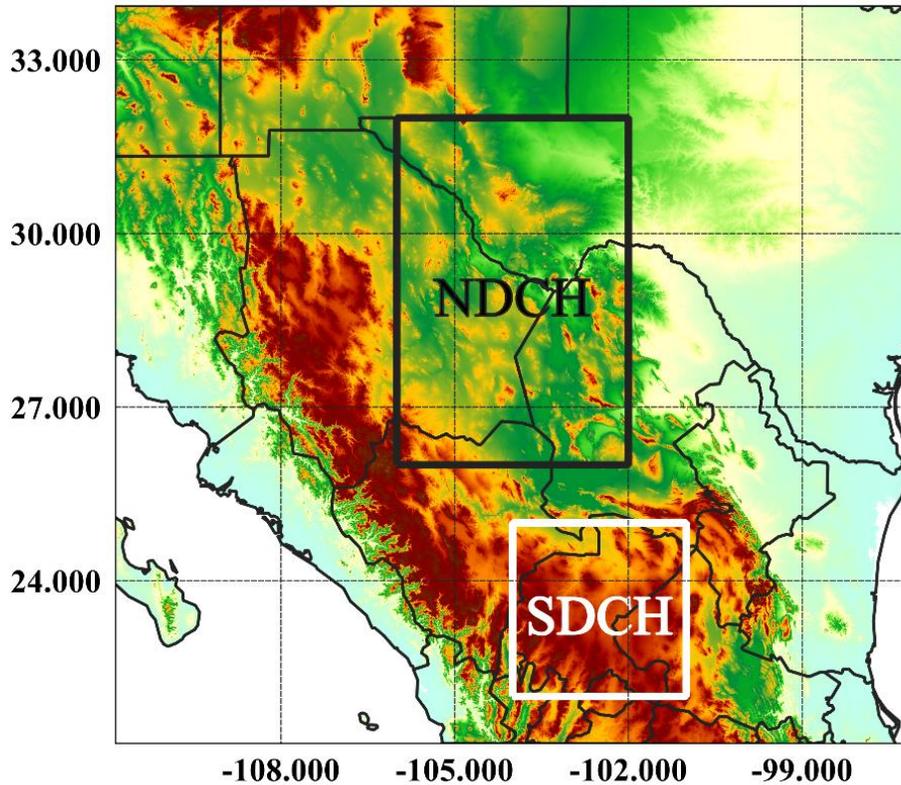


Figura 17. Delimitación del Desierto de Chihuahua en su porción norte (NDCH) y sur (SDCH).

4.3.1 Variables meteorológicas – ENSO

El ENSO es un fenómeno de escala global que tiene un impacto en las condiciones meteorológicas de muchas regiones del mundo. Por lo tanto, existen diversos índices que miden la intensidad de este fenómeno a lo largo de la franja ecuatorial desde el occidente del Pacífico hasta el oriente del mismo, cada uno de estos índices toma en consideración diversas variables o bien, es medido en diferentes regiones de la franja ecuatorial.

En este caso, se hace uso del Índice Oceánico del Niño (ONI, por sus siglas en inglés) el cual calcula el valor promedio de temperatura en la región 3.4 de El Niño, región comprendida entre las coordenadas 5°S - 5°N; 170°W - 120°W (Fig. 18). Posteriormente ese valor promedio es expresado en anomalías considerando un valor de referencia promedio de 30 años. De acuerdo con el valor y signo de la

anomalía, la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) considera eventos consolidados de El Niño (La Niña) cuando la anomalía es $\geq +0.5^\circ \text{C}$ ($\leq -0.5^\circ \text{C}$).

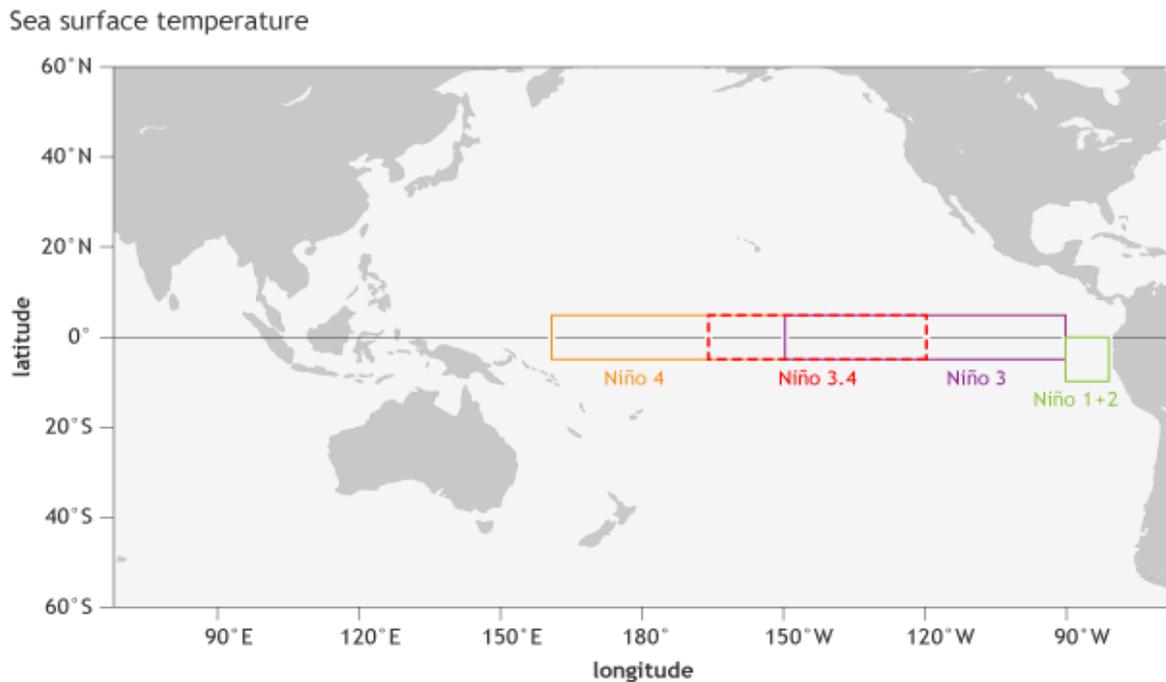


Figura 18. Regiones en donde es monitoreado el ENSO, el recuadro en rojo muestra la región 3.4 de El Niño región utilizada para calcular el ONI. Recuperado de: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one> el 3 de abril de 2021.

Por lo tanto, fueron seleccionados los valores mensuales del ONI para el mismo periodo de los datos de WRF de este estudio, con el objeto de establecer una correspondencia entre el ONI y el DCH. De este modo, se muestran los valores de correlación de Spearman para la temperatura y humedad vs el ONI (Tabla 2).

Tabla 2. Correlación de variables meteorológicas - el ONI, a nivel anual y estacional para ambas regiones del DCH. En donde, razón de mezcla (MR) y temperatura (TEMP) y valores en negritas indican un nivel de significancia estadística $\geq 95\%$.

NDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-ONI	0.66	0.01	0.37
TEMP-ONI	-0.31	0.05	-0.33
SDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-ONI	0.48	0.05	0.25
TEMP-ONI	-0.17	0.09	-0.34

En la tabla 2 se muestran las correlaciones en donde cada una de ellas representa el valor neto, es decir, el ONI fue correlacionado mediante su promedio mensual versus promedio mensual de temperatura y humedad, sin distinguir eventos de La Niña y El Niño, para el caso estacional se hizo uso del ONI para los meses DEF, correlacionando estos con la temperatura y humedad promedio mensual de verano e invierno.

De esta manera, se tiene que a nivel anual las correlaciones más fuertes ocurren con la razón de mezcla y el ONI, que de acuerdo con la clasificación de correlaciones por (Hines y Montgomery, 1985), corresponden a una correlación alta para el NDCH y moderada para el SDCH, en ambos casos son valores significativos al 95 %, esto sugiere que la humedad es altamente influenciada por el ENSO sobre el DCH al menos a nivel anual y que al ser una correlación positiva nos indica que un valor positivo (negativo) del ENSO repercute sobre el DCH con una anomalía positiva (negativa) de humedad. Este resultado es importante pero no determinante ya que es necesario resaltar el rol del ENSO sobre el DCH a nivel estacional, sin embargo, durante el verano no existen buenas correlaciones ni significativas para ambas regiones, lo mismo sucede para el invierno en donde las correlaciones son

bajas y a pesar de que estas son significativas al 95 % resulta complicado afirmar que realmente el ENSO tiene impactos durante el invierno, a un nivel neto.

El caso de la temperatura y su correlación con el ONI, es menos alentador en cuanto a correlación se refiere debido a que a nivel promedio anual las correlaciones son de muy bajas a bajas en ambas regiones. Por su parte, a nivel estacional no es muy diferente ya que, tanto para verano como invierno, la correspondencia es baja. En resumen, se tiene que a nivel anual e invernal existe una asociación significativa, pero baja entre el ENSO y la temperatura sobre el NDCH, mientras que el SDCH sólo sucede en invierno.

De acuerdo con lo anterior, es necesario presentar un análisis más preciso debido a que es bien conocido que el ENSO tiene impactos a nivel estacional según la fase en que se encuentre. Es por esto que se presenta la tabla 3, en la cual se diferencian los años con eventos consolidados de El Niño y La Niña, así como su correspondencia con la temperatura y humedad sobre el DCH para el verano e invierno.

Tabla 3. Correlación entre variables meteorológicas y ambas fases del ENSO. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística \geq al 95 %

NDCH				
	SUMMER		WINTER	
	Temperature	Mixing ratio	Temperature	Mixing ratio
NIÑO	0.28	-0.18	0.14	-0.22
NIÑA	0.23	-0.26	-0.2	-0.07
SDCH				
	SUMMER		WINTER	
	Temperature	Mixing ratio	Temperature	Mixing ratio
NIÑO	0.20	-0.21	-0.67	-0.41

Niña	-0.09	0.24	-0.40	0.31
------	-------	------	--------------	------

Por consiguiente, se tiene que la influencia de La Niña y El Niño sobre el DCH resulta ser baja para el NDCH debido a las bajas correlaciones y a la nula significancia estadística de las mismas. En cambio, el SDCH sí muestra tener correspondencia con El Niño y La Niña durante el invierno, en donde se tiene una correlación negativa alta con significancia estadística al 99% para la temperatura, indicando que bajo condiciones de El Niño se presentan inviernos más fríos. Mientras, que para condiciones de La Niña se tiene una correlación moderada negativa con significancia estadística al 95%, indicando que bajo condiciones de La Niña se tienen inviernos más cálidos sobre el SDCH, sin embargo, dicha correspondencia no es alta como en el caso de El Niño, pero sí nos indica que a un nivel moderado llega a tener impacto en las condiciones de temperatura sobre el SDCH.

La humedad, como ya se comentó, no muestra correlación significativa para el NDCH para ninguna de las dos estaciones del año, pero sí existe una correlación negativa moderada significativa al 90% en invierno para el SDCH durante eventos de El Niño, lo cual sugiere que a nivel moderado cuando existen eventos de El Niño se presentan inviernos secos sobre la región.

4.3.2 Variables meteorológicas – PDO

La PDO es un patrón de variabilidad climática que tiene lugar sobre el norte del Océano Pacífico en latitudes medias. Su principal característica es que varía en un periodo largo de tiempo, es decir, para cambiar de fase sea positiva o negativa, puede llegar a tardar hasta 20 – 30 años. Independientemente de su fase, se sabe que la PDO altera los vientos en la parte alta de la atmósfera lo cual puede resultar en cambios significativos en el clima de una región del planeta. Una fase positiva se caracteriza por anomalías negativas de temperatura de la superficie del mar en el interior del norte del Pacífico y positivas en la costa del mismo, así como presión a nivel del mar por debajo del promedio sobre el norte del Pacífico. Mientras que una fase negativa (Fig. 19) corresponde a los patrones inversos de la fase positiva.

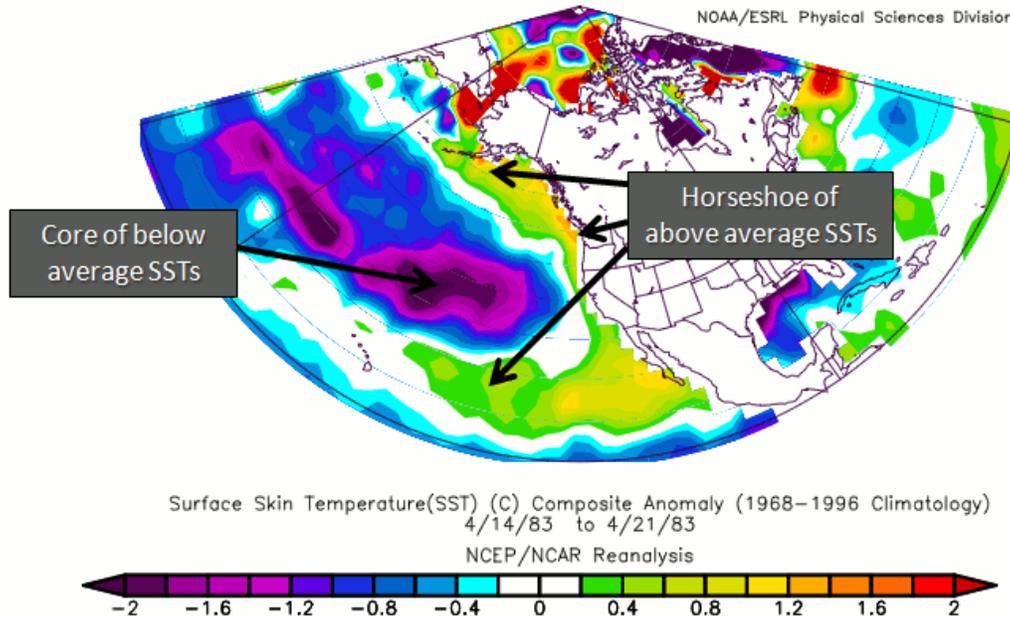


Figura 19. Muestra la fase positiva de la PDO sobre el pacífico norte en donde las anomalías de temperatura de la superficie del mar son negativas océano adentro y positivas en la costa, la fase negativa muestra un comportamiento opuesto. Recuperado de https://www.daculaweather.com/4_pdo_index.php el 20 de abril de 2021.

Por lo anterior, es que dicha oscilación ha sido seleccionada para establecer una correspondencia con la humedad y temperatura sobre el DCH, a nivel anual y estacional, cada una de las correlaciones representa el valor neto, es decir, no se distinguió entre fase positiva o negativa.

De este modo, en la tabla 4 se presentan los valores obtenidos para ambas regiones del DCH, en donde la humedad sobre el NDCH a nivel anual alcanza una correlación moderada positiva y significativa al 95% misma que a pesar de no ser alta nos indica que la fase positiva (negativa) de la PDO favorece condiciones húmedas (secas). Por su parte, con la temperatura se obtiene una correlación negativa moderada y significativa al 95% a nivel anual, lo que sugiere que una fase positiva (negativa) de la PDO favorece a anomalías de temperatura negativas (positivas). En cambio, a nivel estacional se tienen correlaciones muy bajas lo cual limita establecer una relación entre la PDO y las variables meteorológicas.

En contraparte, el SDCH obtiene una correlación negativa moderada y significativa al 99% a nivel anual entre la temperatura y la PDO, esto quiere decir que una fase positiva (negativa) de la PDO favorece a anomalías negativas (positivas) de temperatura. Finalmente, a nivel estacional se tiene que la humedad en verano obtiene una correlación positiva baja y, la temperatura en invierno una correlación negativa baja, sin embargo, a pesar de que en ambos casos las correlaciones son significativas, son correlaciones bajas y no permiten afirmar que la PDO bajo su fase positiva o negativa, tiene impactos importantes sobre el comportamiento de las anomalías de dichas variables a nivel estacional.

Tabla 4. Correlación de variables meteorológicas y la PDO, a nivel anual y estacional. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística \geq al 95 %

NDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-PDO	0.46	0.22	0.29
TEMP-PDO	-0.41	-0.32	-0.17
SDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-PDO	0.12	0.24	0.1
TEMP-PDO	-0.42	-0.11	-0.28

4.3.3 Variables meteorológicas – AMO

La AMO, es una oscilación multidecadal que al igual que las oscilaciones anteriores se caracteriza por presentar dos fases: una cálida y una fría, las cuales corresponden a anomalías positivas y negativas de la temperatura de la superficie del mar en la región que comprenden los 0°-80° N (Fig. 20). Además, esta oscilación puede llegar a tardar entre 20-40 años para cambiar de fase. Es bien conocido que esta oscilación puede afectar la temperatura del aire y los regímenes de precipitación en el hemisferio norte, es por esto que ha sido seleccionada para

establecer si existe o no una correspondencia estadística con la temperatura y humedad sobre el DCH.

Atlantic Multidecadal Oscillation

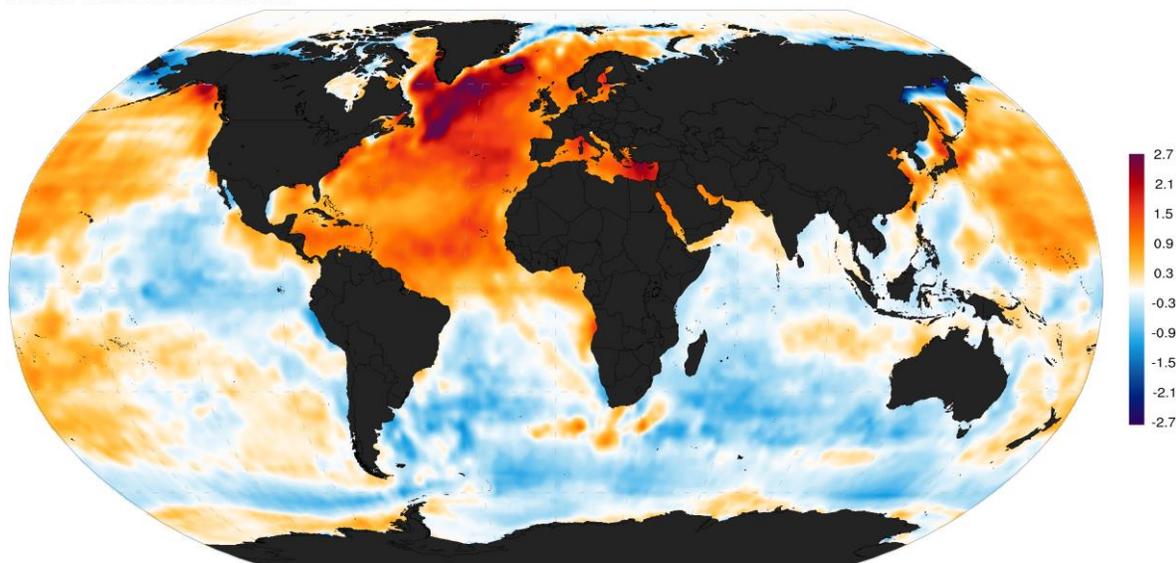


Figura 20. Muestra el patrón típico de una fase positiva de la AMO en donde la región del atlántico norte se encuentra con anomalías positivas de temperatura. Recuperado de <https://eos.org/research-spotlights/ocean-dynamics-may-drive-north-atlantic-temperature-anomalies> el 20 de abril de 2021.

Tabla 5. Correlación de variables meteorológicas y la AMO para ambas regiones del DCH, en donde MR (razón de mezcla) y TEMP (temperatura promedio). Valores en negritas representan significancia estadística $\geq 90\%$.

NDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-AMO	-0.21	0.17	-0.44
TEMP-AMO	0.07	0.23	-0.1
SDCH			
	ANUAL	VERANO	INVIERNO
MR-AMO	-0.06	0.25	-0.33
TEMP-AMO	0.14	0.31	-0.09

En la tabla 5, se muestran las correlaciones entre la temperatura y humedad vs AMO, en donde las correlaciones representan el valor neto, es decir, la consideración de ambas fases. De manera general se tiene que no existe una correspondencia clara, a excepción del NDCH en donde la humedad en invierno obtuvo una correlación negativa moderada y significativa al 95 %, lo cual indica que en invierno cuando se tiene una fase positiva (negativa) de la AMO las anomalías de humedad son negativas (positivas).

En el caso del SDCH, a pesar de que las correlaciones son significativas, limita realizar afirmaciones sobre la correspondencia entre las fases de la AMO y su impacto sobre las variables meteorológicas en dicha región, puesto que, al tener valores bajos de correlación, nos estaría indicando que muy pocas veces existe una correspondencia.

4.4 Anomalías Decadales

En las secciones anteriores se presentaron los resultados correspondientes a las correlaciones entre variables meteorológicas y oscilaciones, en donde dos ellas PDO y AMO, son oscilaciones de carácter decadal y multidecadal, respectivamente. Por consiguiente, se realizaron algunos cálculos de tipo decadal para observar cuál es la relación entre las variables meteorológicas - PDO y AMO.

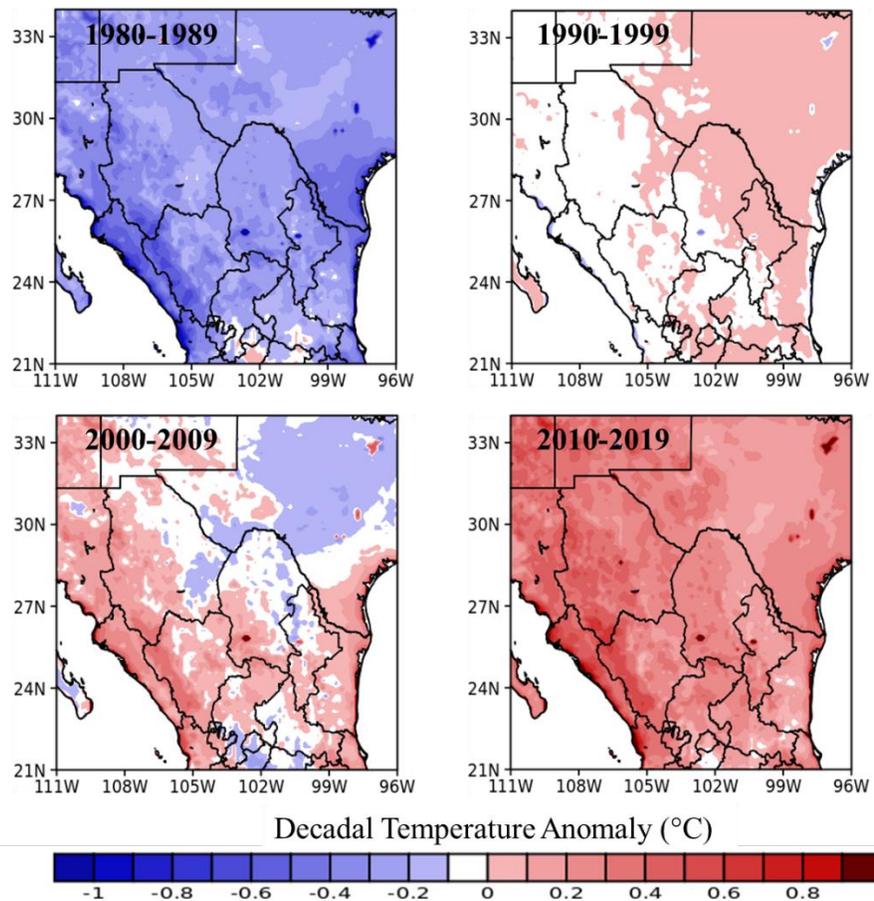


Figura 21. Anomalías decadales de temperatura del periodo 1980 – 2019.

Primero, se presenta la figura 21 que corresponde a las anomalías (respecto al periodo 1980 – 2019) de temperatura promedio a nivel decadal, en la que es notorio como las anomalías sobre el DCH pasan de negativas a positivas conforme avanza el tiempo. No obstante, se observa como en la primera década la anomalía negativa domina en todo el dominio mientras que en la última domina la positiva.

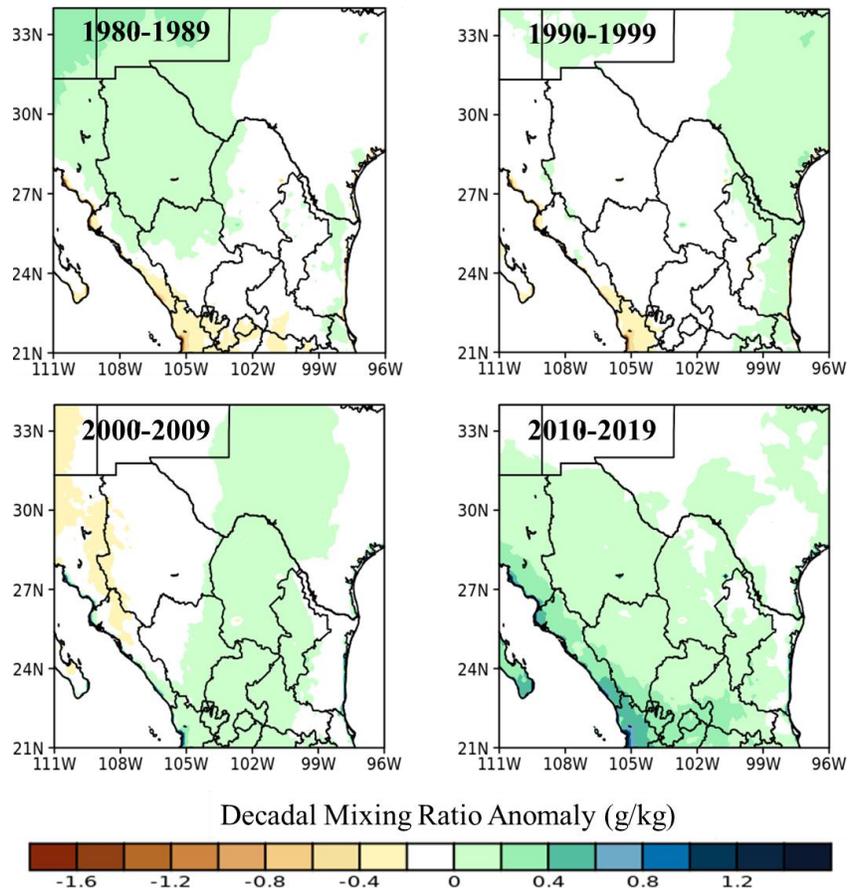


Figura 22. Muestra las anomalías de razón de mezcla a nivel decadal para el periodo 1980 – 2019.

La humedad (Fig. 22) muestra un comportamiento un tanto más variante que la temperatura, ya que en la primera década el NDCH se encuentra húmedo y el SDCH sin cambio. Posteriormente, la segunda década indica que no hubo cambio o que fueron muy pequeños, lo que puede ser considerado como una transición hacia la tercera década la cual ya muestra mayor humedad en el SDCH, pero menor en el NDCH. Finalmente, la última década fue húmeda para todo el DCH sugiriendo que ha habido un aumento de humedad a nivel decadal sobre el área de interés.

Así pues, resulta necesario establecer una correspondencia decadal con las oscilaciones AMO y PDO, con el objeto de conocer si las anomalías de temperatura y humedad están relacionadas con las fases de ambas oscilaciones. En consecuencia, nos referimos a la tabla 6, la cual muestra las correlaciones obtenidas para las dos regiones correspondientes al DCH. De esta manera, se tiene que la temperatura en ambas regiones del DCH está altamente correlacionada con la AMO

con un nivel de significancia del 95%, indicando una asociación directa en donde una fase positiva (negativa) de la AMO favorece décadas más cálidas (menos cálidas) sobre el DCH.

La AMO y PDO también modulan las condiciones de humedad a nivel decadal sobre el SDCH. En donde una fase positiva (negativa) de la AMO favorece condiciones húmedas (secas); y una fase positiva (negativa) de la PDO favorece condiciones secas (húmedas) sobre dicha región.

Tabla 6. Correlación de variables meteorológicas y las oscilaciones AMO y PDO para ambas regiones del DCH. Los valores resaltados en negritas indican correlaciones estadísticamente significativas $\geq 95\%$.

	NDCH		SDCH	
	AMO	PDO	AMO	PDO
TEMPERATURE	0.82	-0.65	0.92	-0.79
MIXING RATIO	0.24	0.11	0.95	-0.81

4.5 Tendencias

Los cambios de las variables meteorológicas deben de ser cuantificados con la finalidad de obtener un valor cuantitativo que indique en qué medida han aumentado o disminuido en un periodo de referencia, esto resulta ser de gran relevancia dentro de una zona en donde ciertos sectores puedan ser sensibles a cambios de temperatura o humedad, como lo pueden ser los cultivos, el ciclo hidrológico y el sector de energía, lo cual trae consecuencias en la vida de los humanos.

En la figura 23, se presenta la tendencia de temperatura y razón de mezcla promedio mensual, respectivamente. En ambos casos fue aplicada una regresión lineal simple; el caso de la temperatura (Fig. 23a) se observa que en el periodo trabajado la tendencia ha sido de aumento sobre el DCH con valores que van de los 0.2° a los 2.0° C. En particular, sobre la Sierra Madre Occidental se observan los mayores aumentos, no obstante, hay que recalcar que a pesar de que sobre esta región se tuvieron valores altos de sesgo, los de correlación también lo fueron lo

cual sugiere que de acuerdo con las simulaciones y CRU, la pendiente sería muy parecida. Por su parte, es notorio que la porción sur del dominio sobre Aguascalientes, norte de Jalisco y sur de Zacatecas existen tendencias negativas indicando que esa zona ha experimentado un enfriamiento durante los 40 años simulados. Un punto importante a observar en la tendencia de temperatura es que algunas ciudades muestran aumentos mayores a los 2.0° C, como lo son Monterrey, Saltillo, Chihuahua, Cd. Juárez – El Paso, por lo que se tiene que el modelo logra captar la señal de las islas de calor ya que en las inmediaciones de las ciudades las tendencias de temperatura son menores y muy contrastantes.

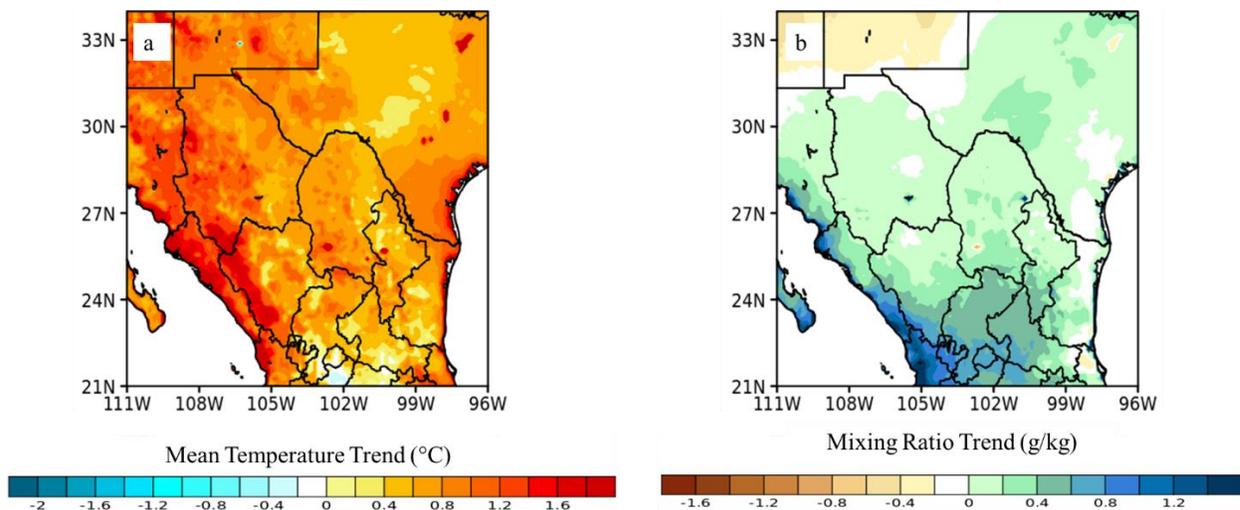


Figura 23. Muestra las tendencias espaciales en donde: (a) es la temperatura promedio (° C) y (b) la razón de mezcla promedio (g/kg). Los valores corresponden al cambio total para el periodo 1980 – 2019.

La tendencia de humedad (Fig. 23b) al igual que la temperatura, presenta un aumento sobre todo el DCH, sin embargo, este aumento está entre los 0.2 a 0.4 - 0.6 g/kg en el NDCH y SDCH, respectivamente. Lo anterior es consistente con el hecho de que la Celda de Hadley desciende alrededor de los 30° N creando una zona de subsidencia sobre el NDCH limitando y suprimiendo el desarrollo de nubes y precipitaciones. Mientras que la porción SDCH se encuentra lejos de dicha subsidencia. A su vez, se cuenta con las Sierras Madre Occidental y Oriental, las cuales bloquean el ingreso de humedad y por lo tanto la porción norte es menos

húmeda que la sur debido a que esta última se ve más favorecida por el ingreso de humedad.

El caso de la tendencia de la temperatura promedio es importante, sin embargo, es necesario mostrar cuáles han sido los cambios en las temperaturas máximas y mínimas. En consecuencia, se presenta la figura 24 en la cual se pueden observar las tendencias de estas variables. La tendencia de temperatura máxima (Fig. 24a) indica que esta ha aumentado en casi todo el DCH y en todo el dominio, a excepción de a porción sur que comprende parte de los estados de Zacatecas, Aguascalientes y Jalisco, en donde la tendencia es de disminución mismo efecto observado en la tendencia de la temperatura promedio.

La tendencia de temperatura mínima (Fig. 24b) muestra un efecto menos generalizado, es decir, existen regiones del DCH en las que hay tendencias de disminución o con cambios mínimos, por ejemplo, regiones del estado de Zacatecas, Durango y Chihuahua. Aunque de manera general los cambios son menores a 1.2°C , no obstante, existen regiones muy puntuales sobre el DCH en las que hay aumentos considerables de temperatura mínima.

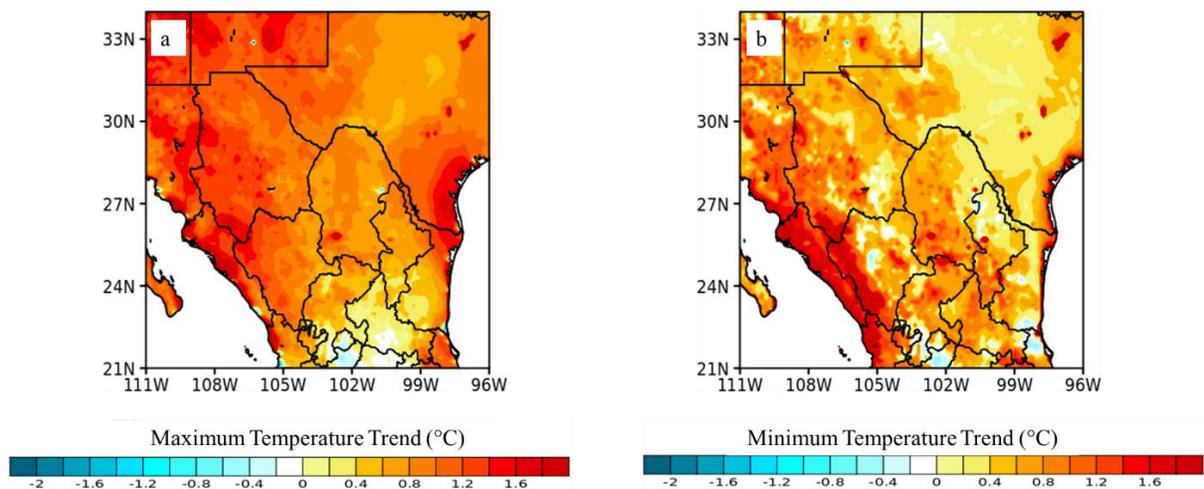


Figura 24. Muestra las tendencias espaciales en donde: temperatura máxima (a) y temperatura mínima (b). Los valores corresponden al cambio total de temperatura para el periodo de 1980 – 2019.

Al observar ambas variables, se encuentra que la temperatura mínima ha tenido un mayor aumento que la temperatura máxima sobre la Sierra Madre Occidental, esto resulta interesante ya que la temperatura mínima sobre esta región tiene sesgos pequeños y está altamente correlacionada con la temperatura de CRU, lo cual indica que de acuerdo a lo simulado y a los datos CRU, pudieran estar realmente aumentando estos valores. Además, el aumento de la temperatura máxima nos pudiera sugerir que la cantidad de días cálidos está aumentando, es decir, que la cantidad e intensidad de ondas de calor está aumentando sobre el DCH, o bien, pudiera ser que el cambio de uso de suelo está causando dicho calentamiento, ya que, parte del DCH ha experimentado cambios de vegetación primaria a agricultura, uso antrópico y pastizales cultivados (ver figura 6).

4.6 Tendencias estacionales

Hasta ahora han sido presentados los cambios promedios mensuales del ciclo anual, pero para poder captar esto con mayor detalle es necesario realizar las tendencias de la temperatura y humedad a nivel estacional. Para ello, se presentan las figuras 25 y 26 en las cuales se muestran las tendencias para el verano e invierno, respectivamente.

La figura 25a, muestra la tendencia de temperatura promedio de verano en donde es posible observar cómo esta variable ha aumentado sobre el DCH. Es importante señalar que las correlaciones obtenidas para verano entre las oscilaciones (ENSO, AMO y PDO) y temperatura, no mostraron tener una correspondencia clara, por lo que este calentamiento pudiera estar relacionado con algún otro factor u oscilación o bien, pudiera ser que este calentamiento es consecuencia del calentamiento global, aunque esto queda fuera del alcance de este trabajo.

La humedad (Fig. 25b) al igual que la temperatura, experimentó un aumento en este periodo y es interesante ver cómo la humedad sobre el NDCH parece ser bloqueada principalmente por la Sierra Madre Occidental. Mientras, que en el SDCH la humedad ha aumentado más. Estos aumentos pudieran estar relacionados con la intensificación del Monzón de América del Norte que afecta a estados como Chihuahua y Durango, también está la posibilidad de un aumento en la actividad

ciclónica tropical, así como en los sistemas convectivos de mesoescala y las oleadas de humedad del Golfo de California, todos estos son posibles fenómenos que pudieran estar causando el aumento de humedad sobre el DCH.

El efecto combinado del aumento de temperatura y de humedad es consistente ya que un mayor aumento de temperatura genera mayor evaporación y esto produce un aumento en el contenido de humedad en la atmósfera. Es preciso mencionar que un mayor contenido de vapor de agua no necesariamente denota un aumento de nubosidad (o precipitación) puesto que al existir un aumento de temperatura a la humedad le cuesta más trabajo alcanzar la saturación y como es bien sabido, el vapor de agua es el GEI más importante por delante del CO₂ y el CH₄, por lo tanto un mayor aumento de este gas durante verano pudiera ser el responsable del aumento de temperatura, o lo que es bien conocido como una retroalimentación positiva, aunque esto también queda fuera del alcance del trabajo.

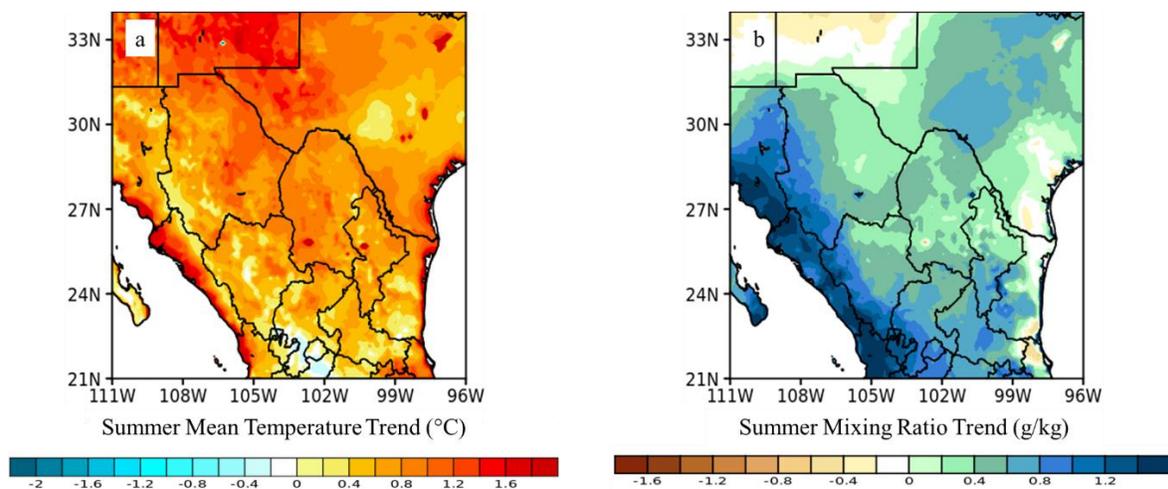


Figura 25. Muestra las tendencias espaciales de verano en donde: (a) es la temperatura promedio y (b) la razón de mezcla promedio, en ambos casos se consideraron los meses de JJA.

Las tendencias para el invierno se presentan en la figura 26, en donde la tendencia de temperatura promedio (Fig. 26a) indica que los cambios son menores sobre el DCH que en el resto del dominio, pues se observan valores que oscilan entre los 0.0° a 0.6° C. Incluso, existen tendencias negativas sobre el sur de los EUA, en

donde la temperatura está disminuyendo al igual que en regiones de Zacatecas, Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y San Luis Potosí. Por su parte, la tendencia de humedad (Fig. 26b) es negativa sobre todo el DCH lo cual indica una disminución en el contenido de humedad durante el invierno.

El efecto combinado de ambas variables sugiere que existe un aumento de temperatura sobre el dominio y también lo pudiera haber sobre las regiones oceánicas, sin embargo, para el caso de la humedad que indica una tendencia de disminución pudiera ser que no se tiene la influencia de vientos que pudieran transportar humedad del océano Pacífico hacia el continente. Además, dado que es época invernal los sistemas que están afectando esta región de México son los frentes fríos mismos que generan condiciones de fuertes vientos, descenso de temperatura y lluvias sobre el DCH. Por lo tanto, de acuerdo a la tendencia de temperatura promedio, podría existir la posibilidad de que los frentes fríos estén siendo más intensos sobre el sur de EUA mientras que sobre el DCH son menos intensos o pudiera ser que estos sean más intensos, pero menos frecuentes sobre dicha región.

Es necesario recordar que la humedad vs AMO en invierno obtuvo correlaciones negativas de bajas a moderadas y significativas sobre el DCH, lo cual indica que durante la fase positiva (negativa) se tienen condiciones secas (húmedas). Esta oscilación pudiera ser, en cierta medida, la responsable de dicha disminución considerando que en las últimas dos décadas la AMO ha mostrado fase positiva durante el invierno. Esto teniendo en cuenta que un menor contenido de humedad pudiera reducir el efecto invernadero durante invierno explicando porque la tendencia de temperatura es menor a la de verano sobre el DCH.

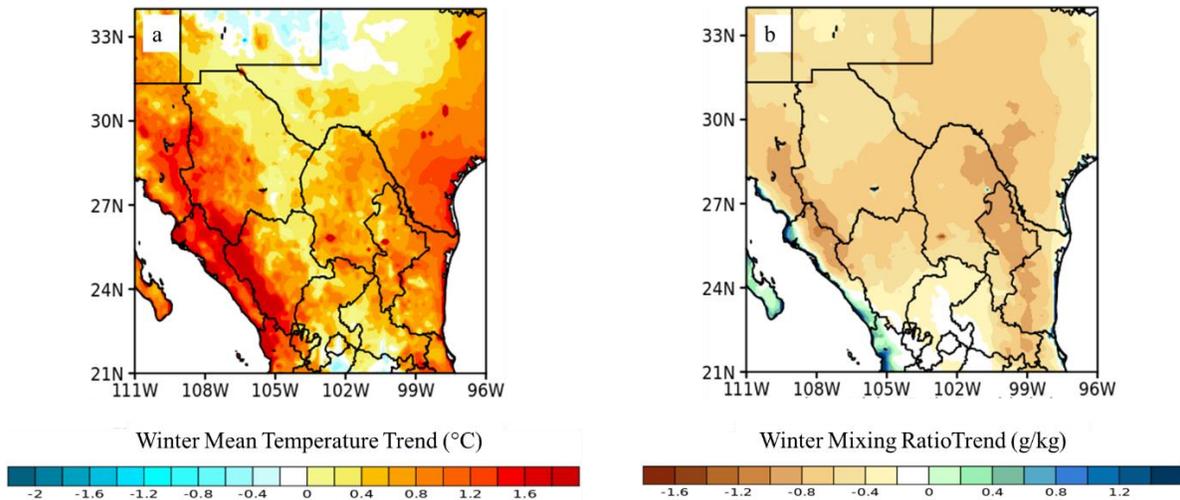


Figura 26. Muestra las tendencias espaciales de invierno en donde: (a) es la temperatura promedio y (b) la razón de mezcla promedio, en ambos casos se consideraron los meses de DEF.

4.7 Series de tiempo

Una vez analizados y detectados los cambios de temperatura y humedad sobre el DCH se procedieron a extraer de las salidas del WRF algunos puntos clave del dominio para obtener los cambios totales (pendiente) de dichas variables y establecer en qué puntos existe o no una tendencia, esto aplicando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. La figura 6 fue georreferenciada para identificar los puntos en los que ha habido un cambio de uso de suelo, principalmente aquellos cambios de vegetación primaria a campos de cultivos, así como puntos que corresponden a ciudades (Fig. 27).

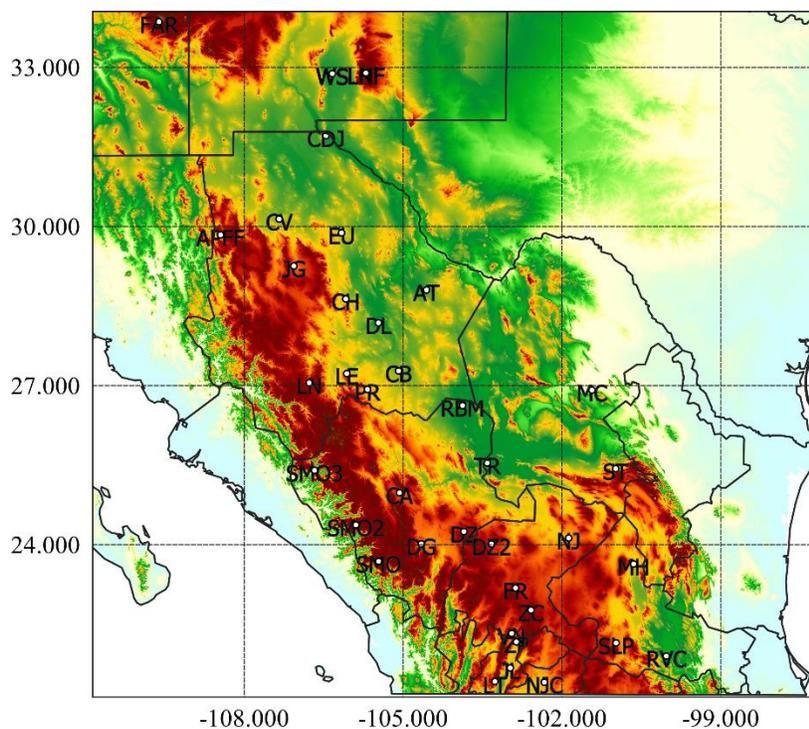


Figura 27. Distribución espacial de los puntos extraídos

A continuación, se presentan las series de tiempo para dos casos: el Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde y, Ciudad Juárez, los demás pueden ser consultados en el Anexo 2. La figura 28 corresponde a un punto que cae dentro de un área protegida en el estado de Chihuahua, esta área parece estar experimentando un aumento de temperatura significativo de acuerdo con lo indicado por la curva de tendencia. Dicho comportamiento de aumento se observa desde mediados de los ochentas, este aumento en principio no puede ser atribuido a un cambio en el uso de suelo, pues de acuerdo con el INECC del periodo 1976-2009 no ha habido un proceso de cambio sobre dicha región.

La figura 29 corresponde a Ciudad Juárez, Chihuahua, en donde también es evidente el aumento de temperatura promedio, pues como lo indica la curva de tendencia este calentamiento se ha observado desde mediados de los noventa y especialmente la curva comienza a ser más clara en los últimos 20 años que es cuando se realizó la actualización de uso de suelo, así que esto puede ser una consecuencia de una mayor mancha urbana pues como se mostró en el mapa de

tendencia (Fig. 23) se aprecia como esta ciudad tiene un fuerte contraste de temperatura con sus alrededores, lo cual indica que la isla de calor ha aumentado a medida que aumenta la mancha urbana y que también pudiera aumentar con el calentamiento global pues es bien conocido que el concreto tiene una inercia térmica elevada.

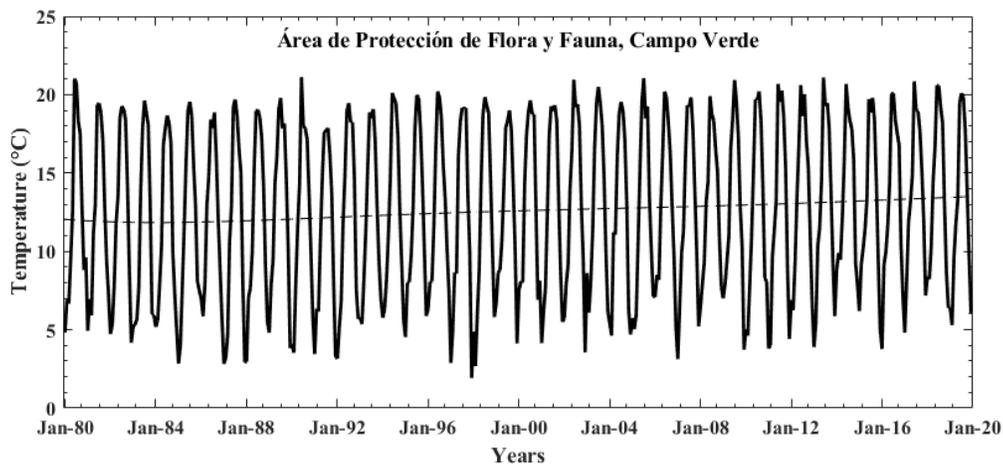


Figura 28. Muestra la serie de tiempo de temperatura promedio del periodo 1980 – 2019 para el punto extraído correspondiente al Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde.

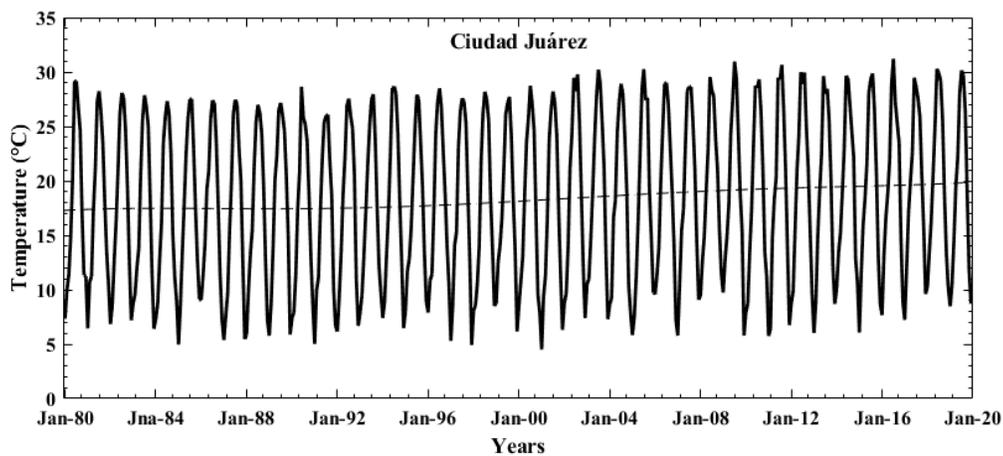


Figura 29. Muestra la serie de tiempo de temperatura promedio del periodo 1980 – 2019 para el punto extraído correspondiente a Ciudad Juárez, Chihuahua.

En la figura 30 se muestran los cambios de temperatura para aquellos puntos correspondientes a ciudades extraídos del dominio de estudio, en ella se presentan sólo los puntos en los que hubo significancia estadística, es decir, en donde la

tendencia y la pendiente fueron calculadas al aplicar un test no paramétrico Mann-Kendall y pendiente de Sen, respectivamente. Los cálculos de error pueden ser consultados en el Anexo 3 así como los cambios estacionales de temperatura; los resultados de humedad también se encuentran en el anexo. Por consiguiente, es posible observar cómo existe un contraste entre ciudades ya que ciudades como Chihuahua, Ciudad Juárez y Saltillo muestran un aumento de temperatura por arriba de los 2.0 °C en los 40 años de estudio, estos puntos son los mismos que se logran observar en el mapa de distribución horizontal de temperatura promedio, lo cual indica que existe una inercia térmica elevada en estas ciudades en comparación del resto, probablemente la falta de espacios verdes y el aumento de la mancha urbana esté causando que estas ciudades experimenten estos fuertes aumentos de temperatura en un periodo tan corto de tiempo y es que los datos observados también muestran este aumento significativo ya que se obtuvieron sesgos pequeños de temperatura a excepción de Saltillo con un sesgo frío de -2.0 °C, sin embargo en los tres casos la correlación es muy alta mayor a 0.97. Además, se tiene una disminución de humedad promedio mensual (a excepción de Saltillo que no mostró significancia estadística) en Ciudad Juárez y Chihuahua, esto sugiere que probablemente estas dos regiones se estén volviendo más áridas dado el aumento de temperatura y la disminución de humedad.

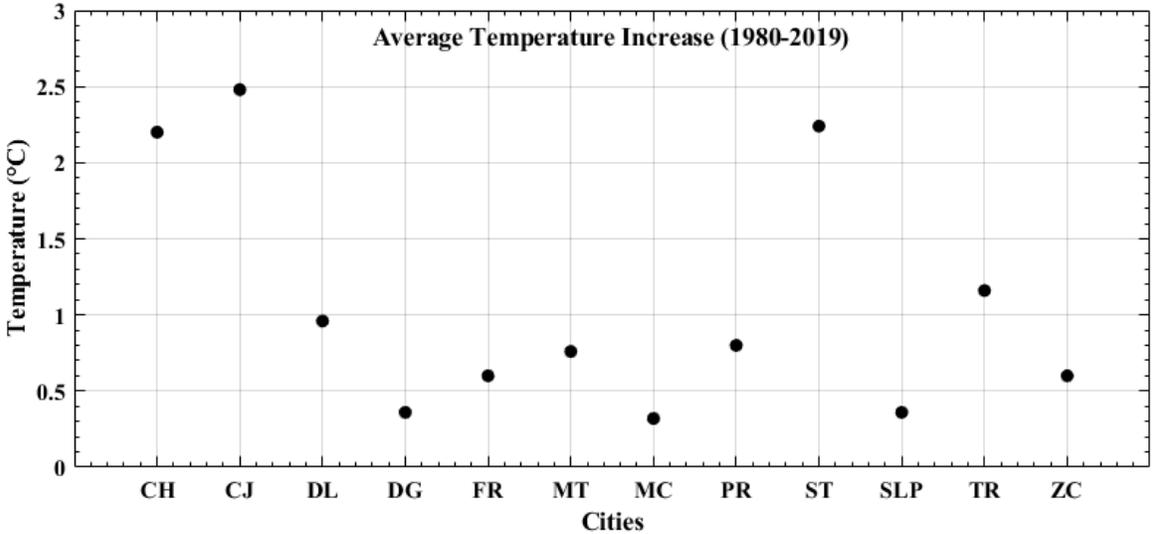


Figura 30. Muestra el aumento total de temperatura promedio para las ciudades situadas dentro del DCH, en donde: Chihuahua (CH), Cd. Juárez (CJ), Delicias (DL), Durango (DG), Fresnillo (FR), Matehuala (MT), Monclova (MC), Parral (PR), Saltillo (ST), San Luis Potosí (SLP), Torreón (TR) y Zacatecas (ZC).

El caso de los puntos sobre el campo es descrito en la figura 31, en donde se presentan los puntos que tuvieron significancia estadística. En este caso fueron seleccionados puntos en los que el uso de suelo ha cambiado y lugares en los que ha permanecido sin cambios según INECC, 2010. Un primer análisis surge al observar los mayores cambios que corresponden a los puntos Sierra Madre Occidental 1 (SMO1), Sierra Madre Occidental 3 (SMO3), Área de Protección de Flora y Fauna (ACV) y Lincoln National Forest (LNF), todos ellos con un aumento mayor a 1.5 °C, estos puntos (a excepción de LNF) corresponden a zonas sin cambio de vegetación de acuerdo con INECC, 2010, lo cual resulta interesante ya que este aumento pudiera estar relacionado a otro factor de carácter climático o bien, estar relacionado a cambio de uso de suelo por deforestación clandestina actividad reportada al menos sobre la SMO (Álvarez et al., 2007).⁴

Por otra parte, suelos que cambiaron a campos de cultivo como El Uno (EU), Durango-Zacatecas (DZ), Durango-Zacatecas 2 (DZ2), Colonia El Valle (CV), entre otros, han presentado un aumento de temperatura promedio en menor medida que los puntos discutidos previamente (SMO1, SMO3, ACV Y LNF). No obstante, de mantenerse en aumento pudieran afectar el desarrollo de las plantas de cultivo repercutiendo negativamente en la producción alimentaria, un tema importante sobre seguridad alimentaria. En contra parte, se tiene que en los Cultivos del Norte de Jalisco (NJC) existe una tendencia de disminución de temperatura promedio, máxima y mínima, siendo el único punto estadísticamente significativo lo cual resulta interesante pues dicho punto se encuentra en una zona que cambió a uso de suelo agrícola.

⁴ <https://www.elsoldeparral.com.mx/local/crimen-organizado-riesgo-para-bosques-tan-peligroso-como-la-sequia-tala-ilegal-municipios-incendios-forestales-noticias-parral-chihuahua-6760264.html>

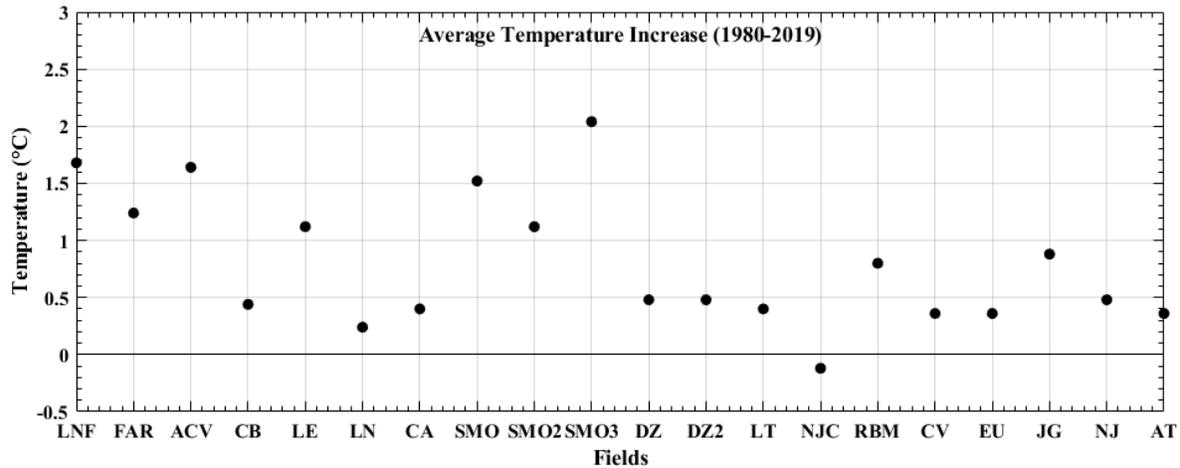


Figura 31. Muestra el aumento total de temperatura promedio para los puntos correspondientes a cultivos o reservas, situados dentro del DCH, en donde: Lincoln National Forest (LNF), Fort Apache Reservation (FAR), Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde (ACV), Colonia Búfalo (CB), La Estanzuela (LE), La Nopalera (LN), Campo Alto (CA), Sierra Madre Occidental (SMO), Sierra Madre Occidental 2 (SMO2), Sierra Madre Occidental 3 (SMO3), Durango-Zacatecas (DG), Durango-Zacatecas 2 (DZ2), Las Tablas (LT), Cultivos al Norte de Jalisco (NJC), Reserva La Biosfera Mapimí (RBM), Colonia el Valle (CV), El Uno (EU), Jagueyes (JG), Noria de Junco (NJ) y Atascaderos (AT).

Las tendencias de las series de tiempo extraídas coinciden con lo presentado por los mapas horizontales de tendencias los cuales fueron creados al aplicar un análisis de regresión lineal simple por lo que los puntos soportan dichas tendencias. Los cálculos estadísticos empleados en el análisis comparativo indican que en su mayoría existen sesgos pequeños de temperatura promedio, máxima y mínima, y en los casos que el sesgo es grande se tiene que las correlaciones son fuertes, lo cual indica que las pendientes de los datos simulados y observados, son muy parecidas (ver Anexo III, Tablas.8 – 11). En el caso de la humedad, se obtuvieron sesgos pequeños durante el ciclo anual y estacional, así como altas correlaciones sugiriendo que los valores simulados y observados son muy parecidos y que coinciden en el hecho de que la humedad experimentó un aumento a nivel anual y verano, y una disminución para invierno, lo anterior soportado por un nivel de significancia estadística $\geq 90\%$ (ver Anexo III Tablas. 12 – 13).

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

5.1 Distribución decadal de temperatura y humedad promedio sobre el DCH.

Las tendencias climáticas han sido estudiadas en México, por ejemplo, Cavazos, et al. 2018; Ruiz, et al. 2016; Santillán-Espinoza, et al. 2011; Pavia, et al. 2009. Cada uno de estos estudios ha relacionado el comportamiento de las variables meteorológicas a oscilaciones a partir de fuentes de datos provenientes de estaciones meteorológicas o de modelación climática regional (Cavazos, et al, 2018) haciendo uso de diversas fuentes de datos como condiciones iniciales. Sin embargo, ninguno de estos estudios ha enfocado su atención a examinar el DCH ni ha utilizado la base de datos ERA-5 para la modelación de clima regional.

Resulta de gran relevancia conocer que está sucediendo con esta región desértica de México a fin de identificar si ha habido cambios importantes lo cual fue previamente mencionado en la sección de resultados. Se ha encontrado que, de acuerdo con los datos observados del CRU y las modelaciones con el WRF, el DCH ha experimentado un calentamiento a nivel anual y estacional, pero dicho calentamiento no ha sido igual ya que en promedio el NDCH se ha calentado más que el SDCH. En el norte y sur del DCH cada década ha sido más caliente que la anterior (Fig. 31 – 32) lo cual ayuda a detectar los cambios mismos que fueron atribuidos a la AMO (Tabla. 6), pero sin aseverar que el calentamiento global ha sido responsable de dicho calentamiento.

El NDCH (Fig. 32) alcanza su máximo de temperatura promedio en los meses de junio a agosto mostrando que este máximo se ha incrementado en los últimos 40 años resultando en veranos más cálidos lo cual puede causar problemas importantes en la vida animal y vegetal, así como en el estilo de vida de los humanos que puede tener impactos en la disponibilidad de agua, mayor consumo de energía para satisfacer una zona de confort y/o problemas relacionados a la producción agrícola. Por otra parte, los meses más fríos corresponden a noviembre – febrero, época invernal que también ha experimentado un calentamiento respecto de la década de 1980. Esto indica que los días fríos pudieran estar disminuyendo y pudieran estar relacionados con la dinámica de los patrones atmosféricos típicos de

invierno, como la posición de la corriente en chorro más al norte provocando condiciones secas y cálidas en el DCH. Puesto que la entrada de humedad no favorece esta región, esto podría ser una probable explicación. Se han realizado diversos estudios (Previdi, M., y Liepert, B., 2007; Lu, J. et al, 2007; Kang, S., y Lu, J., 2012) en donde bajo escenarios de calentamiento global se analiza el comportamiento de dicha corriente, indicando que la Celda de Hadley se estaría expandiendo posicionándose sobre latitudes mayores. La disminución de humedad a nivel decadal durante el invierno es congruente con la figura 76 del Anexo IV.

El SDCH respecto del NCDCH (Fig. 33) muestra un comportamiento interanual menos cálido durante verano y menos frío en invierno. En principio la zona es menos árida lo cual tiene sentido si pensamos en la posición de la zona de subsidencia que se encuentra alrededor de los 30° N por lo tanto el SDCH no se ve afectado por la limitación del contenido de humedad y el aumento de calor debido a dicha subsidencia, sino que está relacionado a las cadenas montañosas que limitan el flujo de humedad a la región. No obstante, el SDCH muestra un comportamiento de verano diferente del NDCH presentando dos máximos de temperatura en junio y agosto, y un mínimo en julio, lo cual indica que durante junio y agosto existe cielo despejado que favorece la entrada de radiación, mientras que en julio disminuye, muy probablemente por la nubosidad que bloquea el ingreso de radiación, aquí las nubes pueden ser producto de sistemas convectivos de mesoescala (SCM). Lo anterior, sugiere que el calentamiento sobre SDCH ha ido en aumento a nivel década aumentando así la cantidad de calentamiento y muy probablemente la de SCM durante el verano partiendo del hecho que durante el verano ha habido un aumento de humedad sobre dicha región (Anexo IV, Fig. 77).

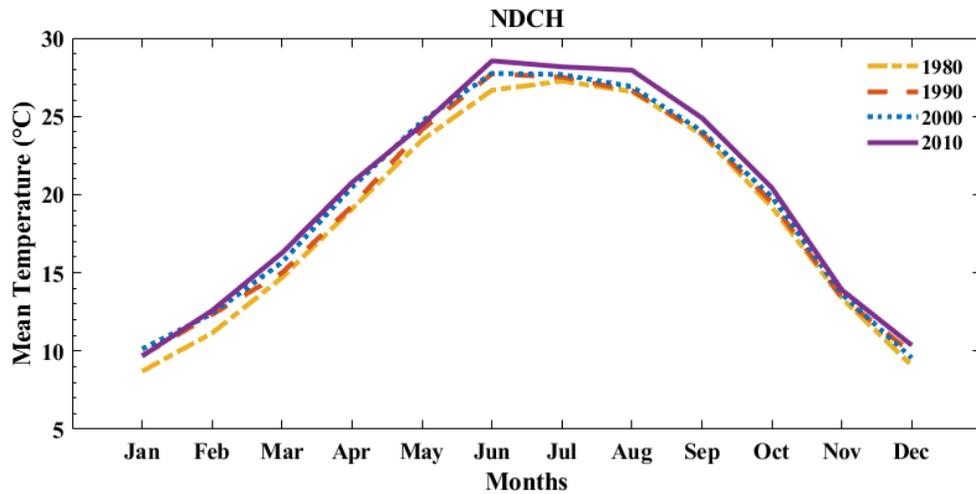


Figura 32. Muestra la distribución de temperatura promedio mensual de cada década para el NDCH.

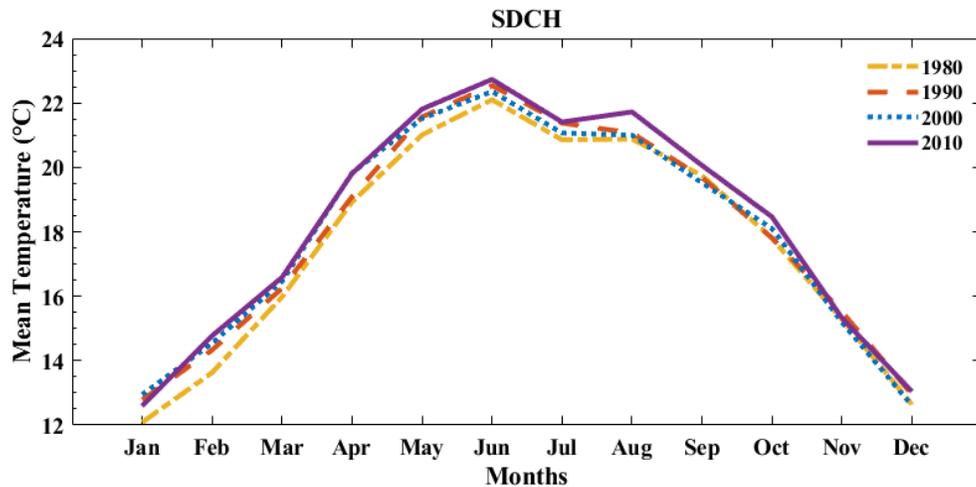


Figura 33. Muestra la distribución de temperatura promedio mensual de cada década para el SDCH.

5.2 Tendencias promedio sobre el NDCH y SDCH.

Los resultados presentados indican que ambas regiones del DCH han experimentado cambios. No obstante, estos han sido contrastantes y resulta necesario cuantificar en qué medida han cambiado la temperatura y la humedad promedio sobre estas regiones. Para ello, se presenta la Tabla. 7 en la cual es posible identificar que efectivamente el NDCH ha experimentado un mayor aumento de temperatura a nivel anual y de verano con una diferencia promedio de 0.32° y

0.44° C, respectivamente. Por su parte, la temperatura en el invierno indica un mayor aumento sobre el SDCH, aunque estos valores no obtuvieron un nivel de significancia estadística $\geq 90\%$.

La humedad (Tabla. 7) indica un mayor aumento sobre el SDCH a nivel anual y de verano, con una diferencia promedio de 0.48 y 0.56, respectivamente. Aunque, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall las tendencias son significativas sobre el SDCH y no sobre el NDCH. Durante el invierno el NDCH ha experimentado una mayor disminución de humedad que la porción sur, en donde la humedad sobre el NDCH ha disminuido en promedio -0.64 contra -0.48 sobre la porción sur, sin embargo, este último no presenta un nivel de significancia estadística $\geq 90\%$. Lo anteriormente descrito, coincide con lo reportado con las tendencias espaciales de humedad durante el invierno (Fig. 26).

Tabla 7. Muestra los cambios de temperatura y humedad promedio sobre el DCH a nivel anual y estacional al aplicar la prueba no paramétrica Mann-Kendall y obtener la pendiente de Sen. Valores en negritas indican un nivel de significancia estadística $\geq 95\%$

	NDCH		
	Anual	Summer	Winter
Temperature (° C)	0.8	0.96	0.12
Mixing Ratio (g/kg)	0.08	0.12	-0.64
	SDCH		
	Anual	Summer	Winter
Temperature (° C)	0.48	0.52	0.16
Mixing Ratio (g/kg)	0.56	0.68	-0.48

Así entonces, se sustenta el hecho de que efectivamente el DCH se ha calentando pues los datos de temperatura del CRU están de acuerdo con las simulaciones. Independientemente del sesgo (que suele ser mayor con la temperatura máxima) se logra captar la variabilidad interanual mostrando correlaciones altas, a excepción del invierno en donde estas son menores. Por esto último, es conveniente realizar una intercomparación de modelos, así como de datos observados a fin de establecer si todos están de acuerdo o si difieren entre sí. Además, resulta necesario señalar que lo encontrado está de acuerdo con lo reportado por el IPCC,

en donde la temperatura y la humedad (humedad relativa en descenso) irán en aumento conforme los GEI continúen incrementando en la atmósfera.

Una vez de acuerdo con el hecho de que existe un calentamiento se estableció que algunas oscilaciones tienen influencia a nivel anual o estacional sobre ambas regiones del DCH, sugiriendo que la región es sensible a los cambios de fase de cada oscilación. Por ejemplo, El Niño mostró una conexión con el SDCH durante el invierno, pero no mostró estar correlacionado con el NDCH. No obstante, la humedad en el NDCH está moderadamente correlacionada con la AMO durante el invierno, todo esto nos indica que cada región está influenciada de diferente manera, pues los mecanismos atmosféricos actúan de diferente modo, por ejemplo, el NDCH tiene mayor influencia de la corriente en chorro y, por ende, de los vientos subsidentes de la celda de Hadley. Mientras que, el SDCH llega a ser más húmedo y menos cálido debido a que la subsidencia es menor. Lo precedente, no resuelve la duda de si estos calentamientos se deben al calentamiento global, pues para afirmar esto es necesario realizar simulaciones variando las concentraciones de GEI en la atmósfera.

5.3 El ENSO y sus impactos en el Jet Stream

Un caso particular de gran relevancia para la región del DCH es la posición de la corriente en chorro pues se han documentado patrones típicos observados de dicha corriente durante el invierno bajo condiciones de El Niño y La Niña (Fig. 34). En donde, bajo condiciones de La Niña se tiene (no siempre) que la corriente en chorro se posiciona sobre latitudes más altas bloqueando el ingreso de humedad y frío, lo cual hace que el DCH en su porción norte sea afectado por aire seco. Por su parte, durante un evento de El Niño, esta corriente se encuentra más desplazada hacia el sur favoreciendo condiciones húmedas y frías sobre gran parte del DCH. Es necesario hacer énfasis en que estos patrones no se comportan de la misma manera cada que El Niño o La Niña ocurre, pues cada evento es diferente en magnitud e intensidad, pero estos patrones han sido los dominantes durante ambas fases del ENSO.

Los patrones típicos observados de la corriente en chorro bajo fases del ENSO y sus impactos en la humedad y temperatura pueden ser relacionados con las anomalías de invierno en las figuras 15 y 16. En donde es posible distinguir que en la mayoría de los eventos de La Niña gran parte del DCH se ve afectado por condiciones secas, mientras que en la mayoría de los eventos de El Niño se ve influenciado por anomalías frías de temperatura, lo cual concuerda con el comportamiento relacionado con la corriente en chorro. Lo anterior es congruente con las correlaciones encontradas sobre el SDCH durante eventos de El Niño y La Niña, a excepción de la humedad.

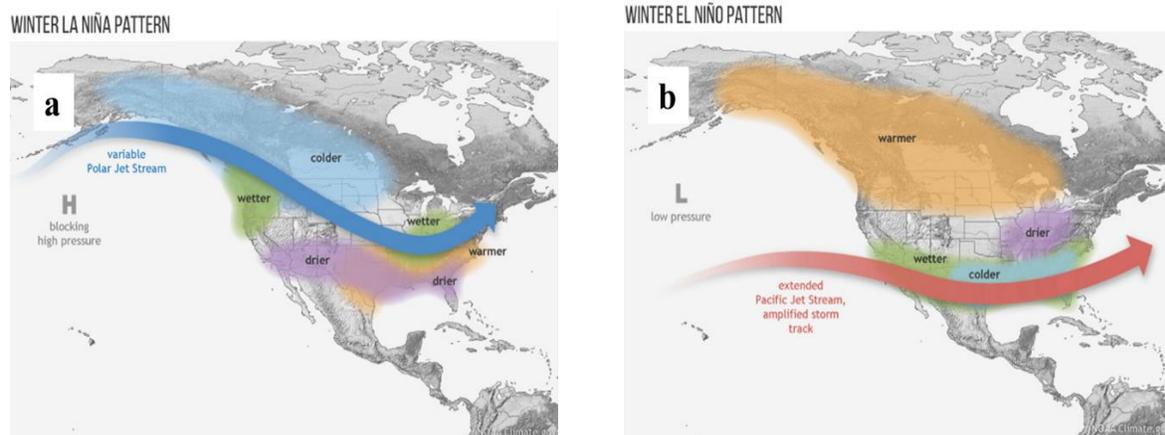


Figura 34. Muestra los patrones típicos observados de la corriente en chorro durante eventos de La Niña (a) y El Niño (b) así como sus impactos sobre la temperatura y humedad. Recuperada de <https://www.climate.gov/news-features/featured-images/how-el-niño-and-la-niña-affect-winter-jet-stream-and-us-climate> el 20 de abril de 2021.

5.4 Importancia de estudios de eventos extremos sobre el DCH

En la sección de resultados se presentaron los incrementos de temperatura promedio para ciudades y campos abiertos. No obstante, es importante conocer no solo los cambios promedios, sino los de temperatura máxima y mínima. Para ello, se presenta la figura 35, en la cual se muestran únicamente los aumentos totales de temperatura para las ciudades esto con el objeto de conocer e identificar cambios que pudieran estar afectando a la población considerando que todas estas personas se encuentran dentro del DCH y que al ser una región con clima cálido y árido,

podrían necesitar cada vez un mayor consumo de energía eléctrica para satisfacer sus necesidades de confort, al usar aires acondicionados y una mayor demanda de agua.

Cada uno de los problemas a enfrentar tienen que ser estudiados más a pormenor mediante estudios de eventos extremos como lo son: las ondas de calor, disminución de precipitación, disminución de días fríos y aumento de noches cálidas, etc., a fin de identificar si estos se han incrementado. De entrada, se muestra la figura 35, en la que se indican los cambios de temperatura para cada una de las ciudades en donde todos esos cambios corresponden a tendencias de aumento a excepción de la temperatura mínima en San Luis Potosí la cual presente una tendencia de disminución, aunque esta no es significativa estadísticamente. Todos los demás cambios son estadísticamente significativos de los cuales tres muestran los mayores aumentos: Chihuahua, Cd. Juárez y Saltillo tanto en temperatura promedio, máxima y mínima. Por tanto, resulta interesante investigar si en estas ciudades el consumo de energía y agua *per cápita* se ha incrementado durante los últimos años.

El incremento de temperatura mínima ha sido pequeño en comparación de la máxima mismas que superan los 1.0° C en todas las ciudades, esto resulta interesante ya que al hablar de promedios existen épocas en las que dichos aumentos pudieran ser aún mayores o menores, resaltando la importancia de trabajar con eventos extremos pues en el caso de la temperatura se pudiera analizar la tendencia de las ondas de calor durante primavera y verano que es cuando se alcanzan las mayores temperaturas sobre el DCH.

Cada uno de estos estudios de tendencia de eventos extremos resulta complementario para conocer la demanda de recursos que ha habido. Además, con los escenarios de cambio climático es posible calcular los índices de extremos y tener una noción de dichos eventos bajo diferentes escenarios para diferentes horizontes de tiempo. La finalidad de esto sería proporcionar la cantidad de aumento de temperatura durante el pasado inmediato y poner atención en las ciudades que mayor incremento han presentado, pues de continuar la tendencia el estilo de vida

de las personas podría verse afectada por el incremento o disminución de estos eventos. Desde luego, esto también aplica a los campos de cultivos en donde el aumento de noches cálidas, las heladas o sequías pueden afectar gravemente la productividad agrícola.

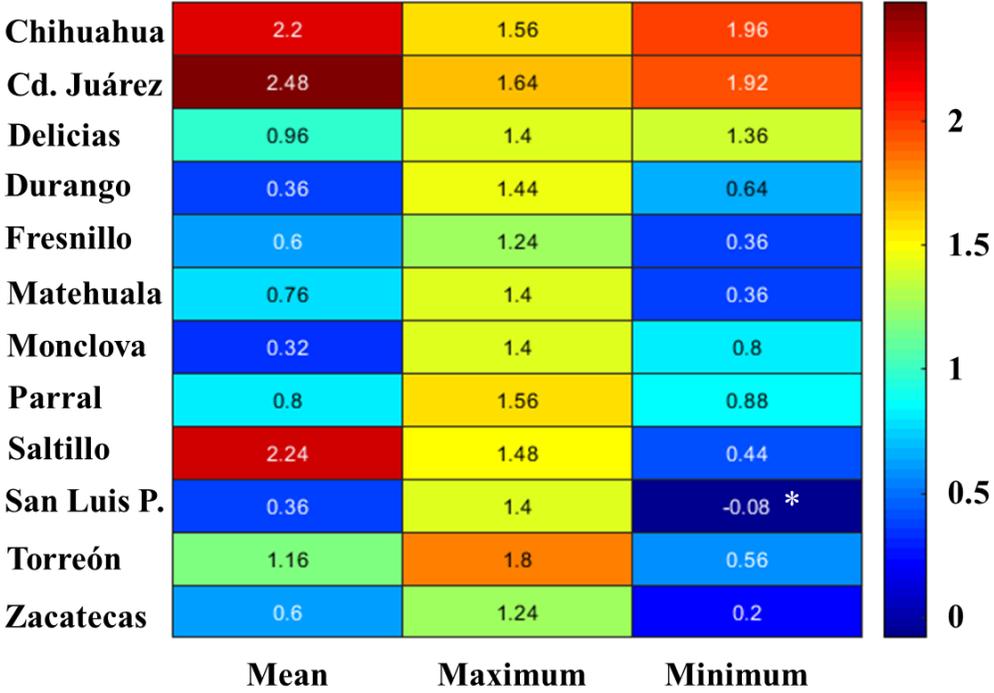


Figura 35. Muestra los cambios totales de temperatura promedio, máxima y mínima para las ciudades situadas en el DCH. Valores marcados con un (*) no son significativos estadísticamente.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Las simulaciones numéricas demostraron tener sesgos fríos sobre el DCH tanto en temperatura promedio y máxima, mientras que la mínima mostró tener sesgos cálidos pequeños. Además, el WRF tiende a subestimar los valores de temperatura promedio, máxima y mínima sobre regiones con topografía compleja. No obstante, todos los valores tienen alta correspondencia con los datos observados.

Las anomalías estacionales dejaron al descubierto una anomalía de temperatura positiva dominante en las últimas dos décadas, tanto para invierno como para verano. Por su parte, durante las últimas dos décadas las anomalías positivas de razón de mezcla han dominado durante verano y las negativas durante el invierno.

La correspondencia entre las variables meteorológicas y el ONI indican que a nivel interanual la razón de mezcla sobre el NDCH y SDCH está correlacionada de alta a moderadamente, respectivamente. Lo anterior indica que cuando el ONI es positivo (negativo) se suelen presentar condiciones húmedas (secas).

Durante verano e invierno El Niño y La Niña no parecen tener influencia sobre las condiciones de temperatura y humedad sobre el NDCH. Mientras que, la temperatura sobre el SDCH está correlacionada con eventos de El Niño presentando inviernos fríos, mientras que durante eventos de La Niña se suelen presentar inviernos cálidos. A su vez, la humedad está correlacionada con El Niño generando inviernos secos sobre el SDCH contradiciendo lo reportado por la NOAA.

A nivel interanual, La Oscilación Decadal del Pacífico mostró estar moderadamente correlacionada con la temperatura sobre el NDCH y SDCH, indicando que la temperatura es por arriba (abajo) de lo normal bajo una fase positiva (negativa). En tanto, sobre el NDCH la humedad indica estar moderadamente correlacionada con la PDO en donde una fase positiva favorece condiciones húmedas y viceversa.

La Oscilación Multidecadal de Atlántico mostró tener influencia sobre el comportamiento de la humedad de invierno en el NDCH, en donde una fase positiva (negativa) favorece condiciones secas (húmedas) sobre dicha región.

A nivel decadal se encontró que la PDO y AMO influyen en el comportamiento de la humedad sobre el SDCH, en donde la PDO - humedad muestran una relación opuesta y la AMO - humedad indican una relación directa. Por su parte, la AMO influye en el comportamiento de la temperatura sobre ambas regiones del DCH, sugiriendo una relación directa.

Se identificó que para el periodo 1980 - 2019 la tendencia de razón de mezcla, temperatura promedio, máxima, mínima sobre el DCH es de aumento a nivel anual. La humedad ha aumentado más sobre el SDCH que sobre el NDCH a nivel anual y durante el verano se ha incrementado más sobre el SDCH y, en ambas regiones ha decrecido en invierno. La tendencia de temperatura promedio revela un mayor incremento durante verano que durante invierno.

Los puntos extraídos correspondientes a ciudades muestran que todas han experimentado un incremento de temperatura máxima, mínima y promedio, teniendo que las temperaturas máximas presentan incrementos mayores a 1.0° C. Por su parte, la humedad a nivel interanual ha incrementado en todas las ciudades a excepción de las situadas sobre el estado de Chihuahua (Cd. Juárez, Chihuahua, Parral y Delicias) que exponen una tendencia de disminución.

Los puntos que pertenecen a campos de cultivos dentro del DCH exhiben un incremento de temperatura promedio no mayor a 1.0° C, por lo que esta tendencia de continuar, podría ser perjudicial para la producción agrícola, aunque lo anterior debe de ser estudiado desde un punto de vista de eventos extremos.

En cuanto a calentamiento, a nivel interanual y verano el NDCH se ha calentado más que el SDCH. Por su parte, el SDCH ha experimentado un mayor aumento de humedad durante el verano y el ciclo anual, pero durante el invierno el NDCH ha experimentado una mayor disminución de humedad que el SDCH. Lo anterior soportado por un nivel de significancia estadística $\geq 95\%$.

En ambas regiones del DCH la temperatura promedio decadal ha sido más caliente que la anterior. Por su parte, la humedad promedio decadal ha experimentado un mayor aumento durante junio – septiembre, en ambas regiones. Lo anterior de cierta

manera está modulado por la AMO, pues se demostró que a nivel decadal esta oscilación tienen un efecto dominante sobre la temperatura en el DCH y; para el caso de la humedad se tiene que esta se ve influenciada a nivel decadal por la AMO y PDO sobre el SDHC, mientras que el incremento de humedad sobre el NDCH parece estar condicionado a otras causas.

REFERENCIAS

- Adams, D. K., & Comrie, A. C. (1997). The north American monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10), 2197-2214.
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2021). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage learning.
- Álvarez, C. P., Álvarez, A. P., Quintana, R. M., & Martínez, M. (2007). Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra Madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*, 1(1), 36-43.
- Anderson, E. R., Cherrington, E. A., Tremblay-Boyer, L., Flores, A. I., & Sempris, E. (2008). Identifying critical areas for conservation: Biodiversity and climate change in central America, Mexico, and the Dominican Republic. *Biodiversity*, 9(3-4), 89-99.
- Brito-Castillo, L., Díaz Castro, S. C., & Ulloa Herrera, R. S. (2009). Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(2), 211-221.
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martinez, L. F., & Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396-1420.
- Contreras Servín, C. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones geográficas*, (56), 118-133.
- Dominguez-Dominguez, O., & Perez-Ponce de Leon, G. (2009). Is the Mesa Central of Mexico a biogeographical province? Descriptive analysis based on freshwater biotic components. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(3), 835-852.

- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K., & Reyes, S. (1993). The mexican monsoon. *Journal of Climate*, 6(8), 1665-1677.
- Endfield, G. H., & Fern, I. (2006). Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Climatic Change*, 75(4), 391-419.
- Escalante-Sandoval, C., & Amores-Rovelo, L. (2014). Análisis de tendencia de las variables hidroclimáticas de la Costa de Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1), 61-75.
- Farmer, G. T., & Cook, J. (2013). *Climate change science: A modern synthesis: Volume 1-The physical climate (Vol. 1)*. Springer Netherlands.
- Friedl, M., & Sulla-Menashe, D. (2015). MCD12C1 MODIS/Terra+ Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 0.05 Deg CMG V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Graef, F., & Pavia, E. G. (2014). Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Climate dynamics*, 42(3-4), 629-647.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Garcia, S. J. (2000). *Análisis de vulnerabilidad agropecuaria por sequía en el estado de Chihuahua*. Instituto de Ecología, Jalapa, Veracruz.
- Gramelsberger, G., & Feichter, J. (Eds.). (2011). *Climate change and policy: The calculability of climate change and the challenge of uncertainty*. Springer Science & Business Media.
- Granados-Sánchez, D., Sánchez-González, A., Granados Victorino, R. L., & Borja de la Rosa, A. (2011). Ecología de la vegetación del Desierto Chihuahuense. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 111-130.

- Ramírez, R. G., & Trujillo, T. R. (Eds.). (2012). Centro-Occidente de México: variación climática e impactos en la producción agrícola. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific data*, 7(1), 1-18.
- Hartmann, D. L. (2016). *Global Physical Climatology*. Amsterdam: Elsevier.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2018). ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
- Cuevas, M. L., Garrido, A. R. T. U. R. O., Pérez, J. L., & González, D. I. (2010). Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural. Cotler, H., coord. *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Semarnat, INE y Fundación G. Río Arronte IAP México, DF p, 96-103.
- INECC, 2018. *Diseño e implementación de medidas de adaptación al cambio climático en México. Resumen Informativo*. Ciudad de México
- IPCC, (2013). *What is a GCM?*. Recuperado el 24 de junio de 2020, de IPCC. http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & van Ypersele, J. P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 151). Ipcc.
- Kang, S. M., & Lu, J. (2012). Expansion of the Hadley cell under global warming: Winter versus summer. *Journal of Climate*, 25(24), 8387-8393.

- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate dynamics*, 37(3-4), 605.
- Liverman, D. M., & O'Brien, K. L. (1991). Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*, 1(5), 351-364.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L. W. M. J., & Merchant, J. W. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7), 1303-1330.
- Lu, J., Vecchi, G. A., & Reichler, T. (2007). Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(6).
- Méndez González, J., Ramírez Leyva, A., Cornejo Oviedo, E., Zárate Lupercio, A., & Cavazos Pérez, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones geográficas*, (73), 57-70.
- Magaña V., J. L. Pérez, J.L. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez, 1999. 2. El Niño y el clima. En: Los impactos de El Niño en México. En Magaña R.V.O. (Ed.). Sep-CONACYT. 229 pp.
- Magaña, V., Zermeño, D., & Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51(2), 171-184.
- Martinez-Austria, P. F., Bandala, E. R., & Patiño-Gómez, C. (2016). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 91, 20-26.
- Ozturk, T., Altinsoy, H., Türkeş, M., & Kurnaz, M. L. (2012). Simulation of temperature and precipitation climatology for the Central Asia CORDEX domain using RegCM 4.0. *Climate Research*, 52, 63-76.

- Pavia, E. G., Graef, F., & Reyes, J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(9), 1324-1329.
- Pérez Noyola, F. J. (2021). Efecto del calentamiento inducido en la supervivencia y crecimiento de epífitas: Evidencia experimental en *Tillandsia recurvata* (Bromeliaceae) en el sur del desierto Chihuahuense.
- Pool, D. B., Panjabi, A. O., Macias-Duarte, A., & Solhjem, D. M. 2014. Rapid expansion of croplands in Chihuahua, Mexico threatens declining North American grassland bird species. *Biological Conservation* 170: 274-281.
- Previdi, M., & Liepert, B. G. (2007). Annular modes and Hadley cell expansion under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(22).
- Quintero-Angel, M., Carvajal-Escobar, Y., & Aldunce, P. (2012). Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: intersecciones con la gestión del riesgo. *Revista Luna Azul*, (34), 257-271.
- Ruíz Álvarez, O., Espejel Trujano, D., Ontiveros Capurata, R. E., Enciso, J. M., Galindo Reyes, M. A., Quesada Parga, M. L., ... & Ruíz Corral, J. A. (2016). Tendencia de temperaturas máximas y mínimas mensuales en Aguascalientes, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE13), 2535-2549.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & dos Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily temperature extreme indices in Aguascalientes, Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1425-1445.
- RZEDOWSKI, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México, D. F. 432 p.
- Santillán-Espinoza, L. E., Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., García-Hernández, J. L., Cerano-Paredes, J., Delgadillo-Ruiz, O., & Valdez-Cepeda, R. D. (2011). Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(SPE2), 207-219.

- Schicker I., Delia Arnold, Petra Seibert (2011a): Updating the currently available landuse data in WRF: impacts on simulations for the Austrian Inn Valley. In: NCAS (Hrsg.) and Met Office (Hrsg.), International Conference on Alpine Meteorology, Aviemore, Scotland, UK.
- Sertel, E., Robock, A., & Ormeci, C. (2010). Impacts of land cover data quality on regional climate simulations. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1942-1953.
- A DESCRIPTION OF THE ADVANCED RESEARCH WRF VERSION 3. Smirnov, B. M. (2020). *Global Atmospheric Phenomena Involving Water: Water Circulation, Atmospheric Electricity, and the Greenhouse Effect*. Springer Nature.
- TEJEDA-MARTÍNEZ, A. D. A. L. B. E. R. T. O., Conde-Álvarez, C., & Valencia-Treviso, L. E. (2008). Climate change scenarios of extreme temperatures and atmospheric humidity for México. *Atmósfera*, 21(4), 357-372.
- Thomas, N., & Nigam, S. (2018). Twentieth-century climate change over Africa: Seasonal hydroclimate trends and sahara desert expansion. *Journal of Climate*, 31(9), 3349-3370.
- Vidal, R. (2005). *Las regiones climáticas de México. Temas selectos de Geografía de México*. Instituto de Geografía, UNAM: Ciudad de México, México.
- Warner, T. T. (2011). *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge University Press.
- Wilks, D. S. (2006). *Métodos estadísticos en las Ciencias Atmosféricas*. Oxford: Elsevier.

ANEXOS

Anexo I. Correlación y BIAS

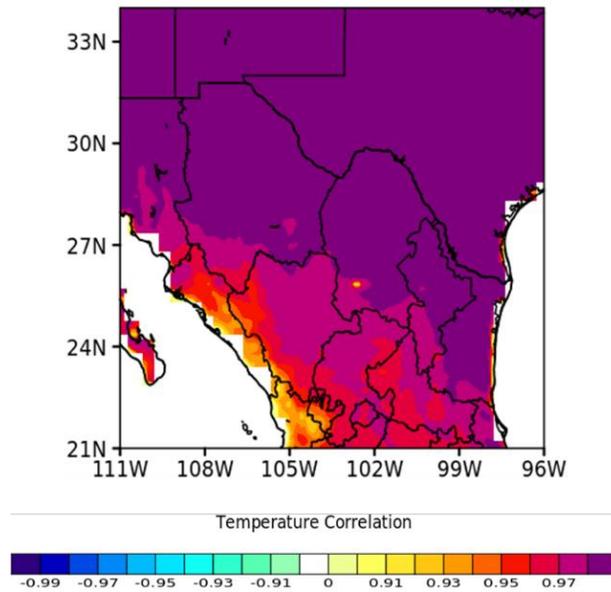


Figura 36. Correlación de temperatura promedio mensual entre simulaciones y CRU TS v4.04.

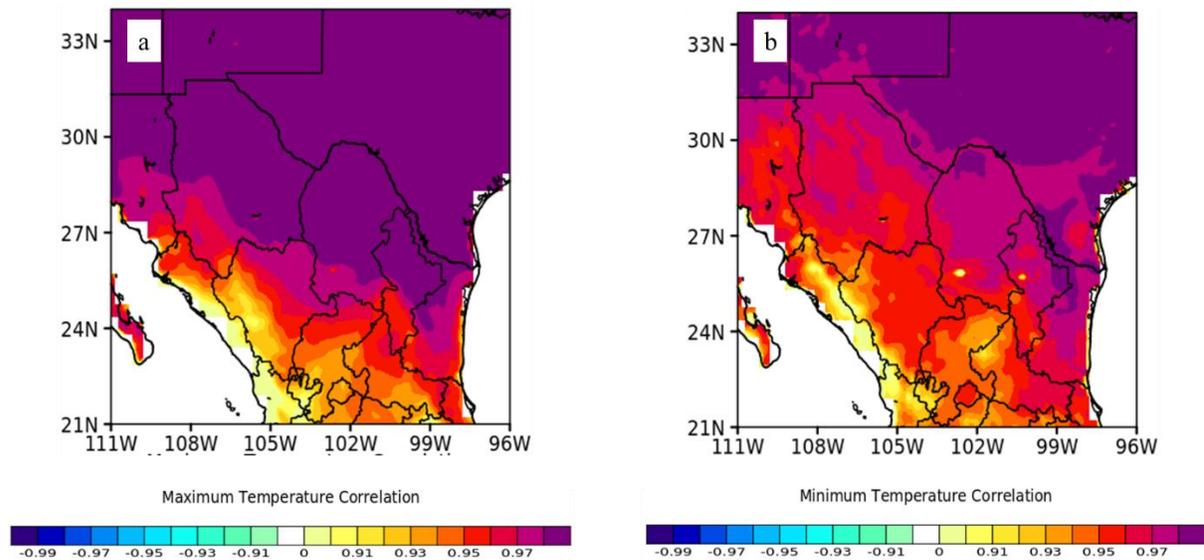


Figura 37. Correlación de temperatura máxima [a] y mínima [b] promedio mensual entre simulaciones y CRU TS v4.04.

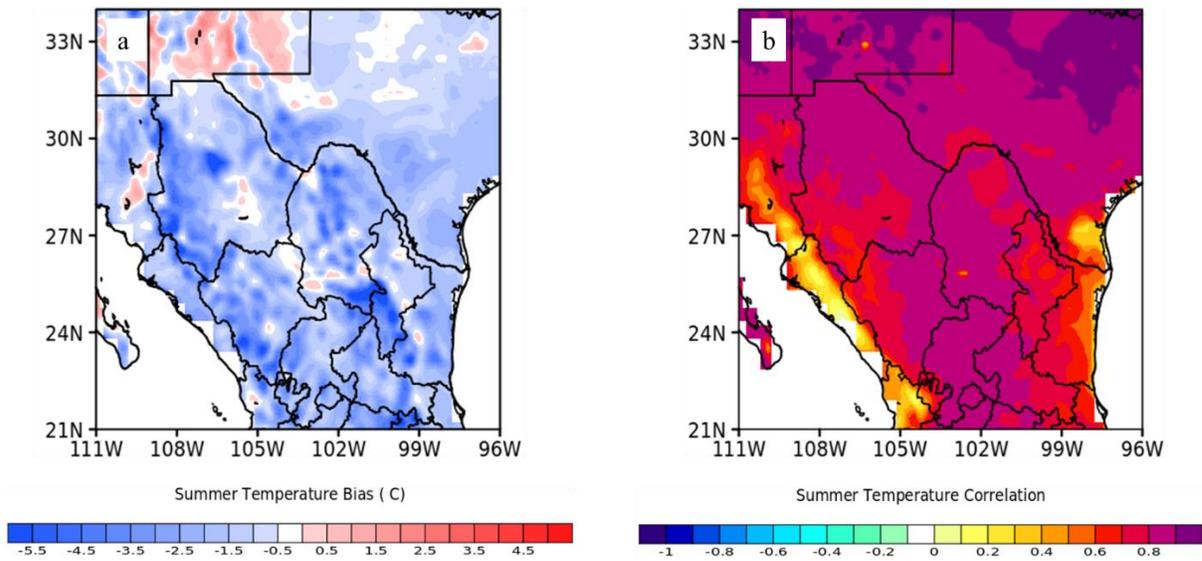


Figura 38. Muestra el sesgo de temperatura promedio mensual para verano [a] y su correlación [b] entre lo simulado y CRU TS v4.04.

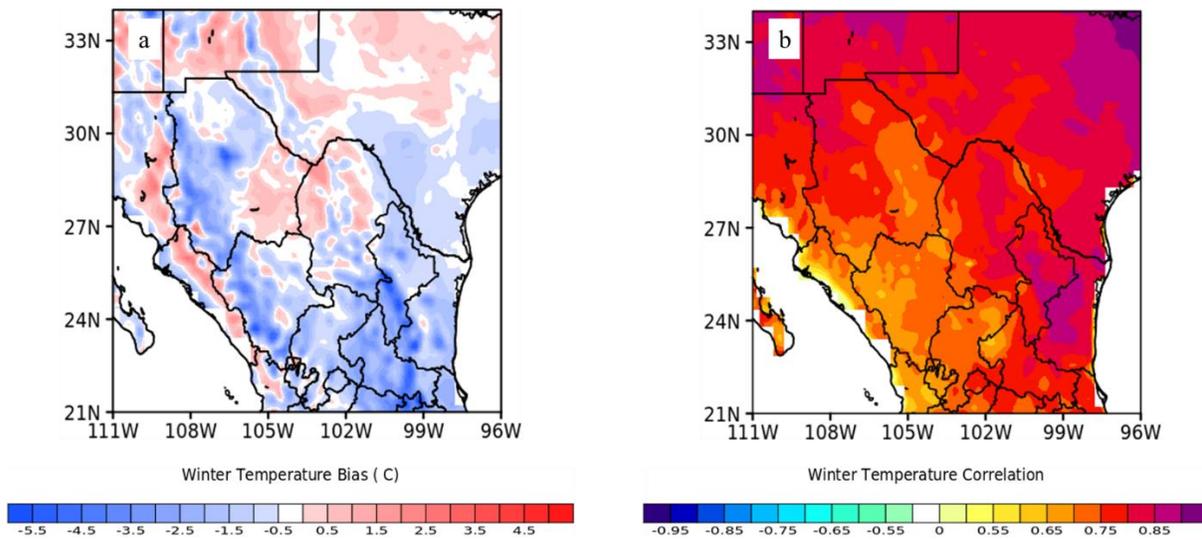


Figura 39. Muestra el sesgo de temperatura promedio mensual para invierno [a] y su correlación [b] entre lo simulado y CRU TS v4.04.

Anexo II. Series de tiempo

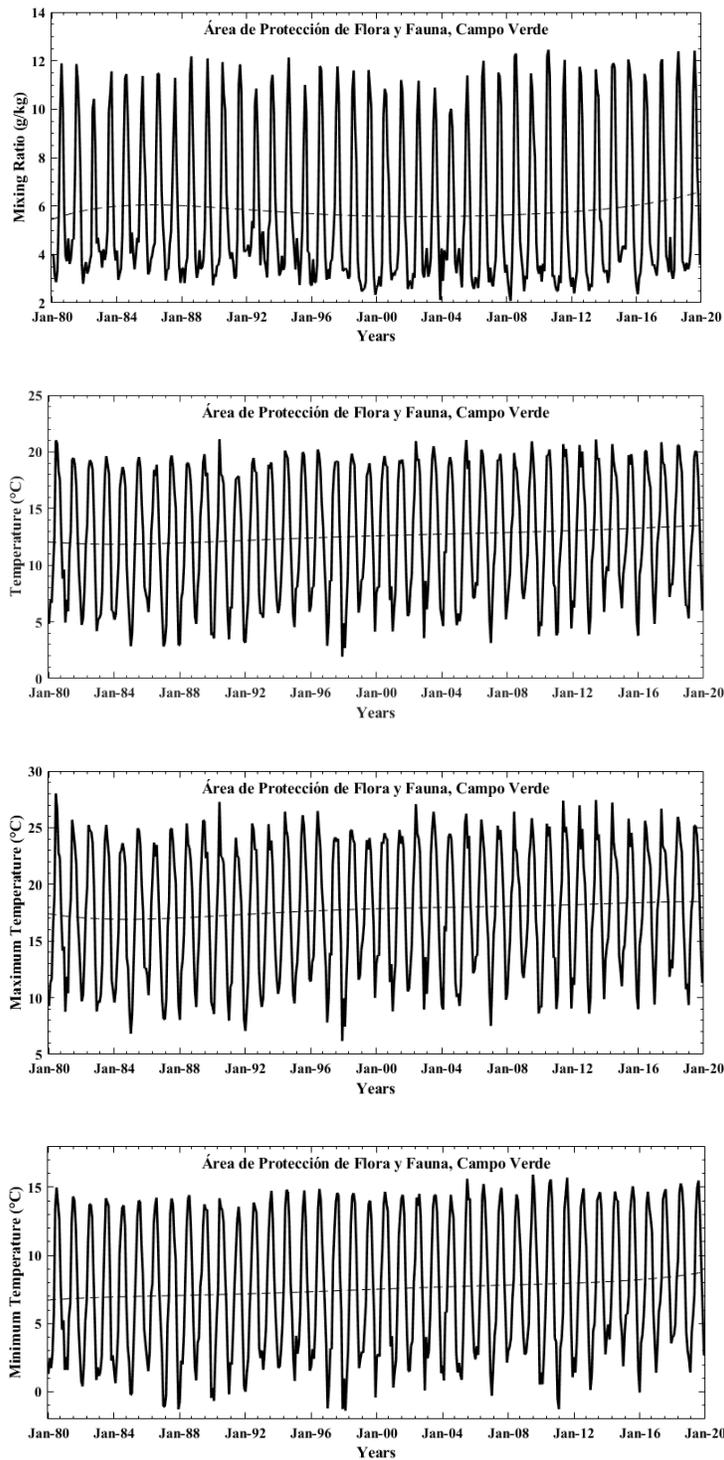


Figura 40. Área de Protección de Flora y Fauna, Campo Verde, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

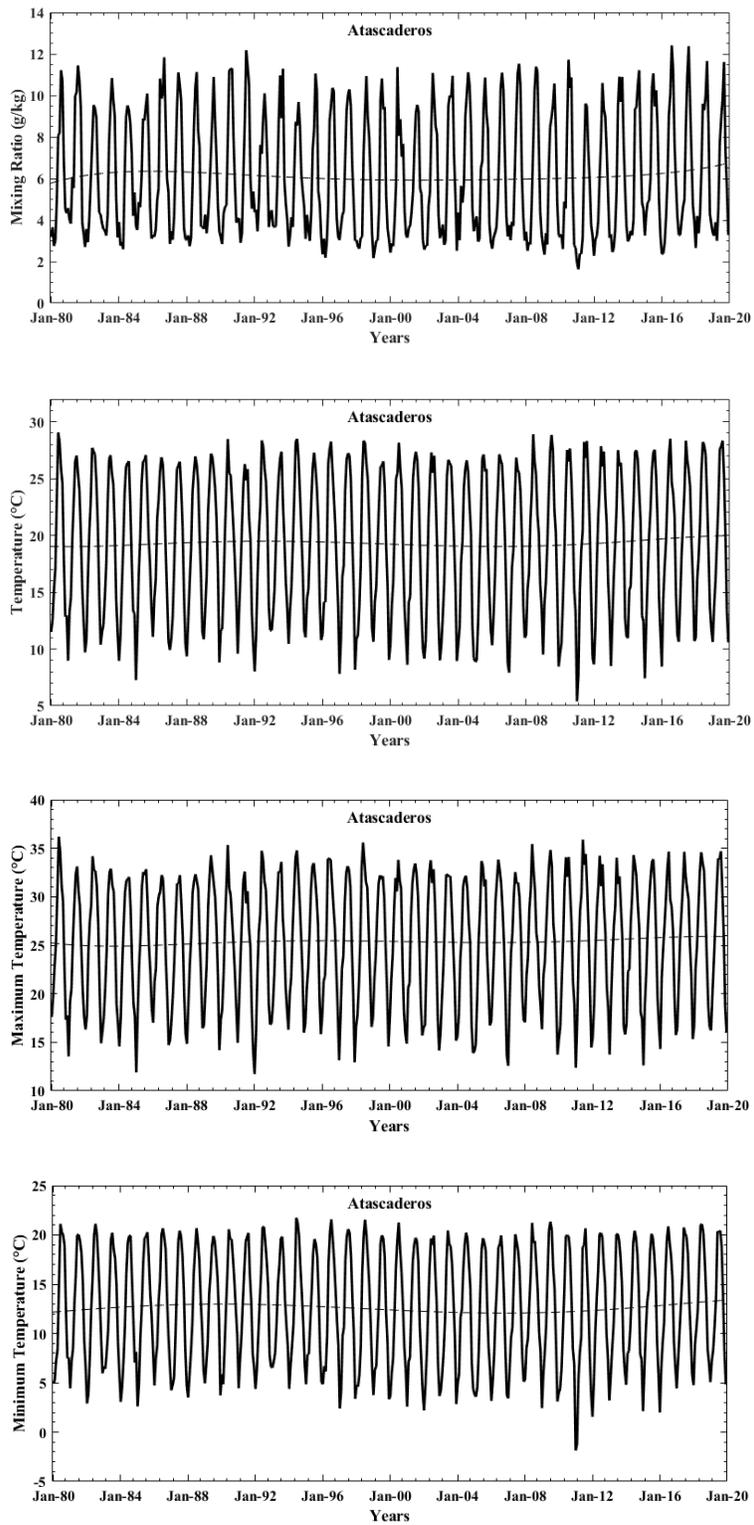


Figura 41. Atascaderos, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

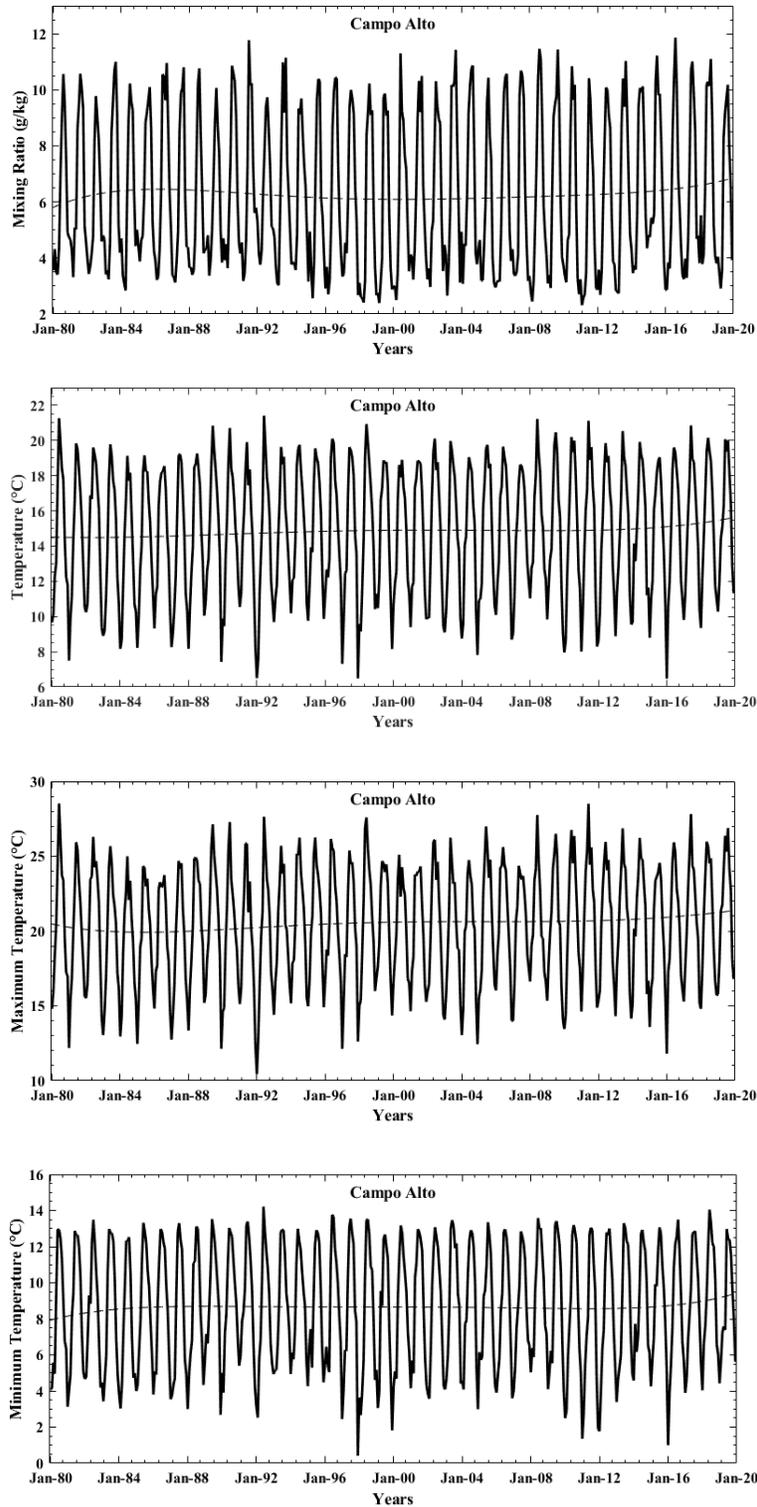


Figura 42. Campo Alto, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

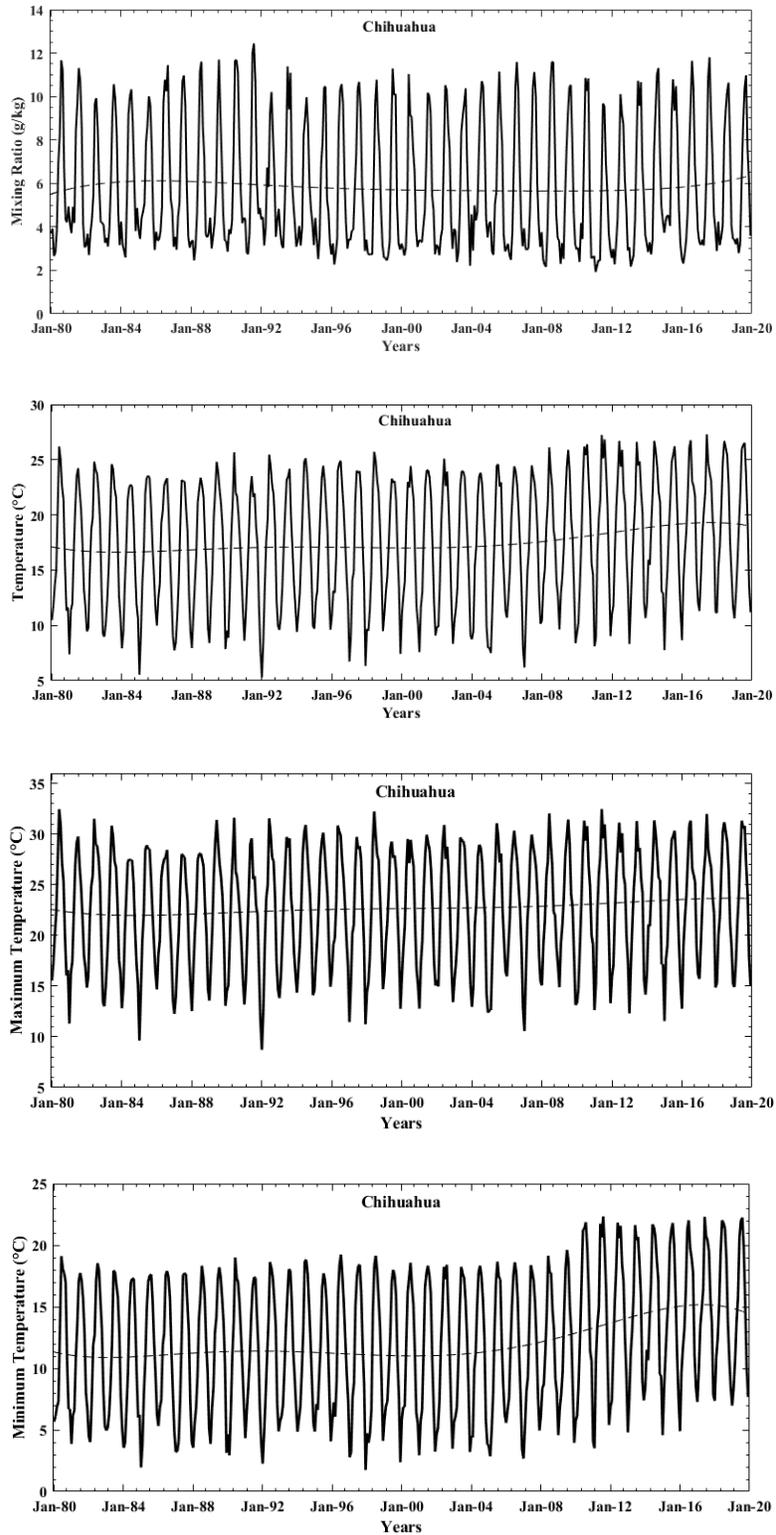


Figura 43. Chihuahua, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

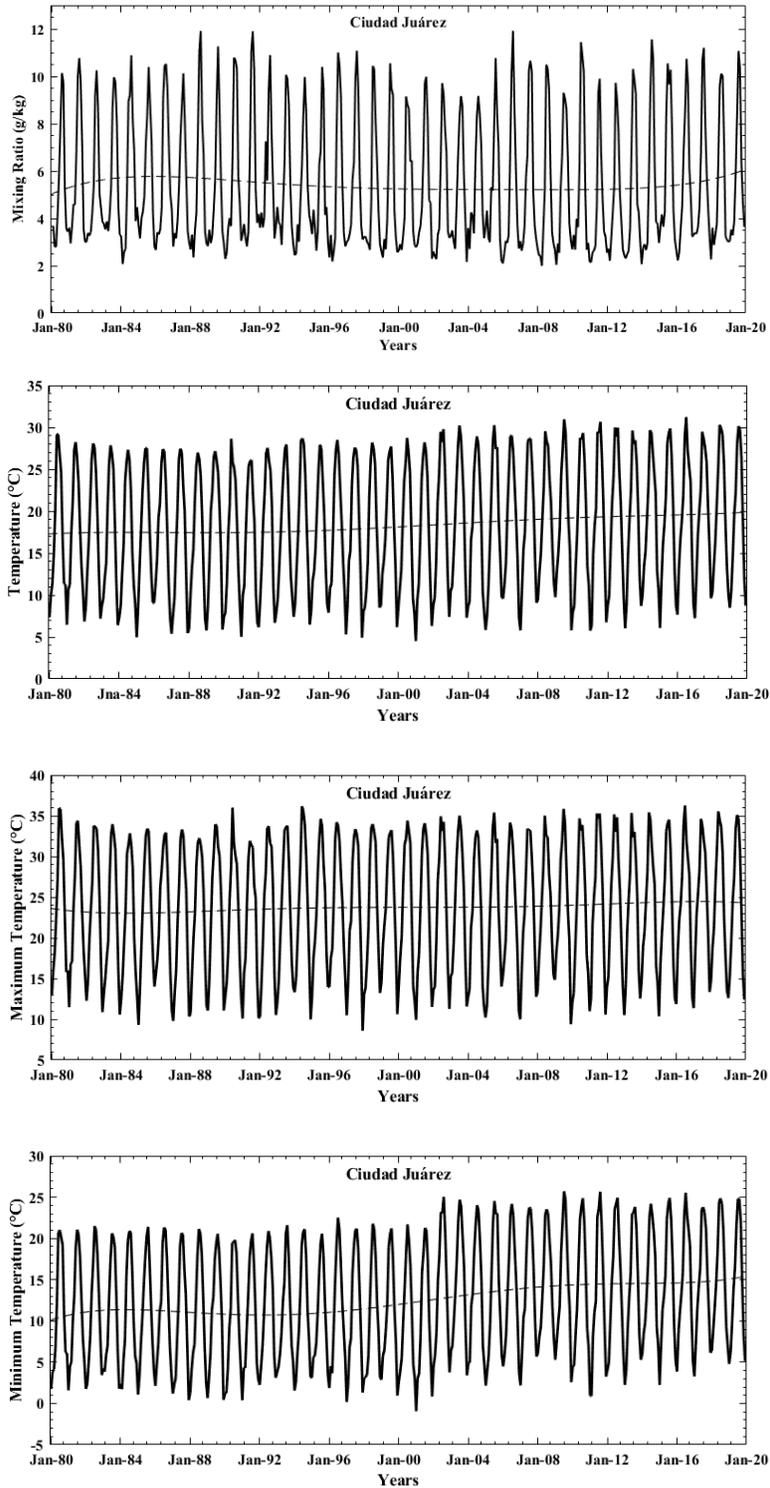


Figura 44. Ciudad Juárez, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

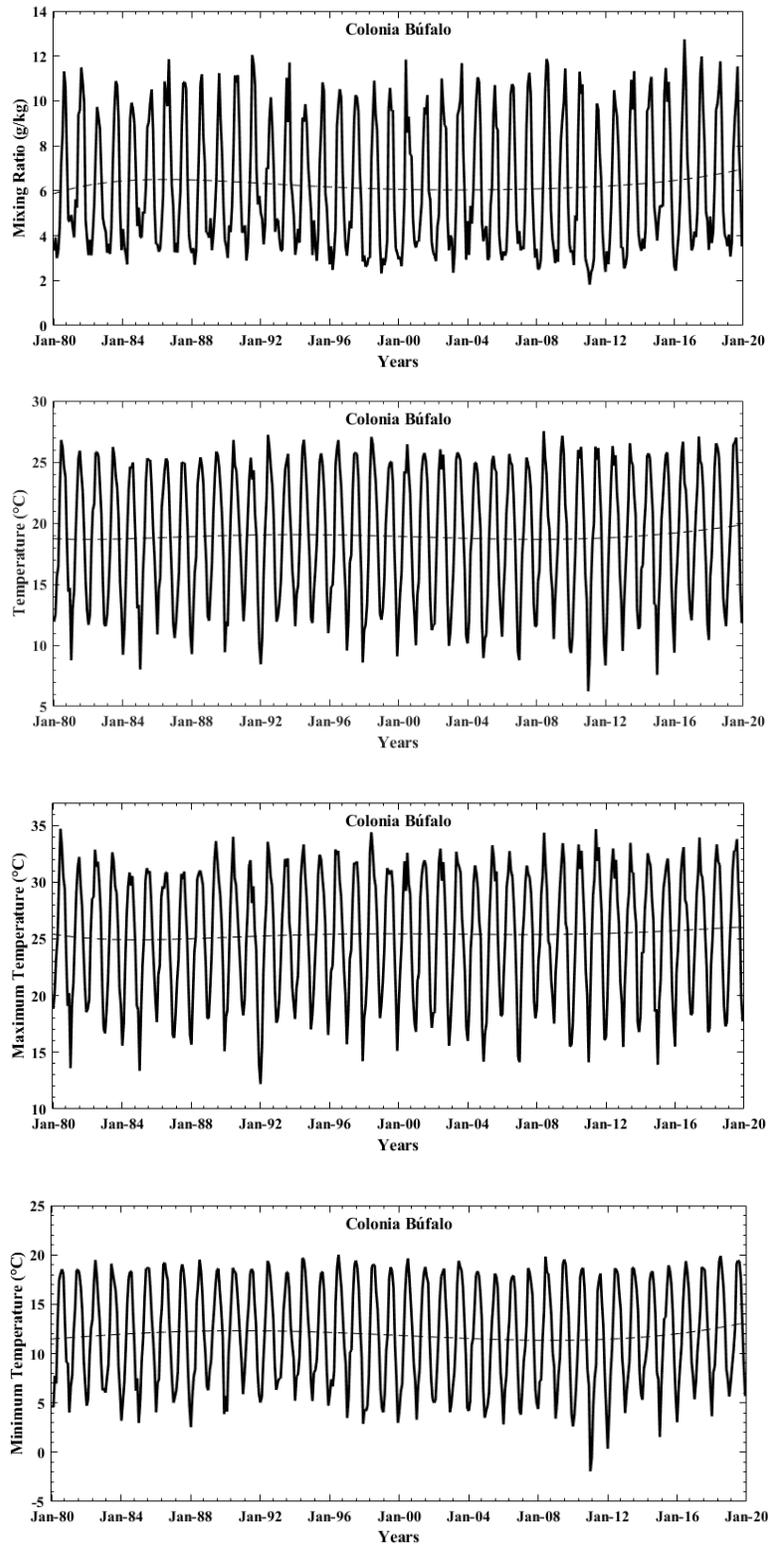


Figura 45. Colonia Búfalo, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

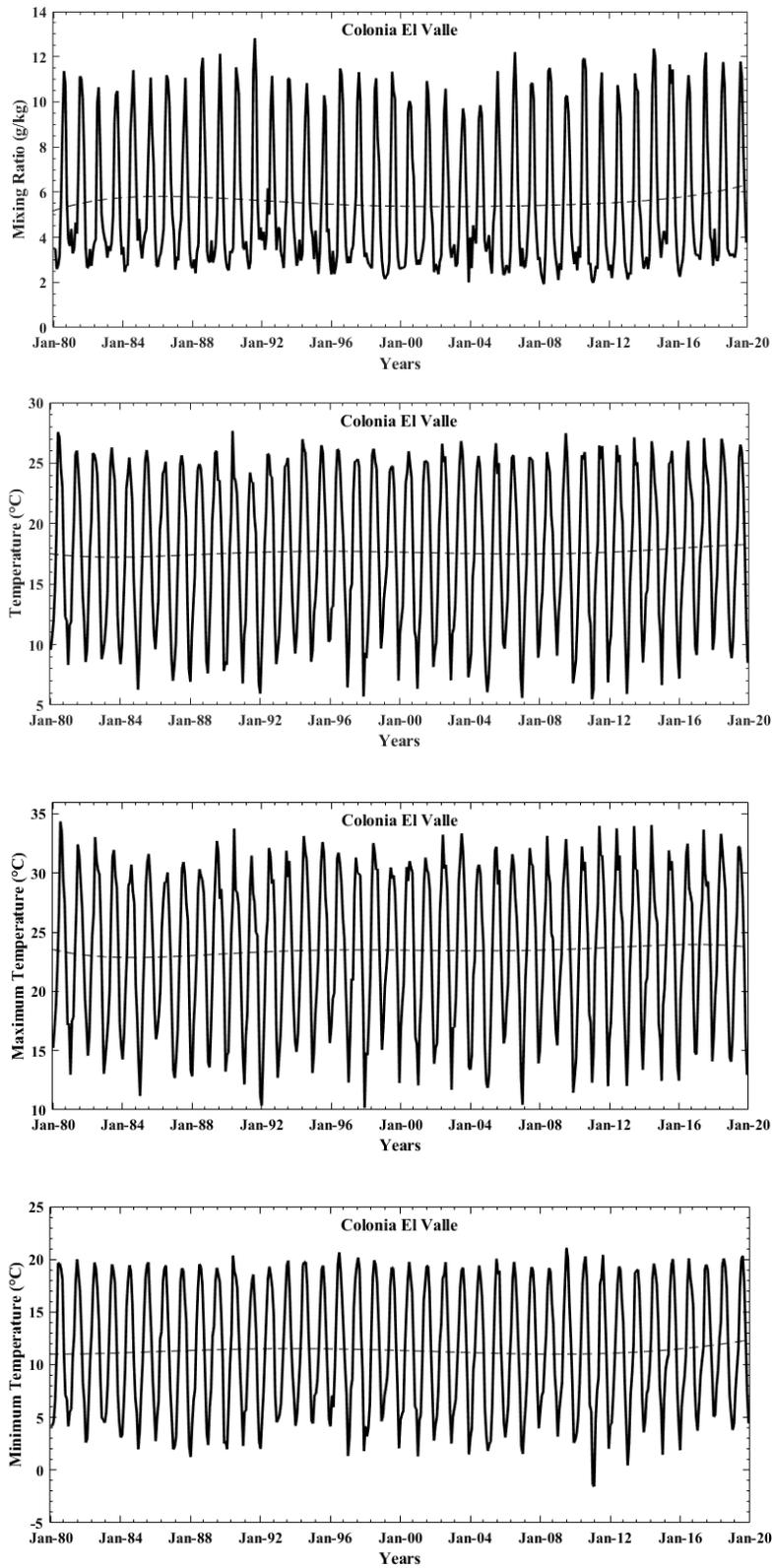


Figura 46. Colonia El Valle, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

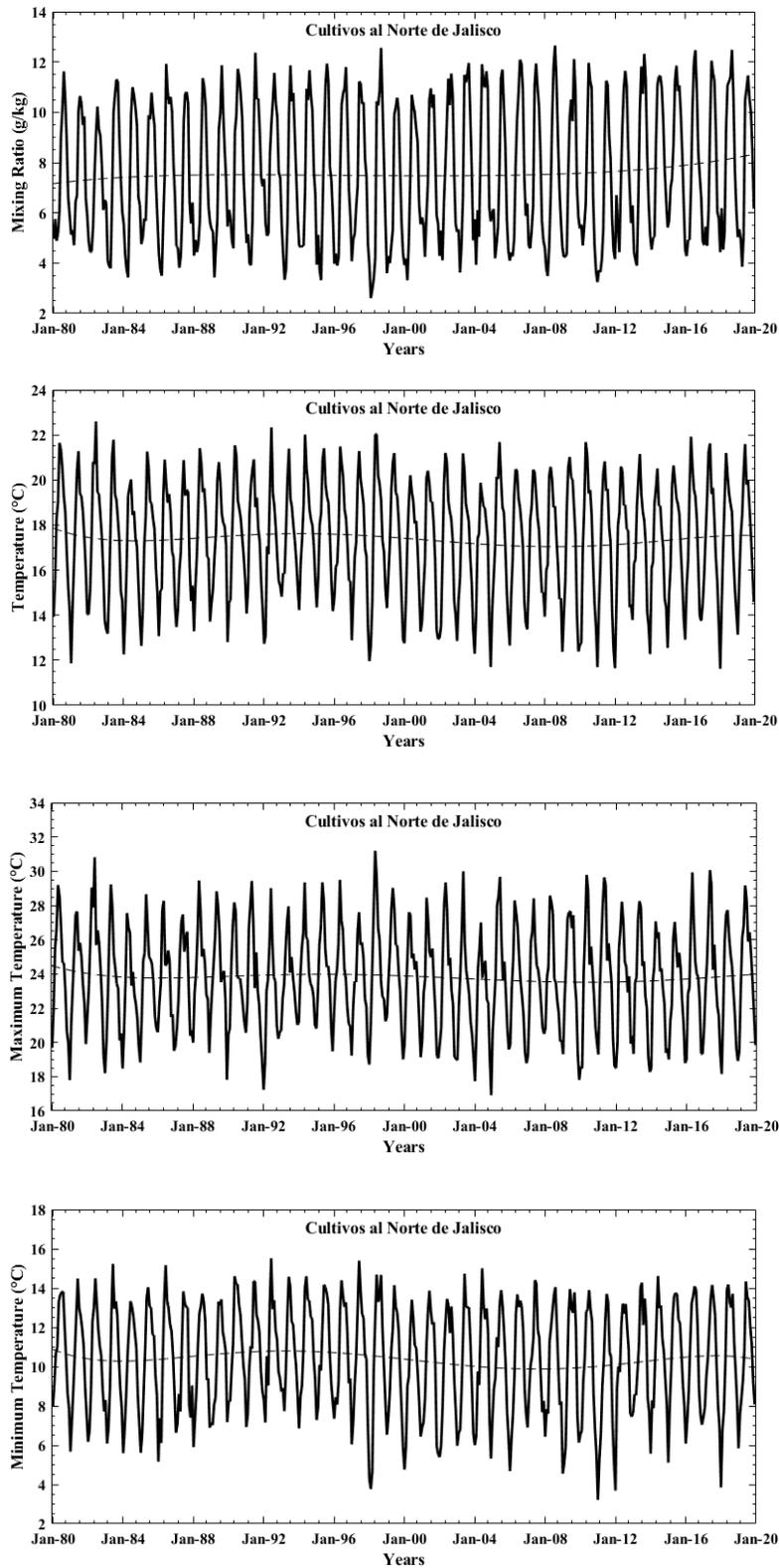


Figura 47. Cultivos al Norte de Jalisco, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

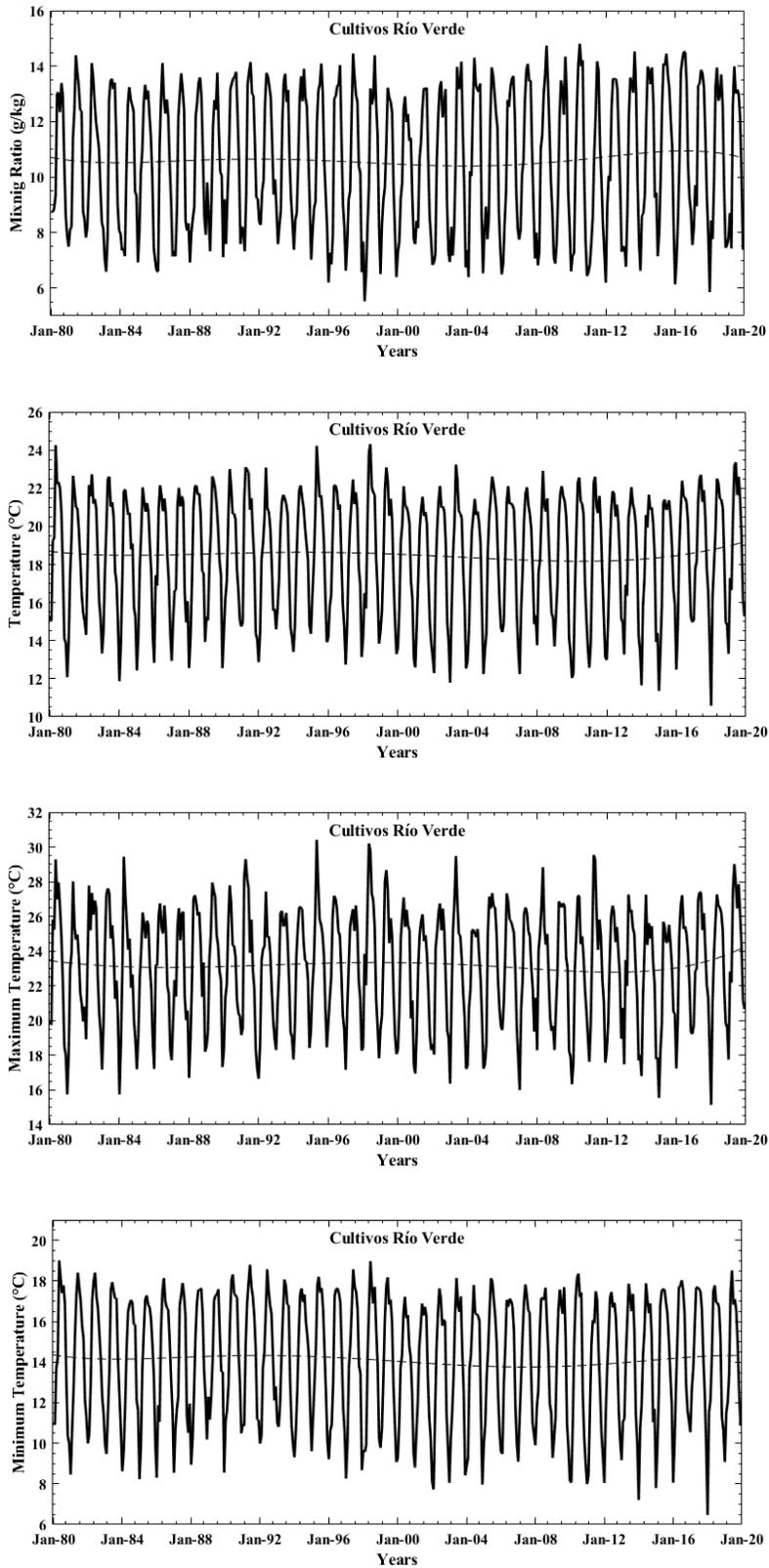


Figura 48. Cultivos Río Verde, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

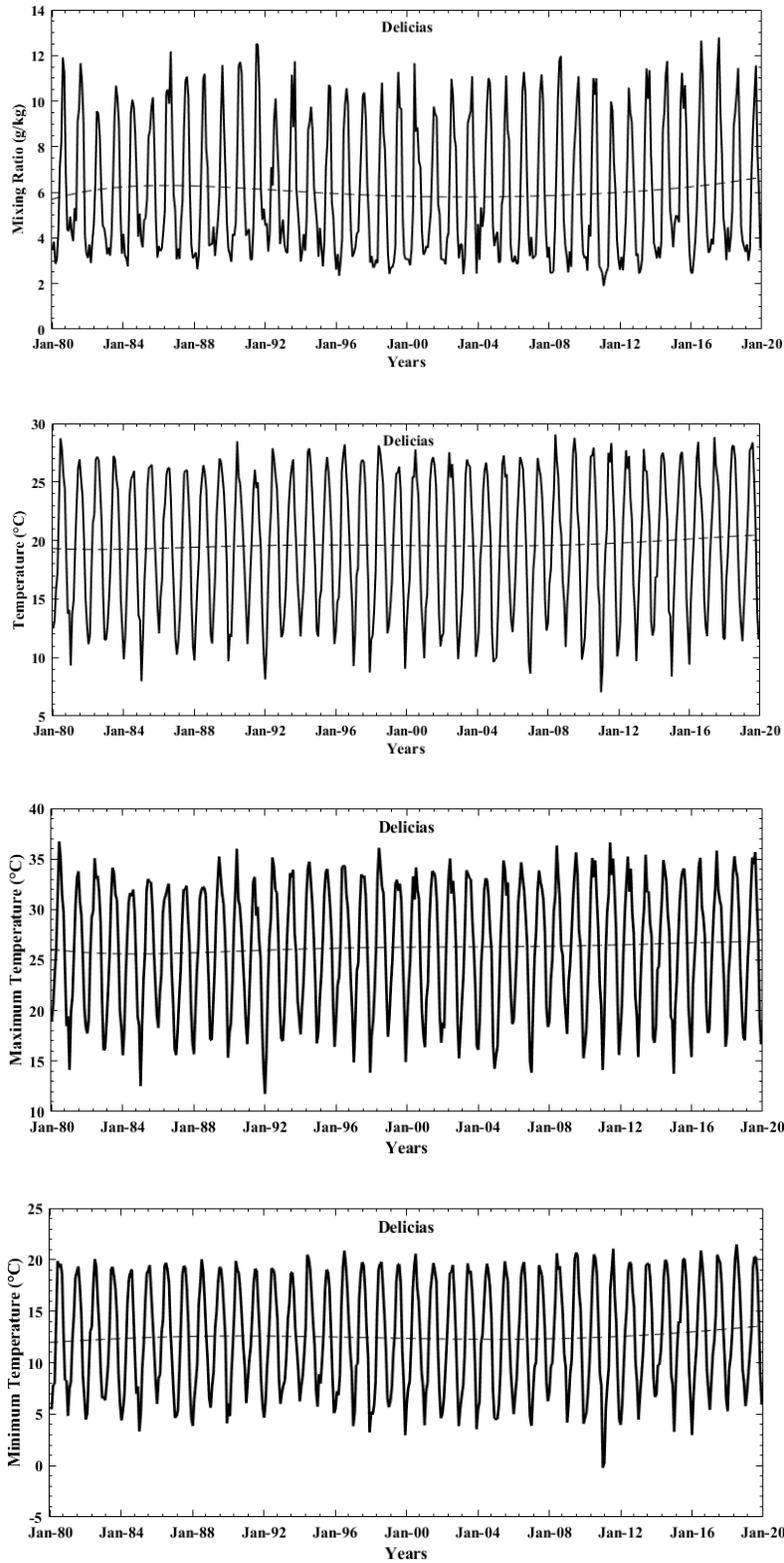


Figura 49. Delicias, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

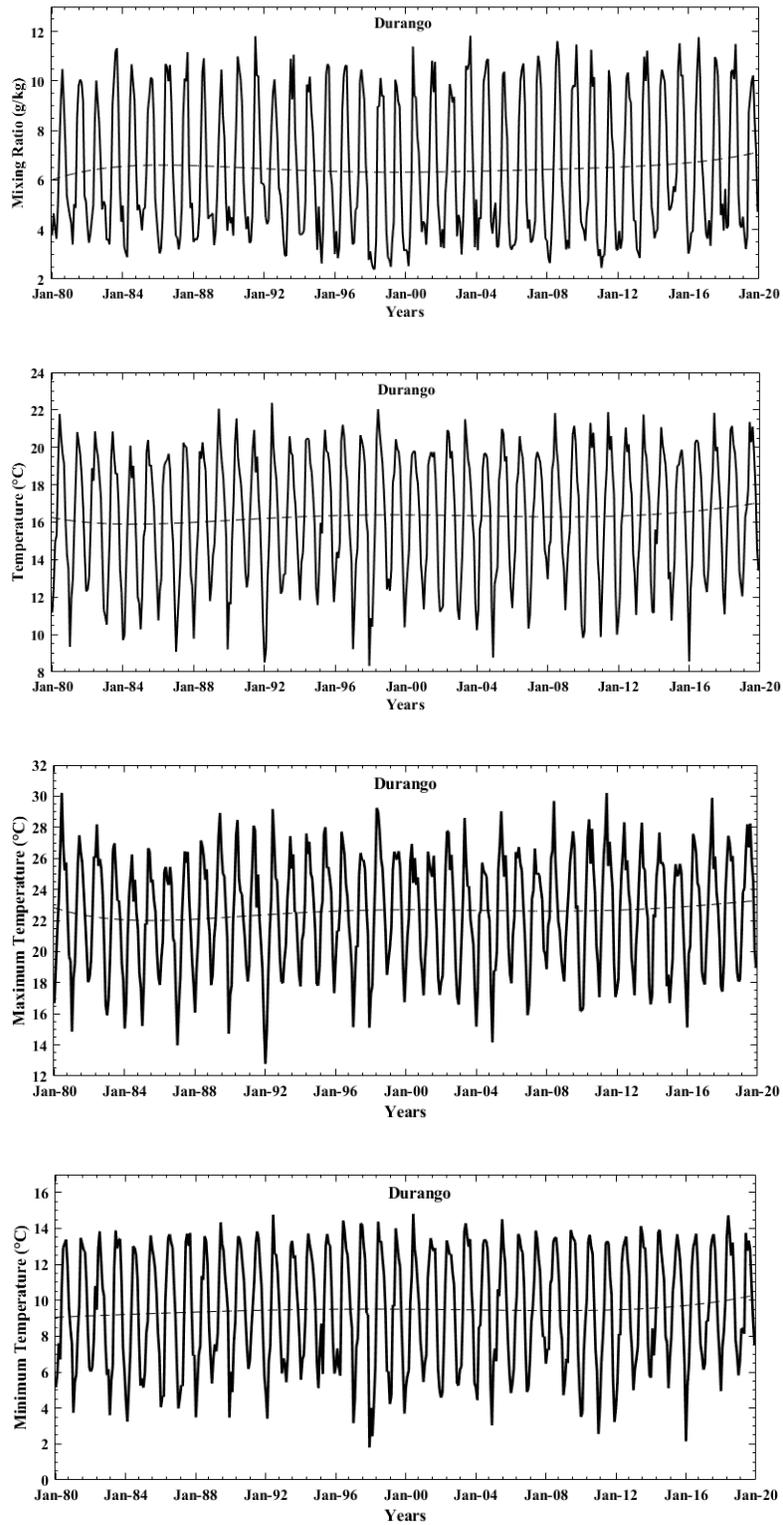


Figura 50. Durango, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

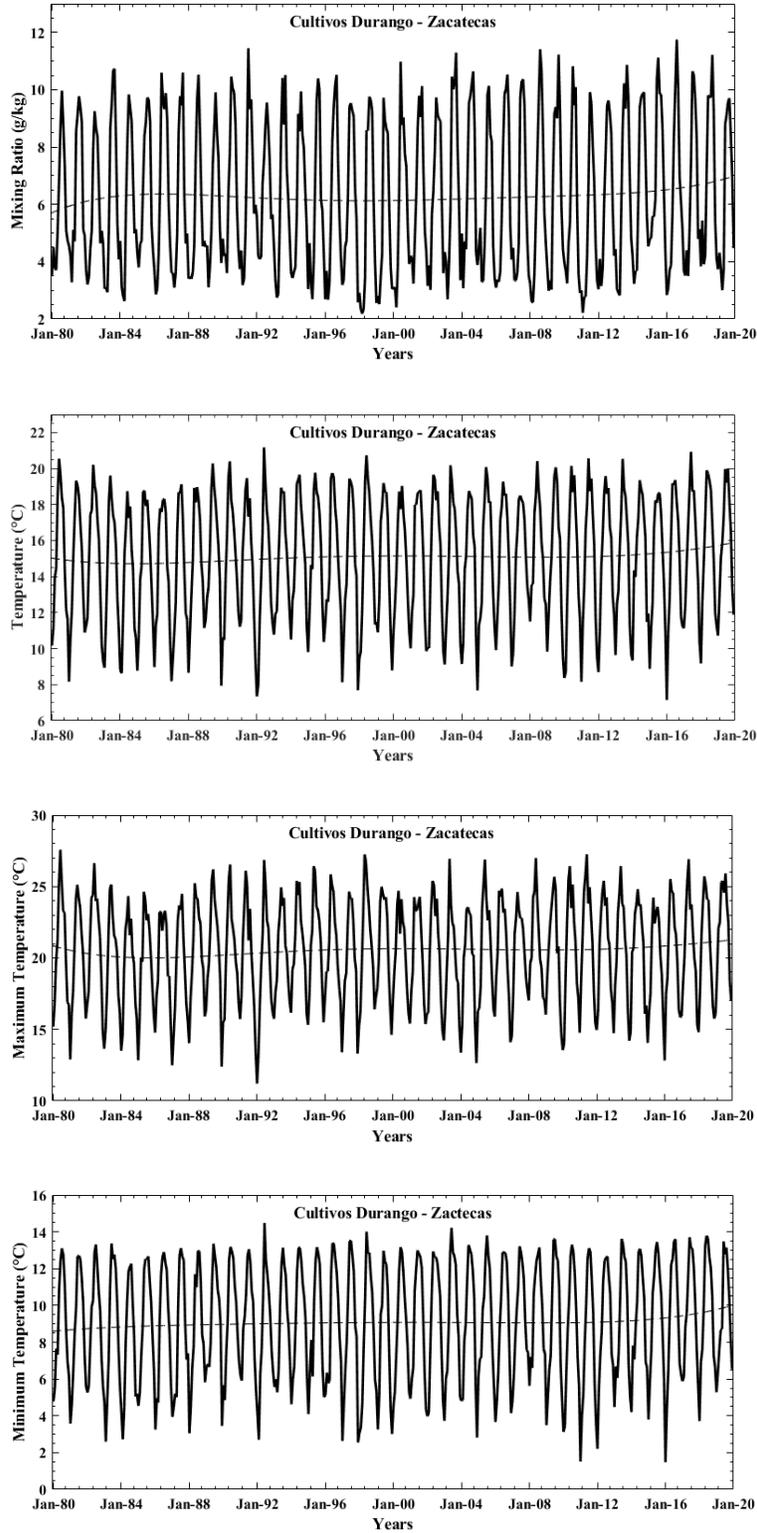


Figura 51. Cultivos Durango – Zacatecas, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

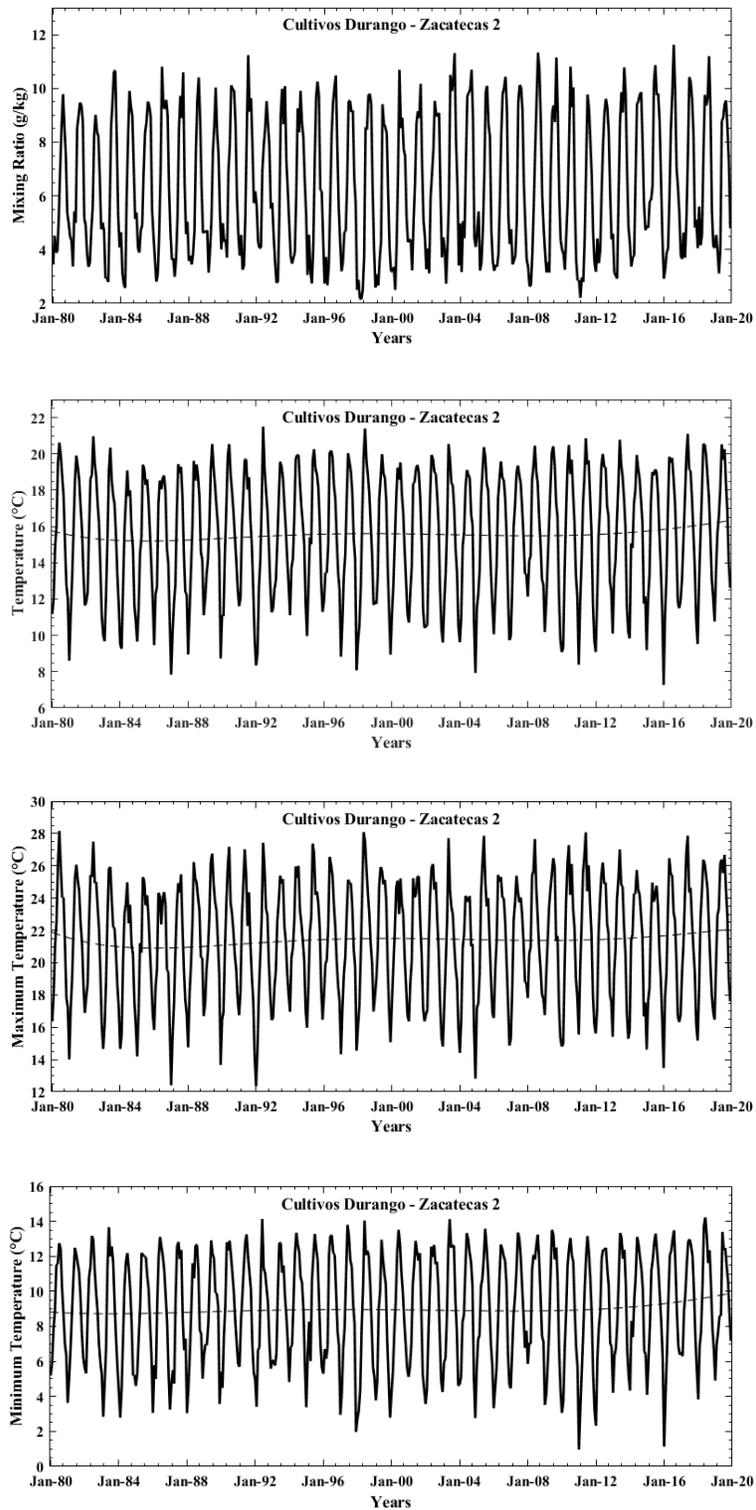


Figura 52. Cultivos Durango – Zacatecas 2, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

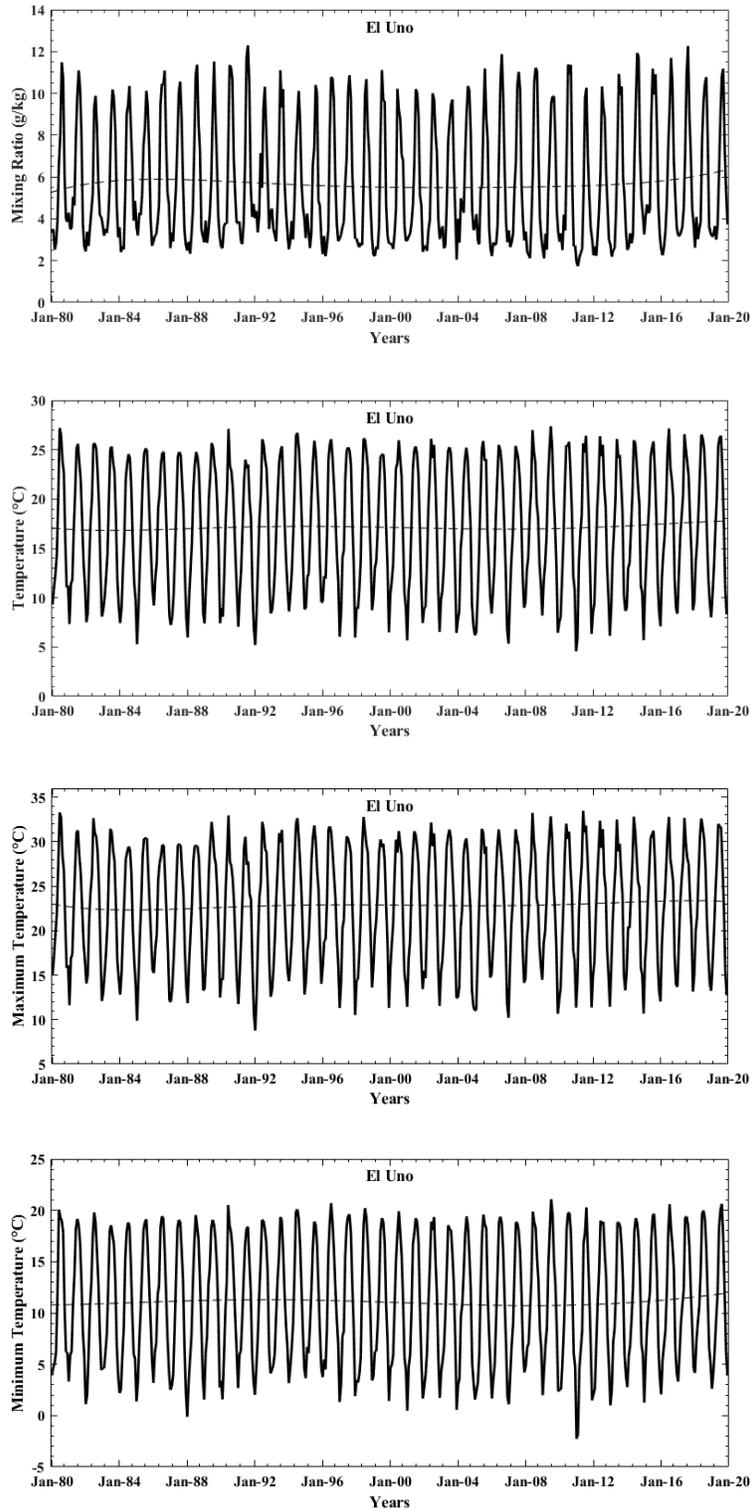


Figura 53. El Uno, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

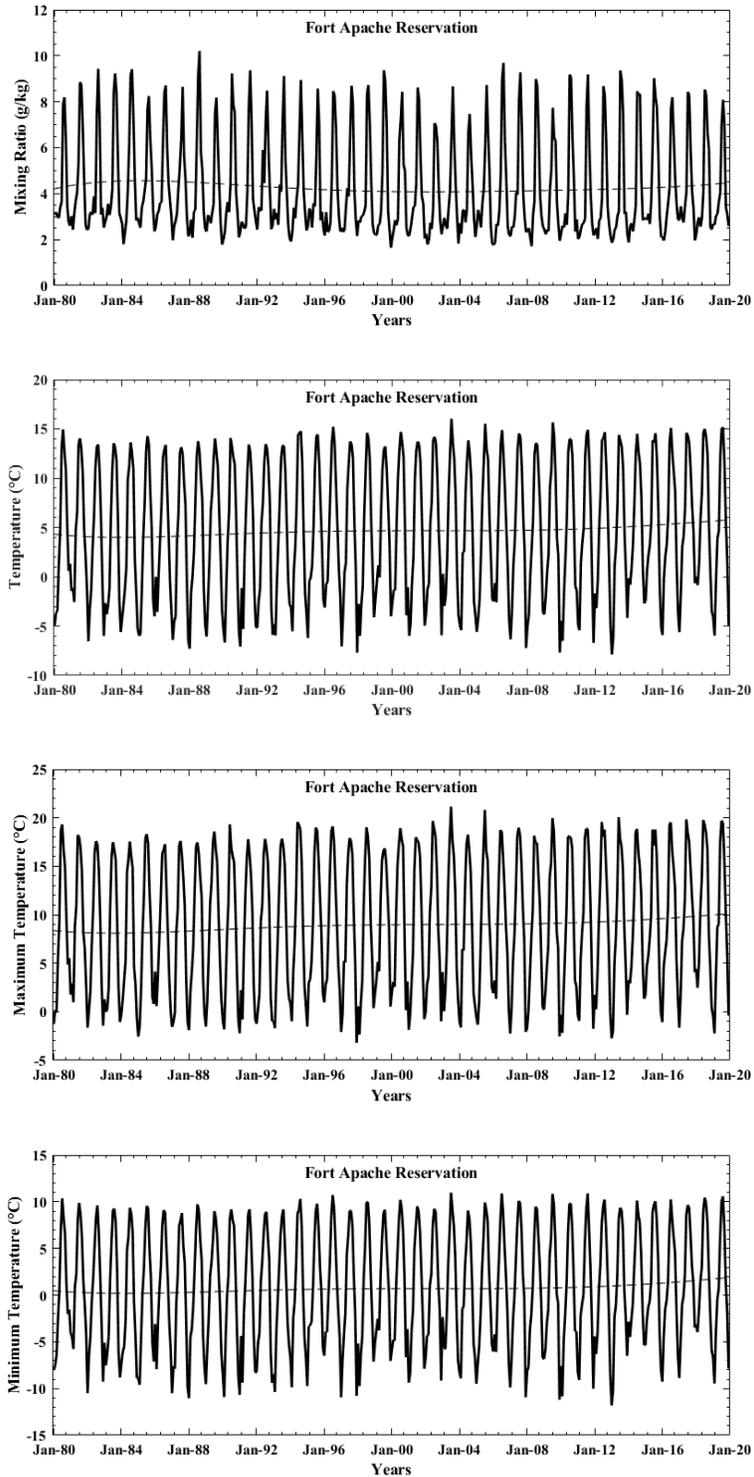


Figura 54. Fort Apache Reservation, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

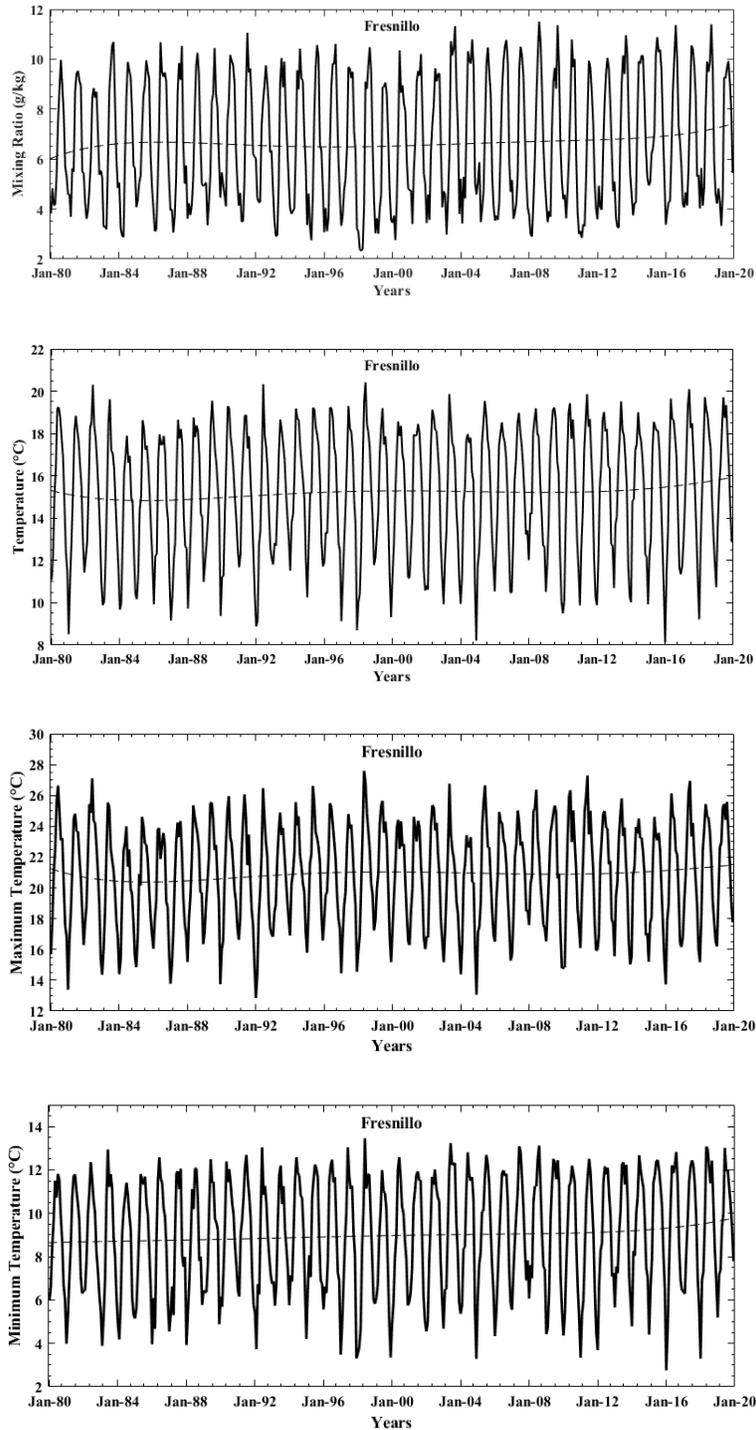


Figura 55. Fresnillo, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

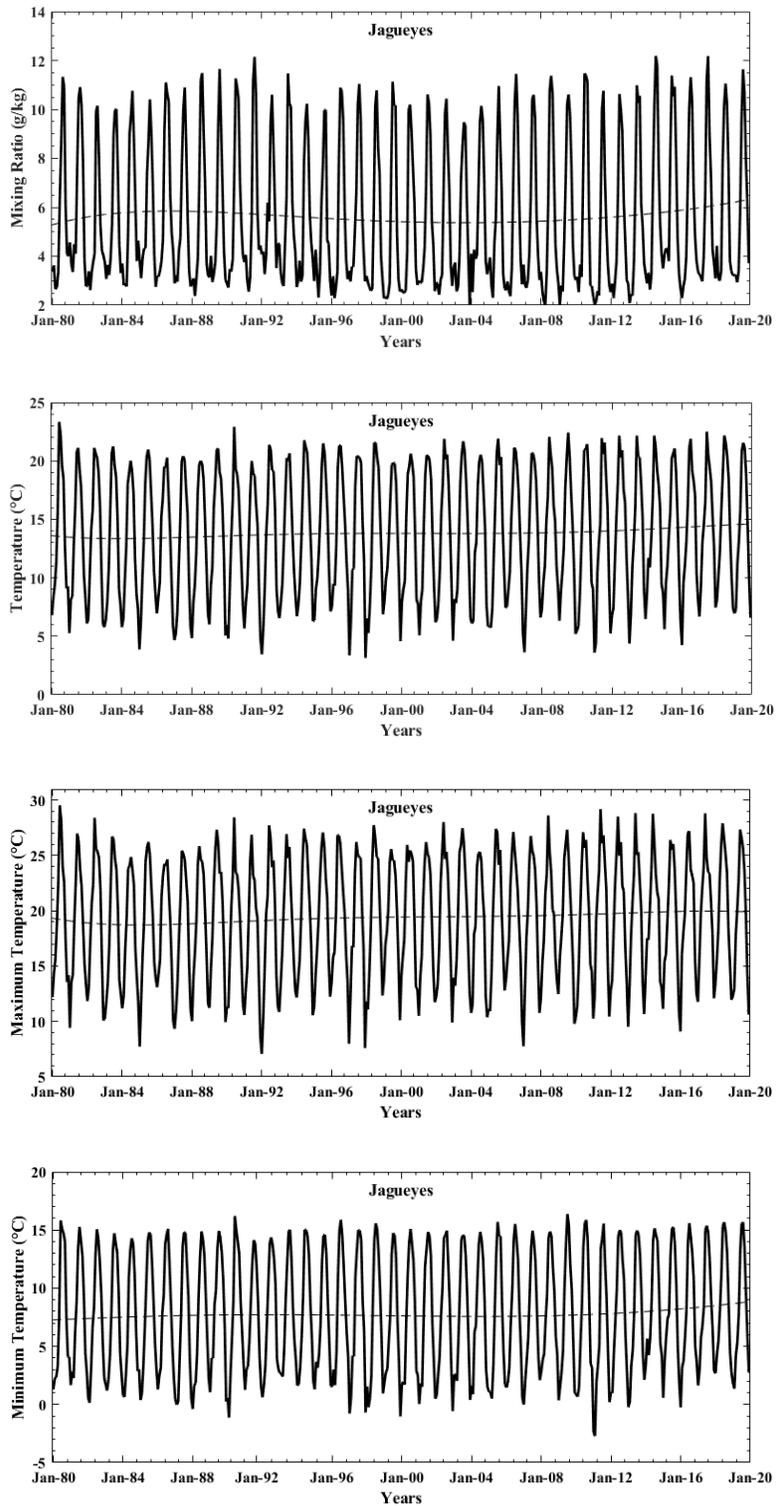


Figura 56. Jagueyes, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

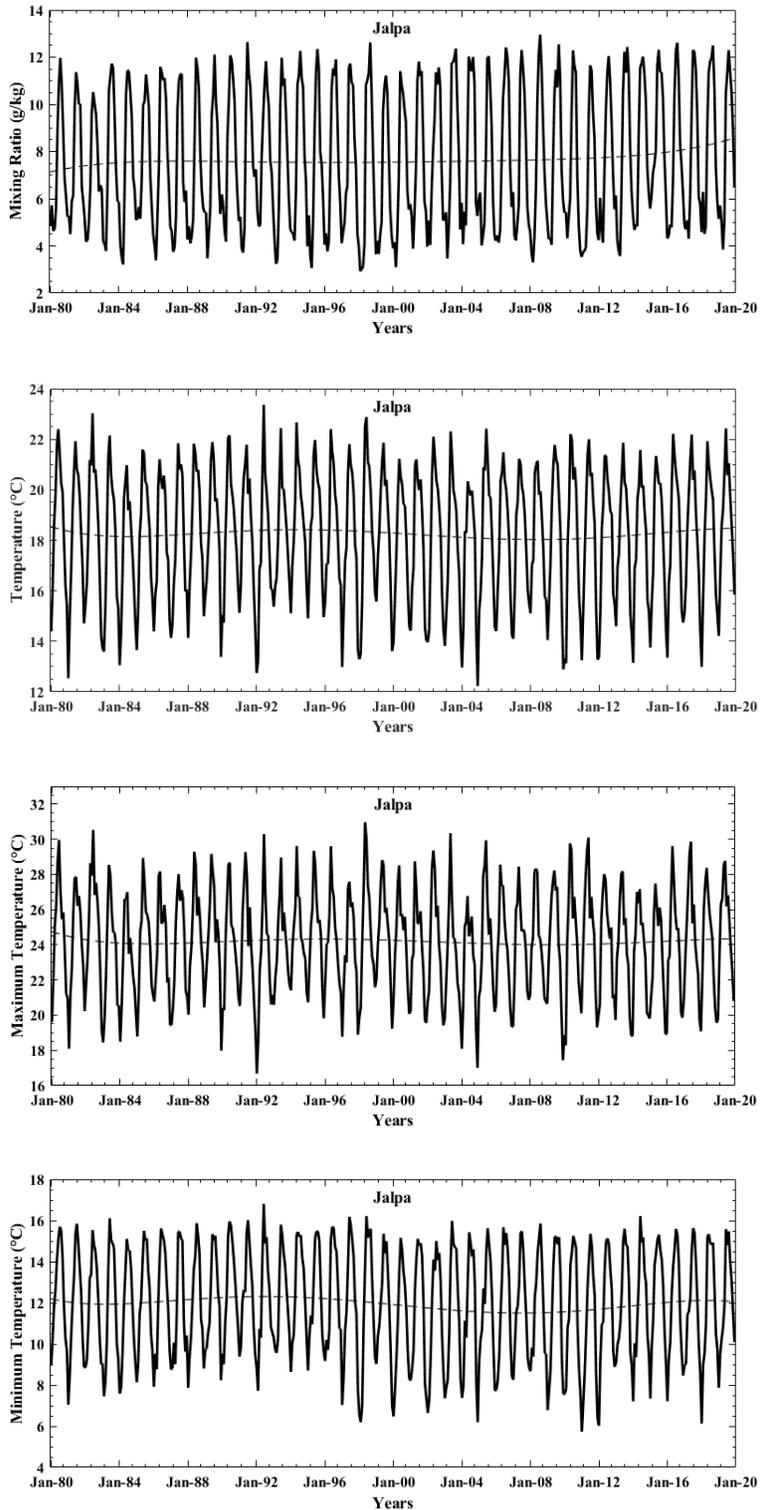


Figura 57. Jalpa, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

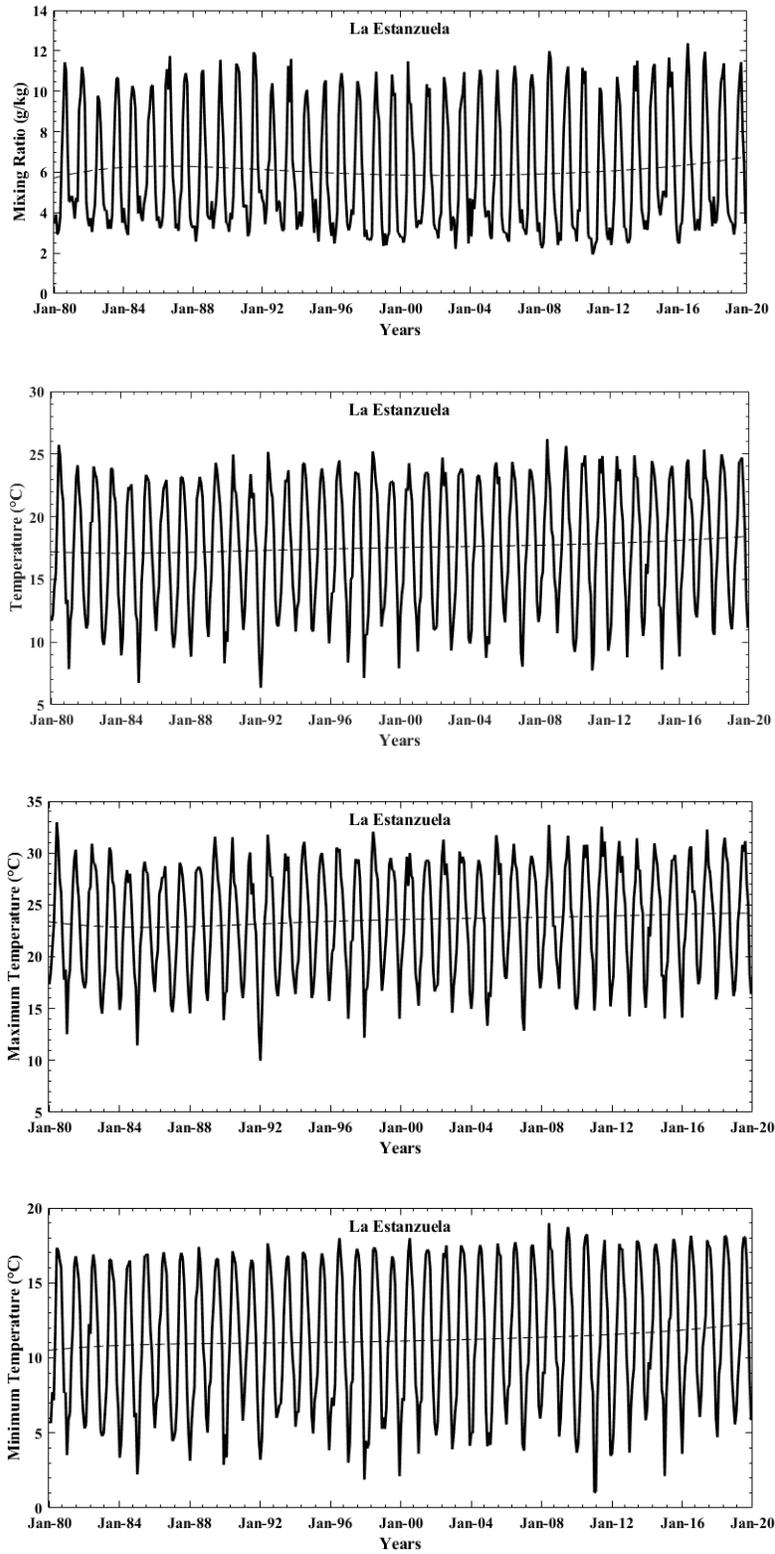


Figura 58. La Estanzuela, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

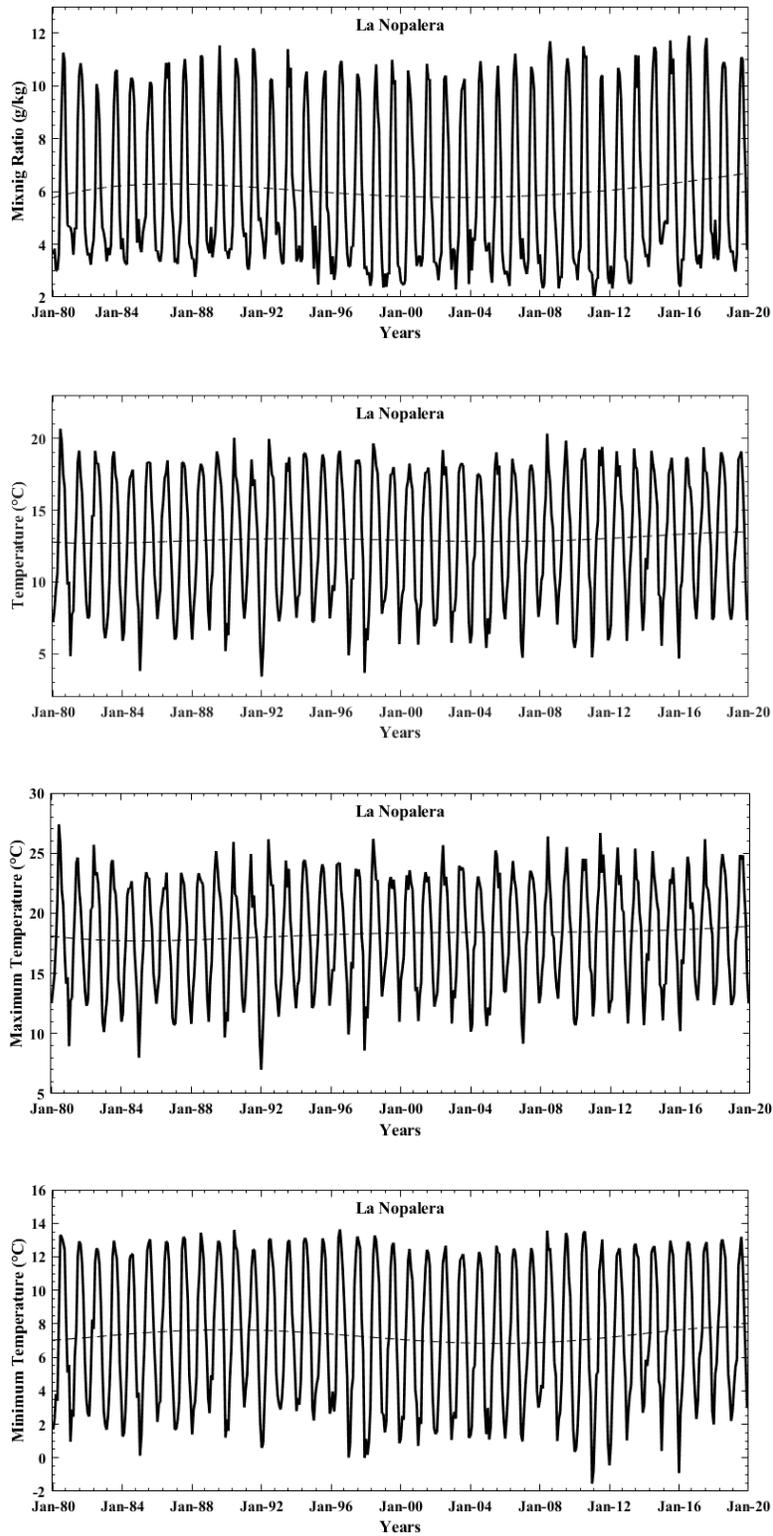


Figura 59. La Nopalera, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

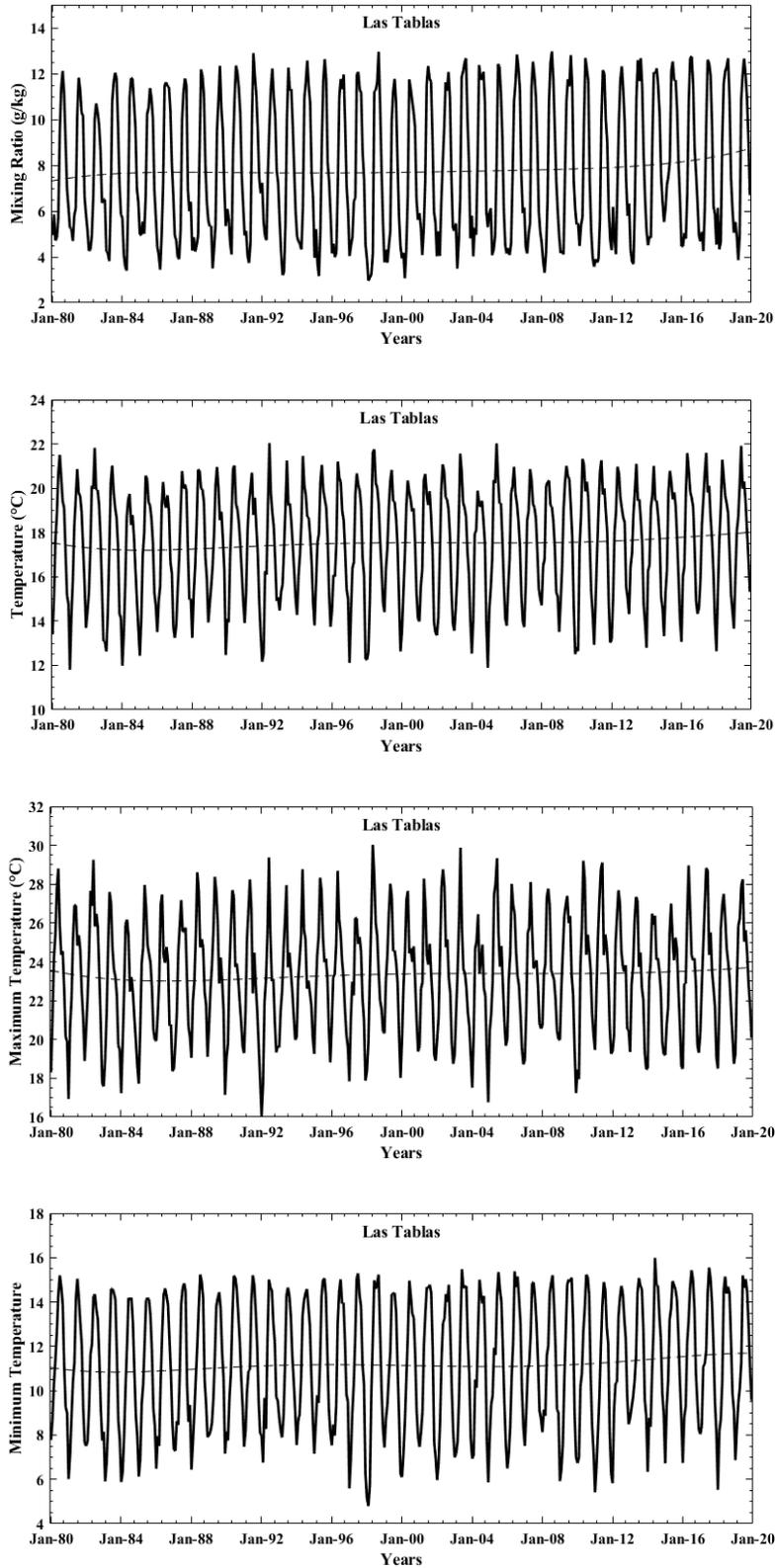


Figura 60. Las Tablas, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

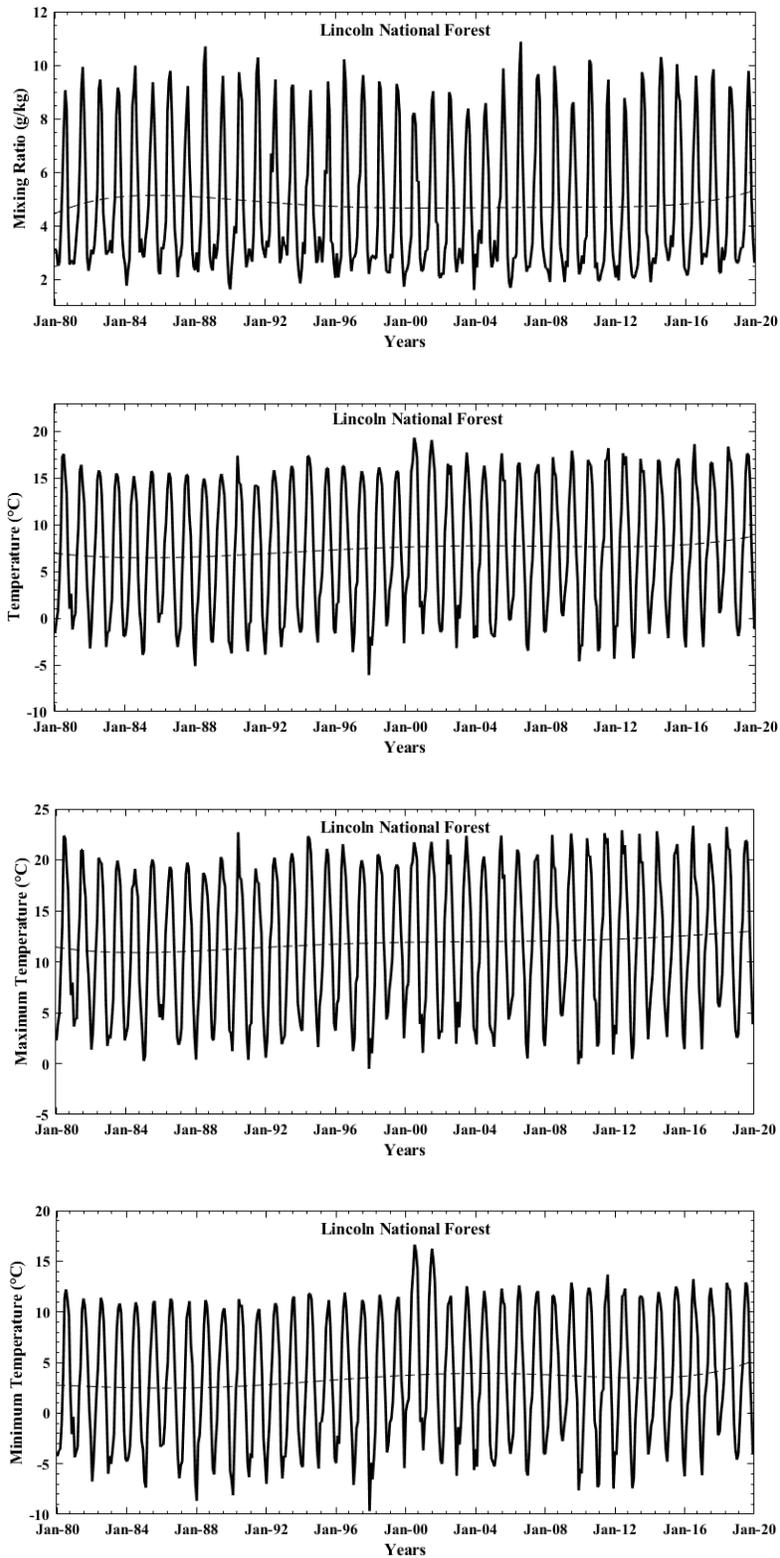


Figura 61. Lincoln National Forest, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

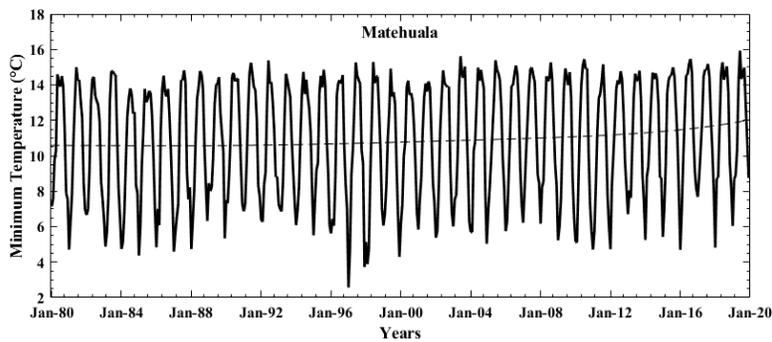
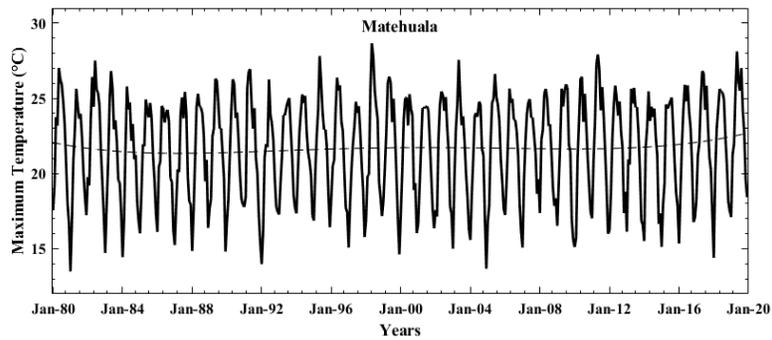
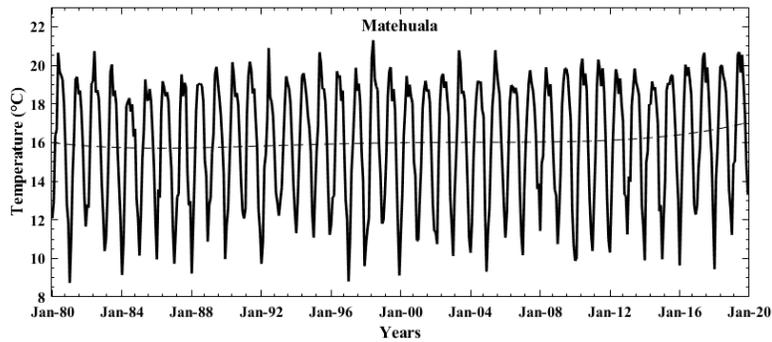
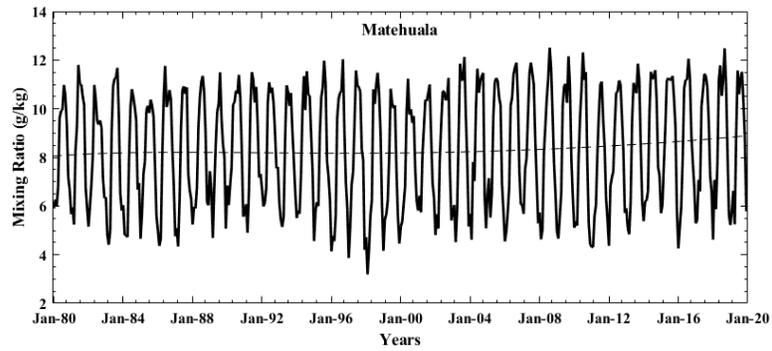


Figura 62. Matchuala, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

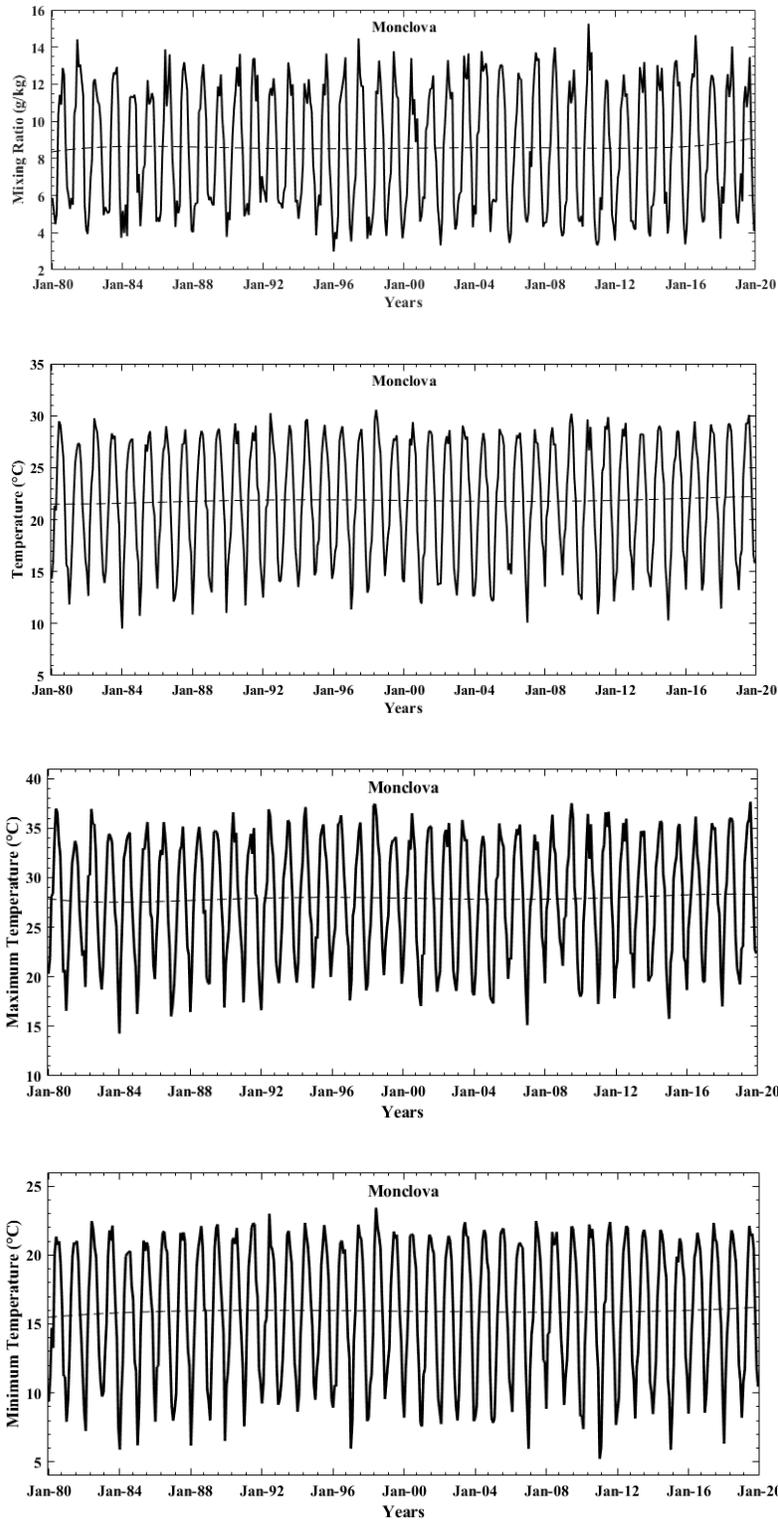


Figura 63. Monclova, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

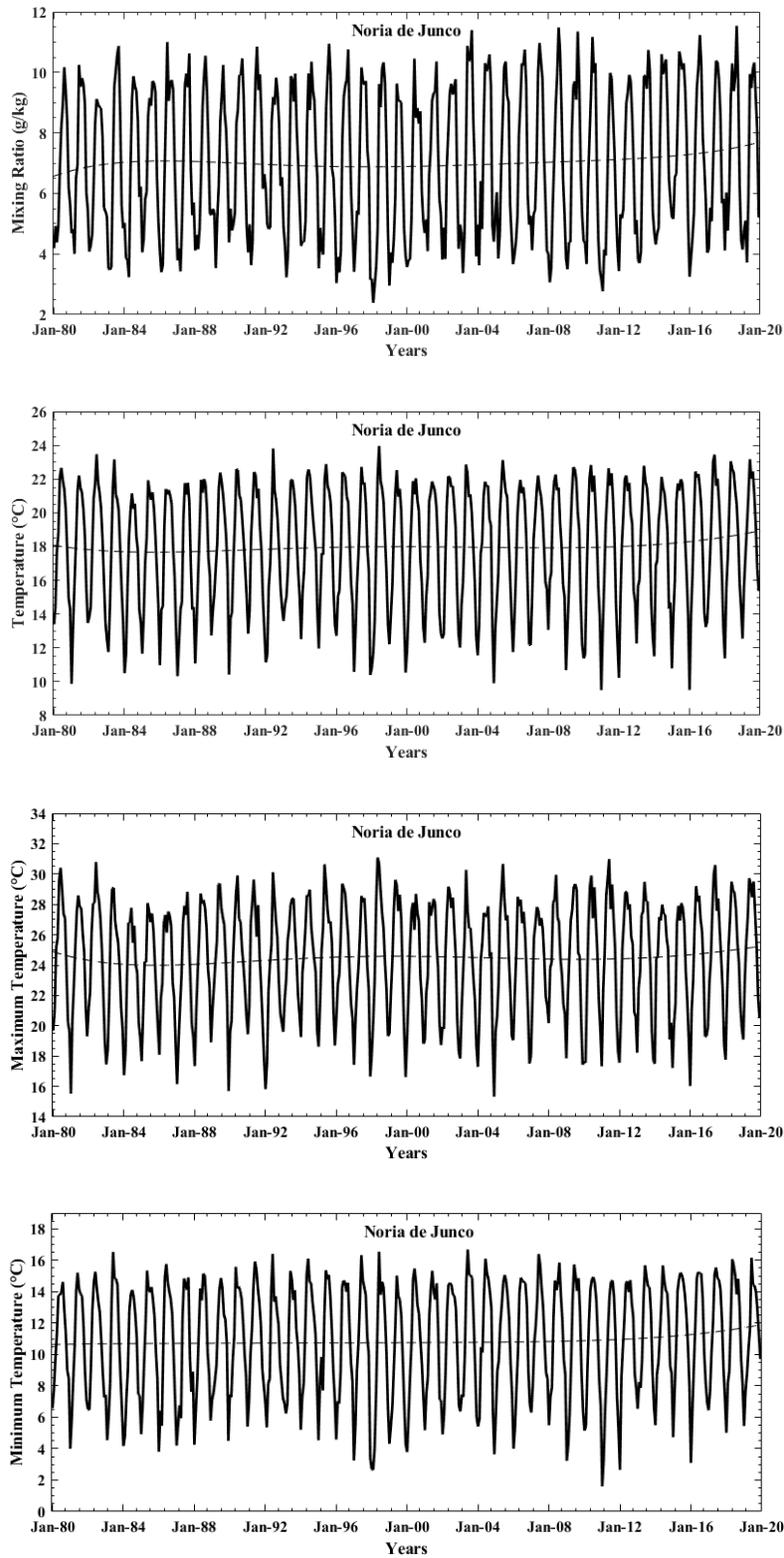


Figura 64. Noria de Junco, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

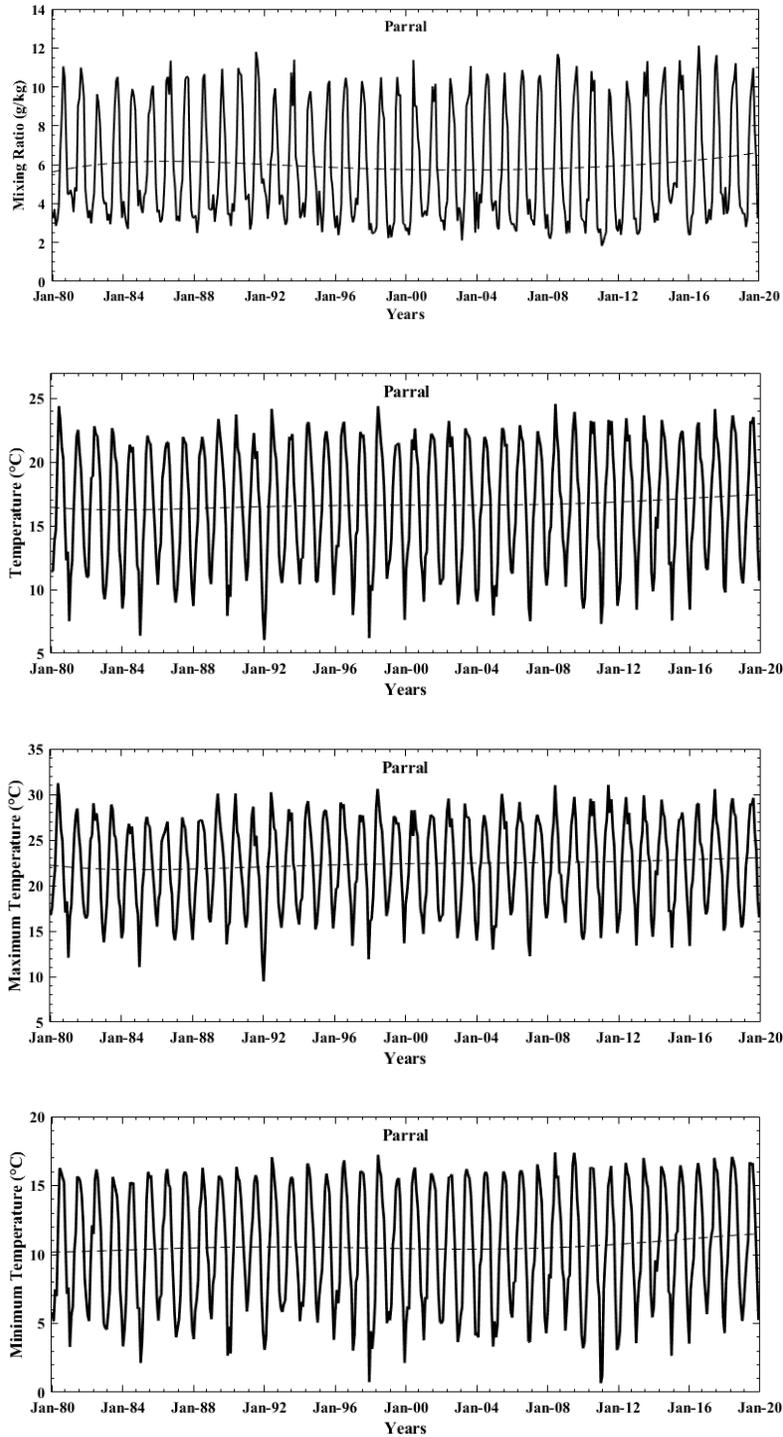


Figura 65. Parral, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

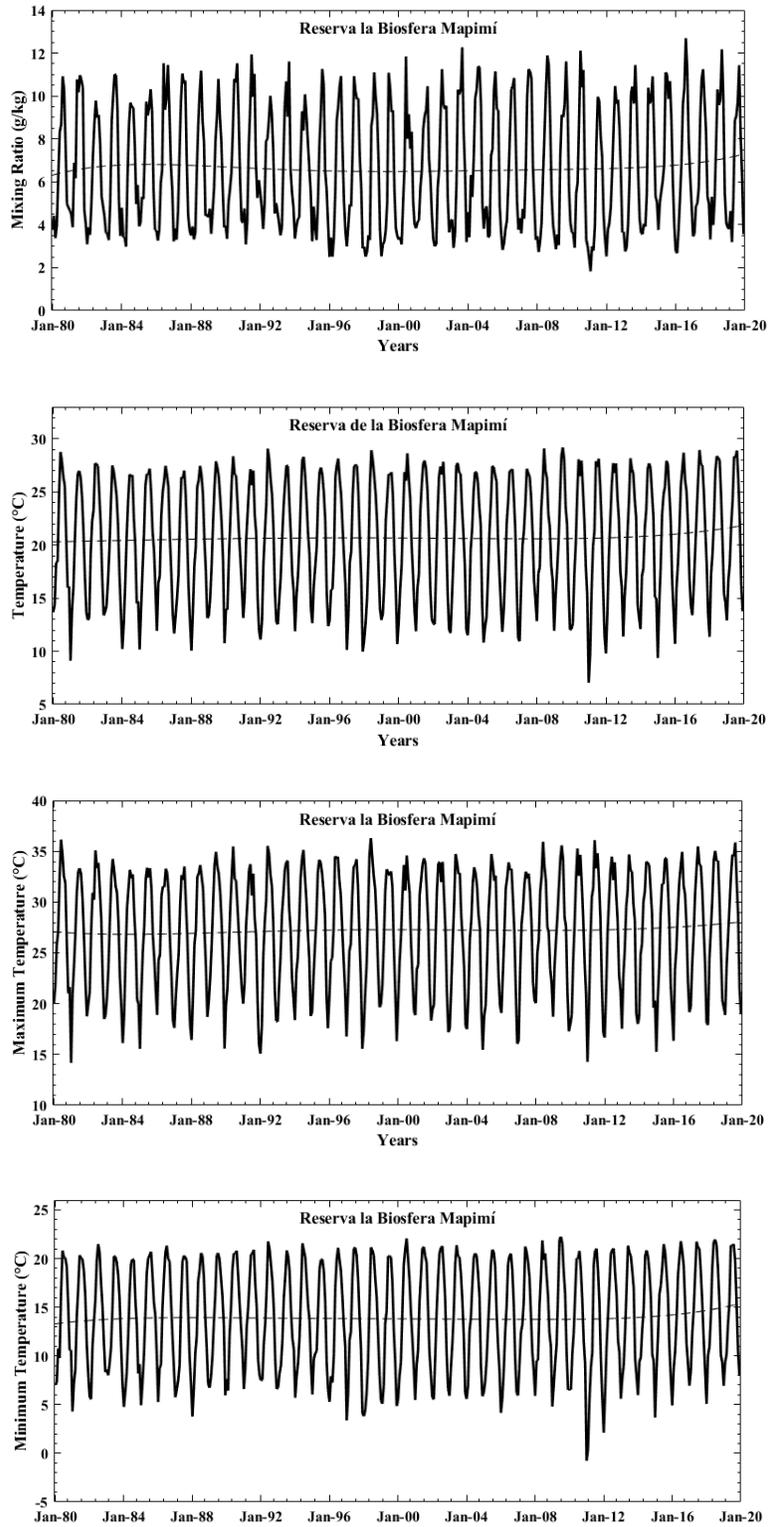


Figura 66. Reserva la Biosfera Mapimí, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

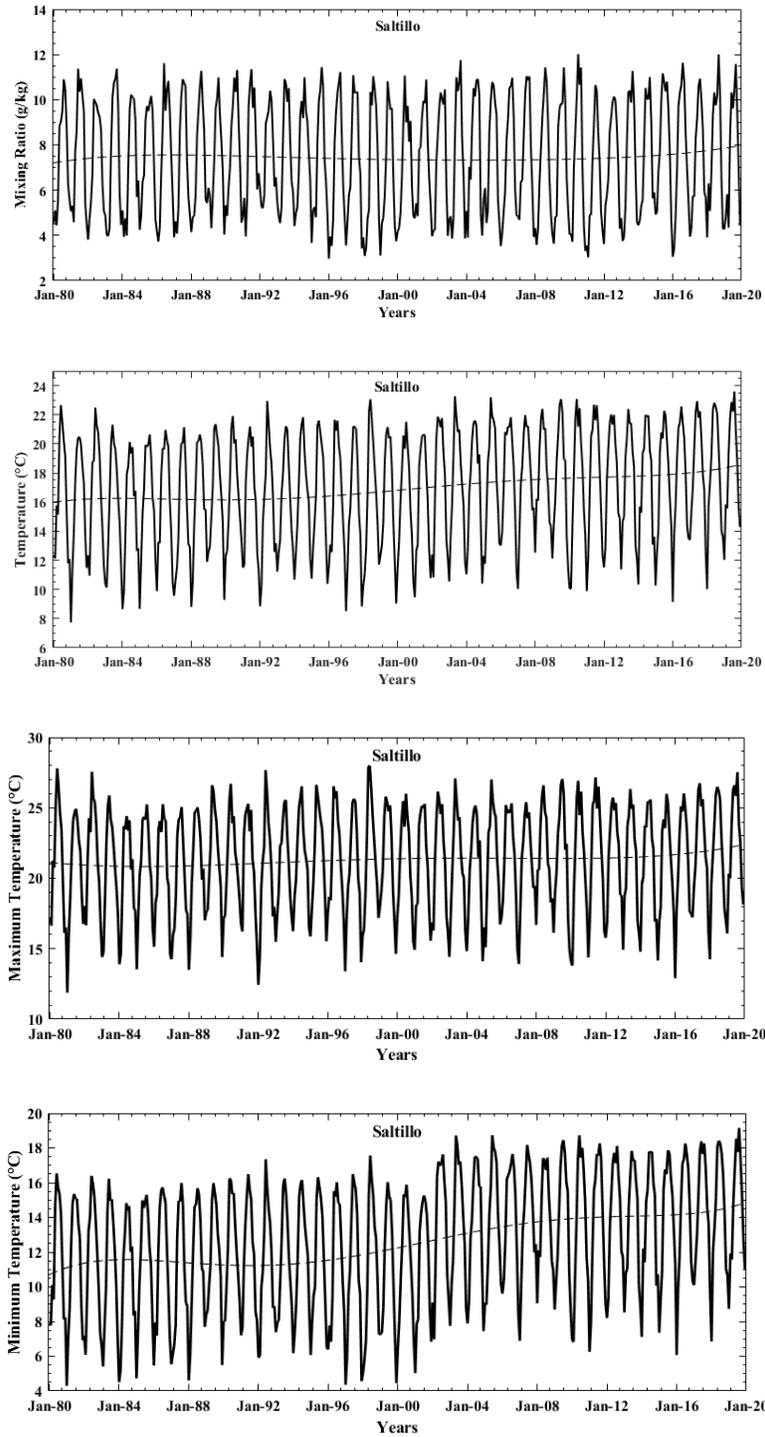


Figura 67. Saltillo, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

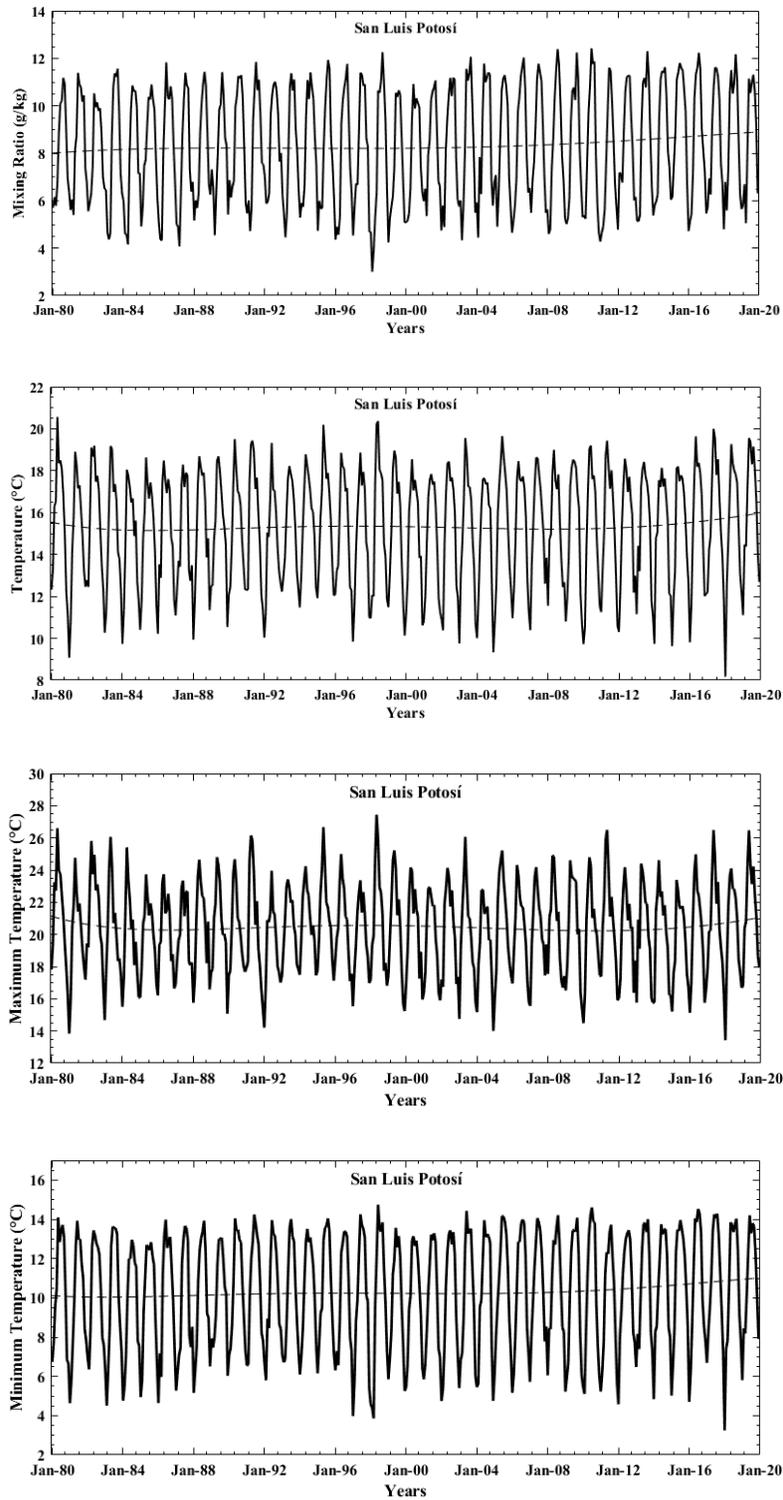


Figura 68. San Luis Potosí, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

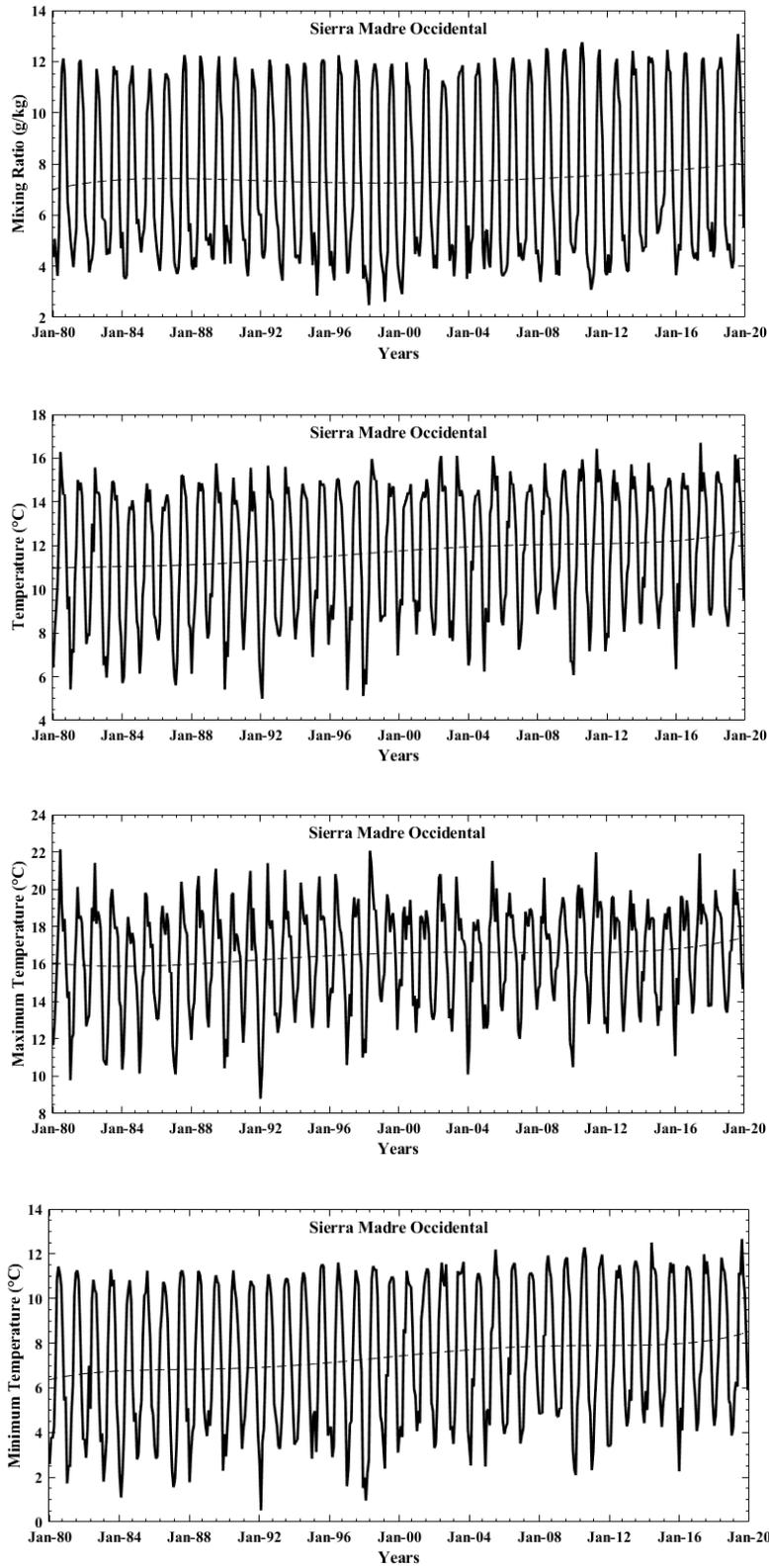


Figura 69. Sierra Madre Occidental, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

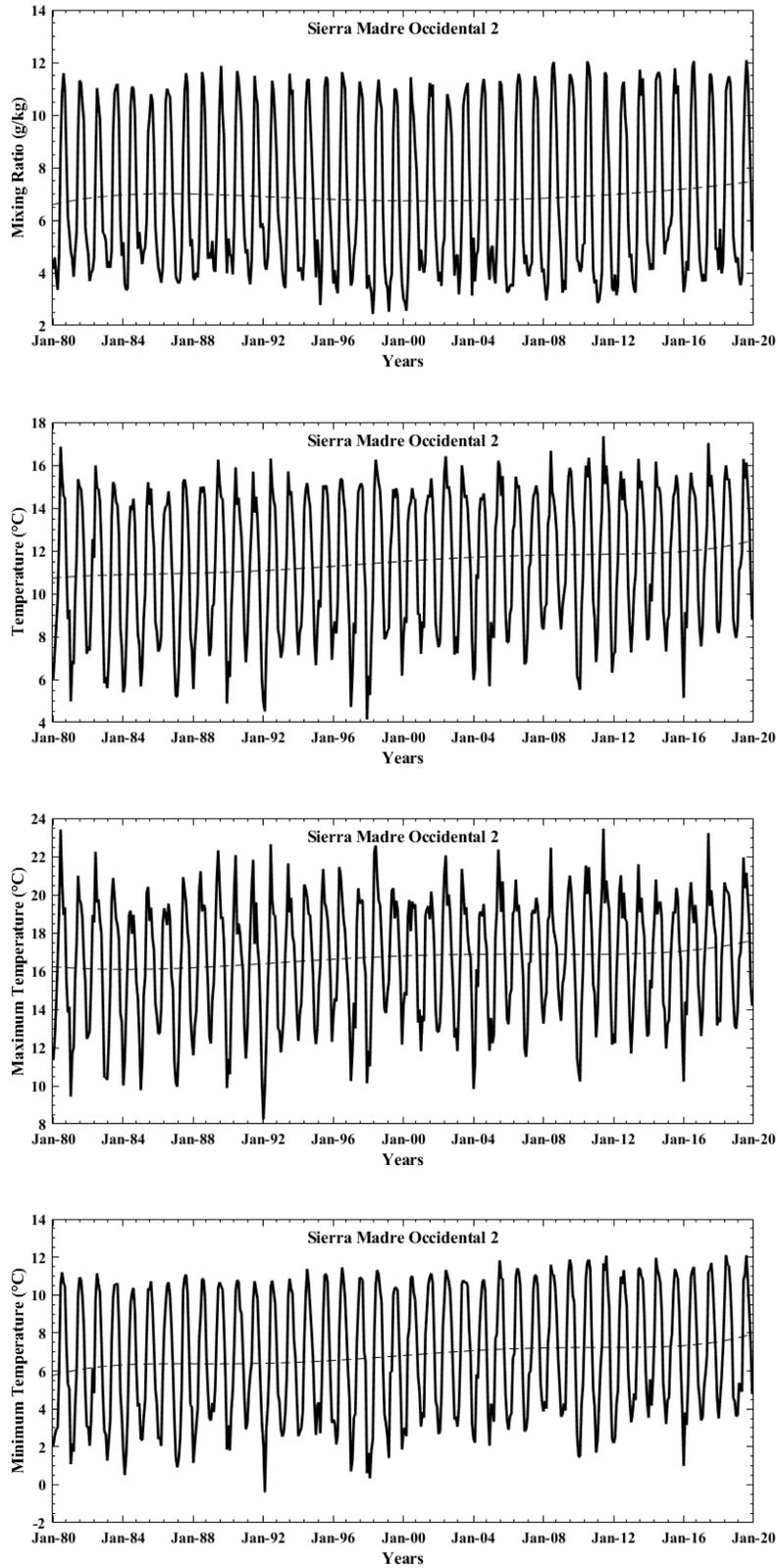


Figura 70. Sierra Madre Occidental 2, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

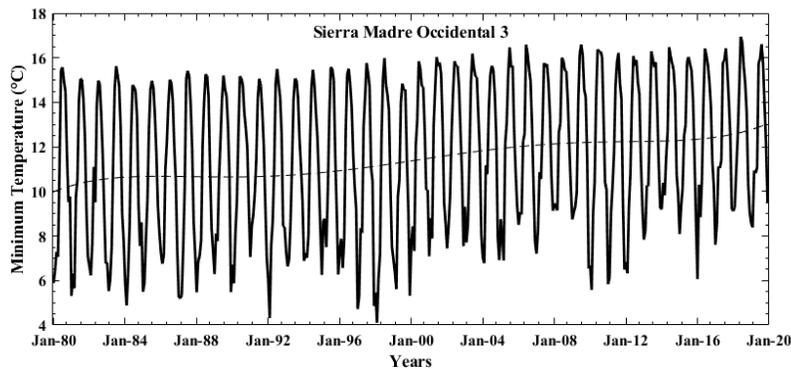
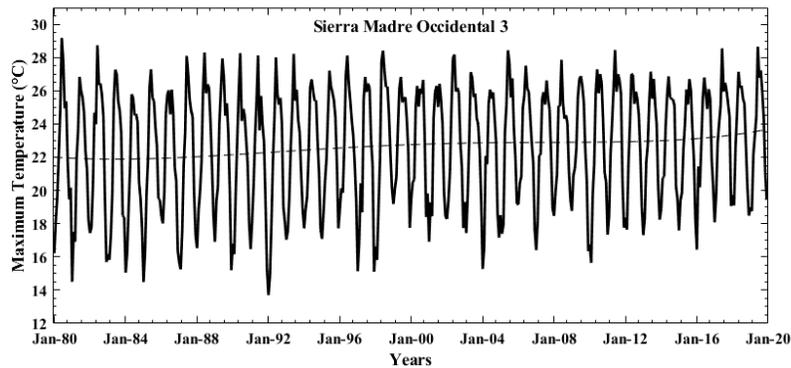
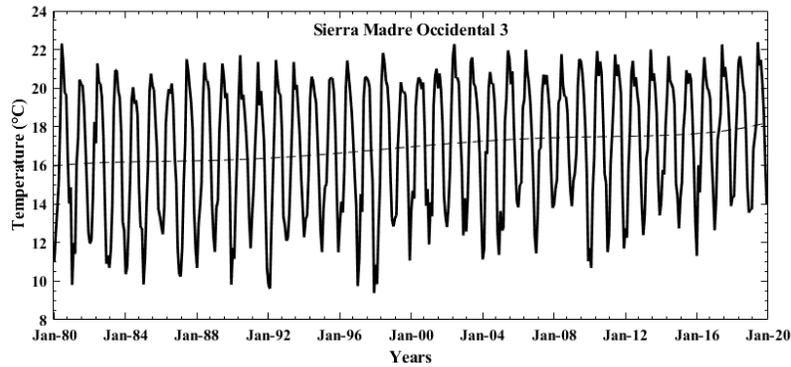
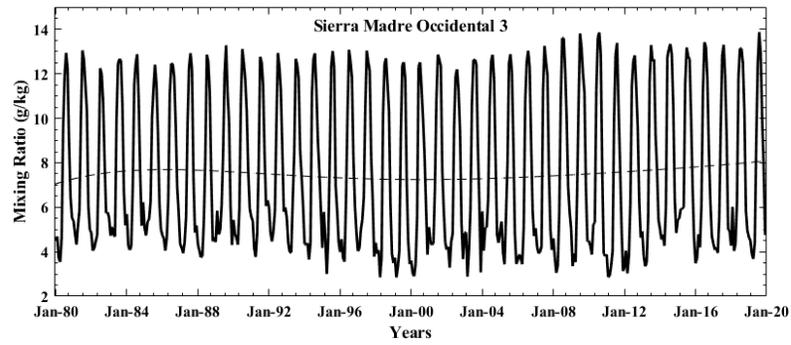


Figura 71. Sierra Madre Occidental 3, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

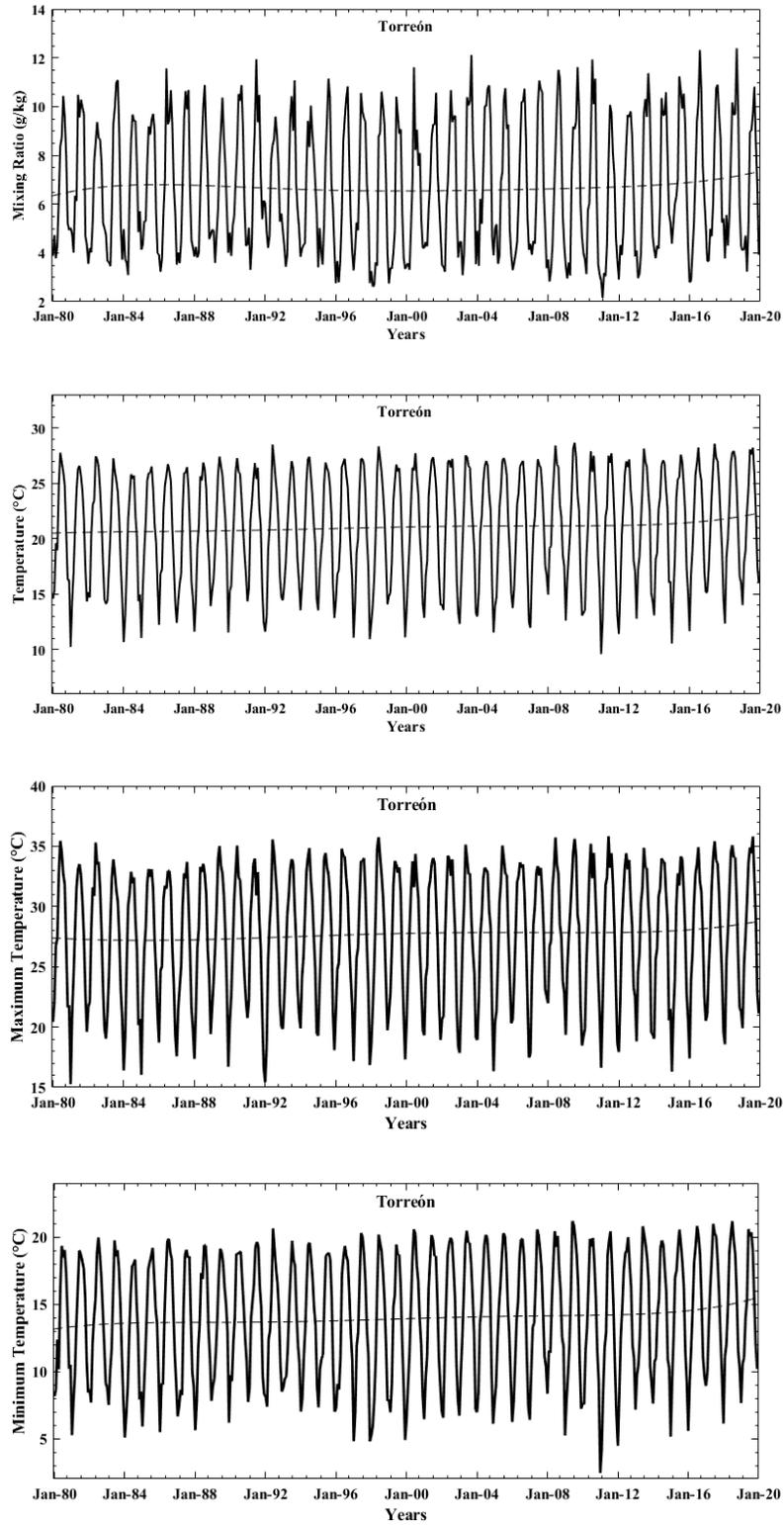


Figura 72. Torreón, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

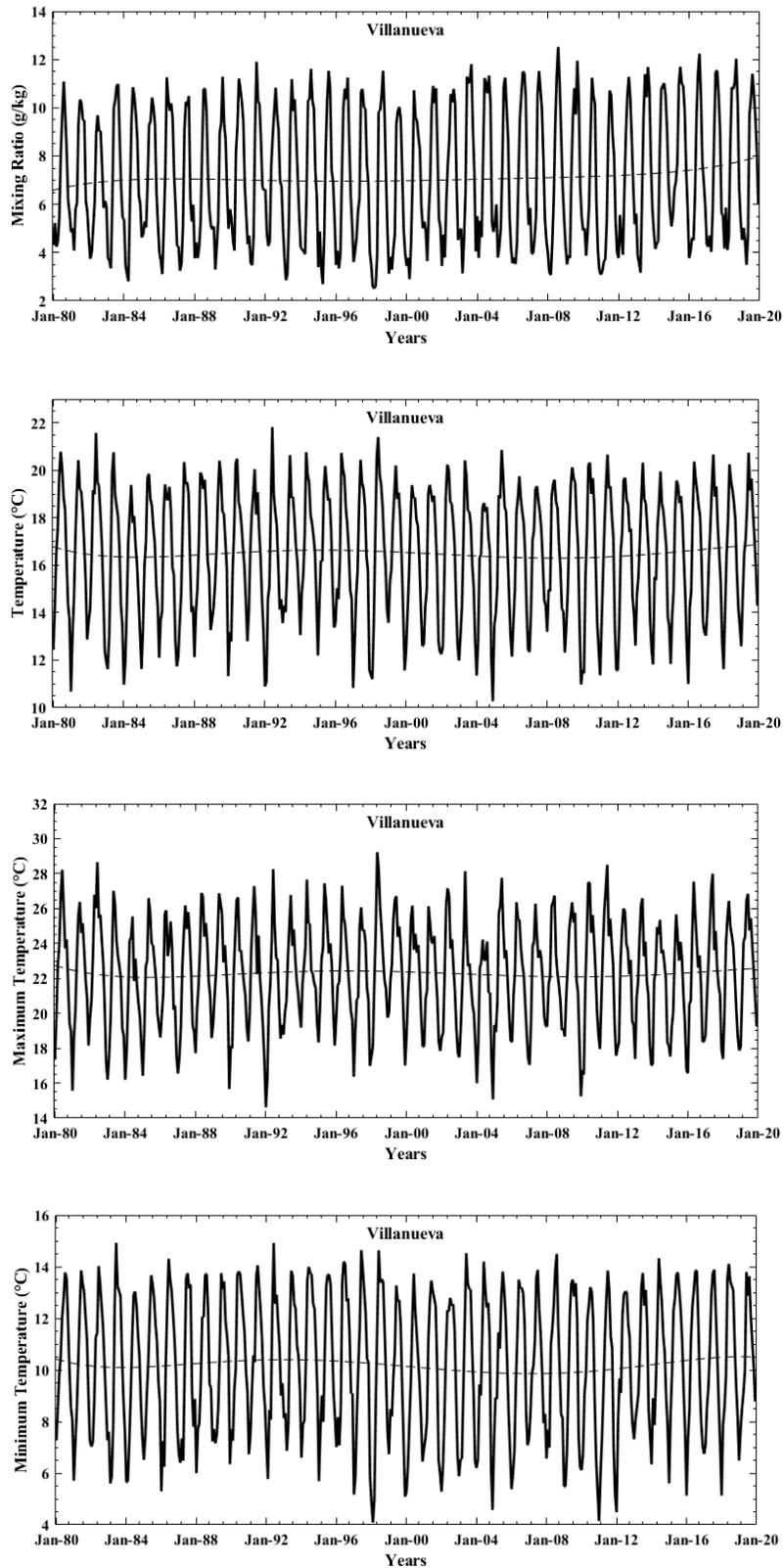


Figura 73. Villanueva, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

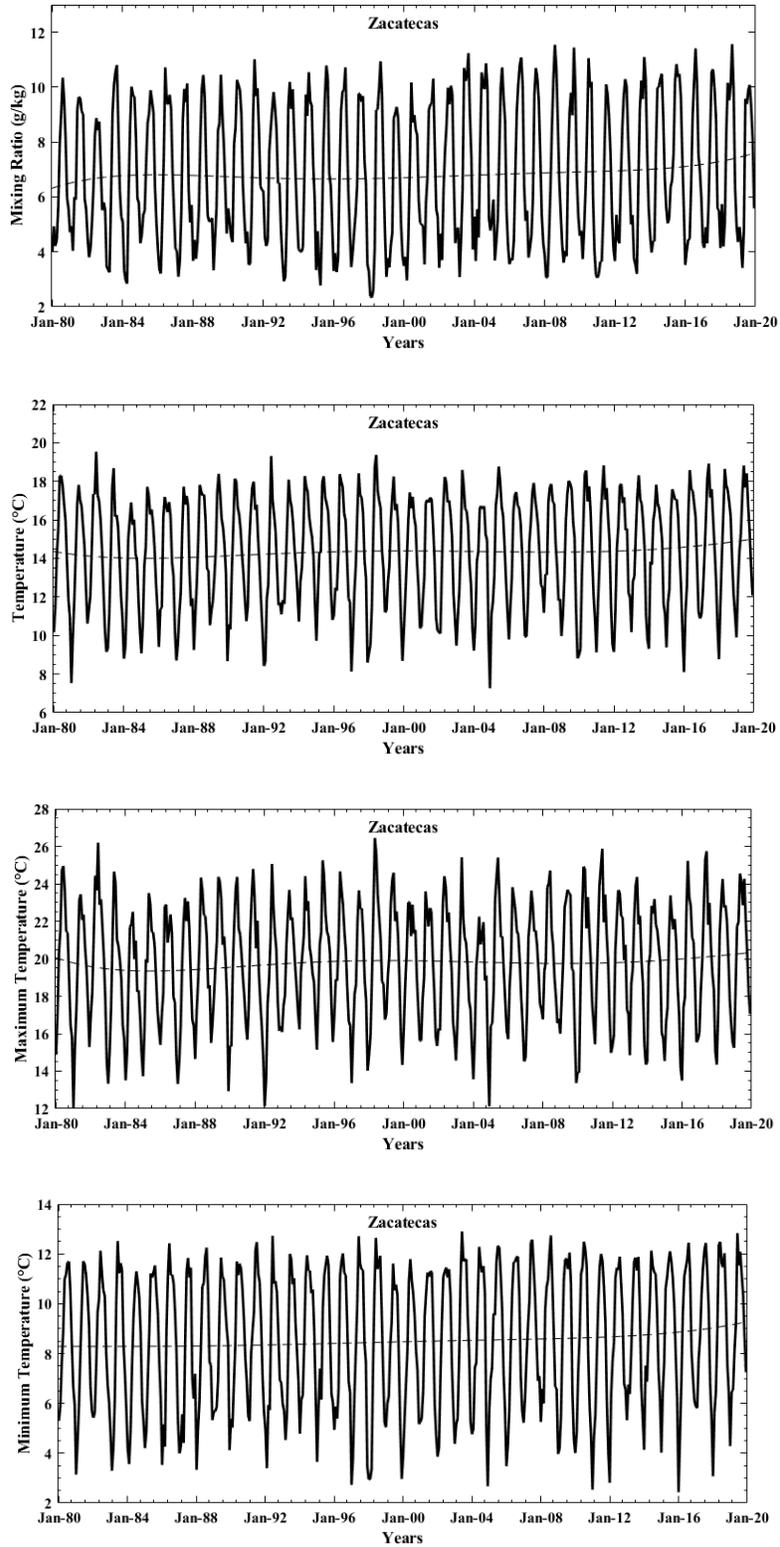


Figura 74. Zacatecas, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

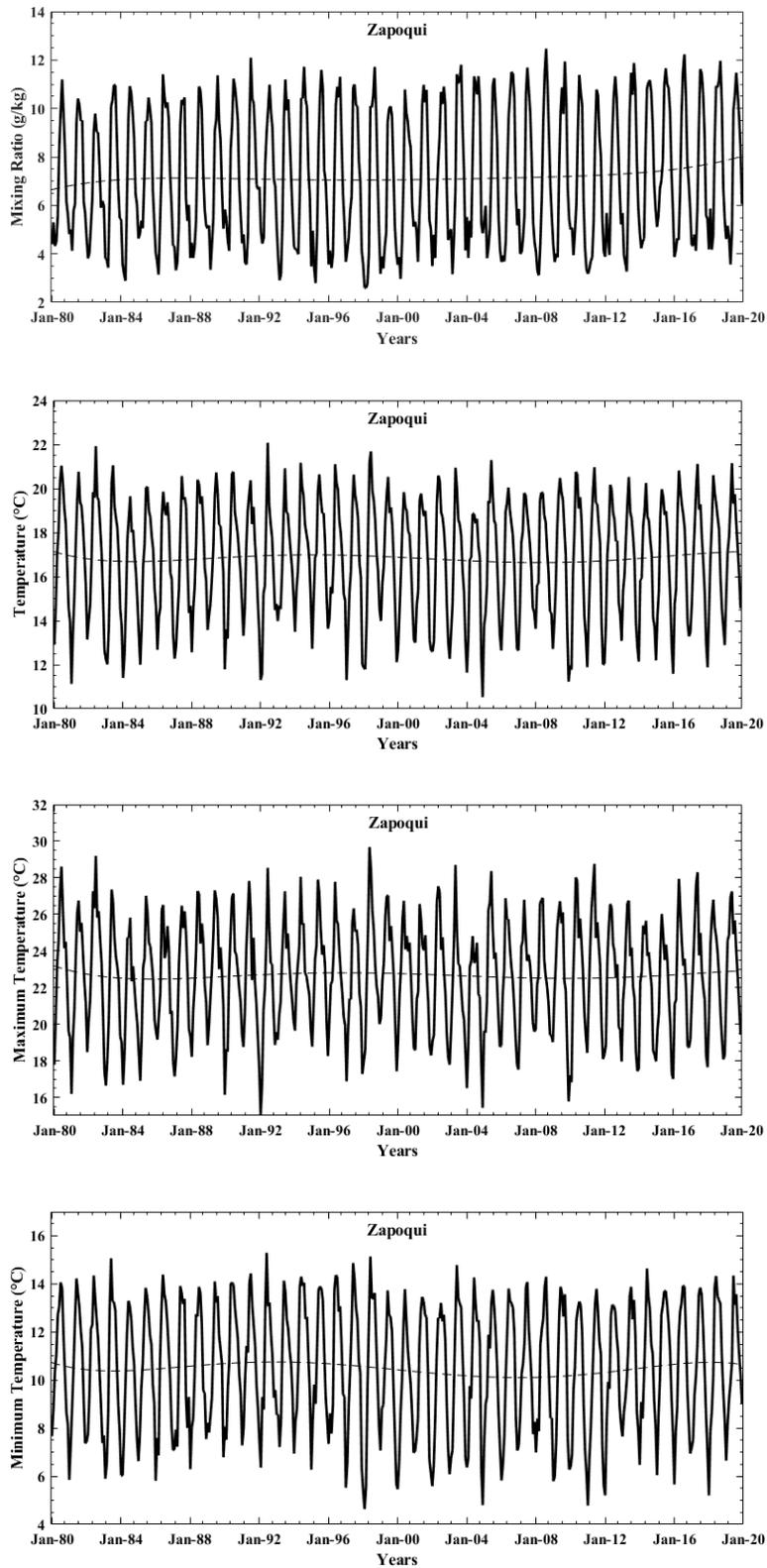


Figura 75. Zapoqui, en donde [a] razón de mezcla [g/kg], [b] temperatura promedio, [c] temperatura máxima y [d] temperatura mínima.

Anexo III. Análisis comparativo y tendencias aplicando Mann-Kendall.

Tabla 8. Muestra los cálculos de error (BIAS y RMSE) con unidades [°C] y la correlación, usando CRU y las simulaciones numéricas. Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	TEMPERATURA PROMEDIO			TEMPERATURA MÁXIMA			TEMPERATURA MÍNIMA		
	BIAS	RMSE	PEARSON	BIAS	RMSE	PEARSON	BIAS	RMSE	PEARSON
Lincoln National Forest	-4.34	4.43	0.99	-8.69	8.74	0.99	0.39	1.63	0.98
Fort Apache Restauration	-6.36	6.42	0.99	-10.97	11.02	0.99	-1.42	2.19	0.97
Area de Protección de Flora y Fauna	-2.67	2.88	0.99	-7.12	7.20	0.98	1.88	2.84	0.97
Colonia Búfalo	-0.19	1.23	0.98	-2.88	3.07	0.98	1.88	2.84	0.96
La Estanzuela	-0.45	1.11	0.98	-2.61	2.80	0.98	1.28	2.10	0.97
La Nopalera	-2.22	2.44	0.98	-5.00	5.12	0.97	0.14	1.66	0.95
Campo Alto	-2.77	2.98	0.97	-6.75	6.85	0.95	0.61	2.19	0.95
Sierra Madre Occidental 1	-5.98	6.04	0.96	-8.63	8.70	0.92	-2.89	3.19	0.95
Sierra Madre Occidental 2	-5.64	5.70	0.97	-7.74	7.85	0.92	-3.03	3.25	0.95
Sierra Madre Occidental 3	0.25	1.02	0.97	-0.90	1.52	0.94	1.54	2.08	0.94
Durango-Zacatecas	-2.12	2.30	0.97	-5.45	5.55	0.96	0.60	1.51	0.96
Durango-Zacatecas 2	-2.41	2.58	0.97	-5.56	5.67	0.96	-0.03	1.52	0.95
Villanueva	-1.21	1.52	0.97	-4.20	4.34	0.93	1.20	2.07	0.94
Zapoqui	-0.95	1.30	0.97	-3.83	3.98	0.93	1.35	2.15	0.94
Jalpa	-0.18	0.83	0.97	-3.06	3.26	0.93	2.29	2.73	0.94
Las Tablas	-1.25	1.46	0.97	-4.19	4.33	0.93	1.10	1.73	0.95
Norte Jalisco-Cultivos	-1.35	1.61	0.96	-4.22	4.36	0.93	0.91	1.98	0.93
Río Verde-Cultivos	-1.86	2.02	0.97	-5.60	5.70	0.93	2.10	2.26	0.96
Reserva la Biosfera Mapimí	-0.06	1.21	0.98	-2.83	3.07	0.98	2.42	3.09	0.96
Chihuahua	-0.27	1.09	0.98	-3.74	3.85	0.99	2.95	3.57	0.95
Cd. Juárez	0.25	1.06	0.99	-2.83	2.94	0.99	2.88	3.50	0.97
Delicias	0.35	1.22	0.98	-1.68	2.01	0.99	1.79	2.88	0.96
Durango	-0.08	0.87	0.97	-2.34	2.61	0.95	1.58	2.20	0.95
Fresnillo	-1.06	1.33	0.97	-4.57	4.71	0.94	1.85	2.46	0.94
Matehuala	-2.48	2.60	0.97	-5.73	5.81	0.96	1.26	1.62	0.95
Mondlova	0.50	1.20	0.99	-1.24	1.55	0.99	2.37	3.12	0.97
Parral	-1.06	1.52	0.98	-3.79	3.92	0.98	1.99	2.20	0.97
Saltillo	-2.22	2.62	0.97	-5.81	5.99	0.98	1.30	2.56	0.92
San Luis Potosí	-2.19	2.31	0.96	-5.30	5.40	0.94	0.98	1.40	0.94
Torreón	-0.08	1.06	0.98	-2.29	2.56	0.98	1.66	2.31	0.96
Zacatecas	-2.61	2.71	0.97	-6.03	6.13	0.94	0.37	1.42	0.95
Colonia El Valle	-0.63	1.30	0.99	-4.11	4.23	0.99	2.35	3.05	0.97
El Uno	-0.89	1.38	0.99	-4.56	4.67	0.99	2.40	2.91	0.97
Jagueyes	-3.13	3.33	0.99	-6.93	7.00	0.99	0.12	2.05	0.97
Noria De Junco	-0.23	0.95	0.97	-3.68	3.84	0.95	2.53	2.91	0.93
Atascaderos	-0.36	1.44	0.99	-3.28	3.45	0.99	1.84	2.96	0.97

Tabla 9. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	Temperatura Promedio		Temperatura Máxima		Temperatura Mínima	
	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE
Lincoln National Forest	99%	0.042	99%	0.04	99%	0.036
Fort Apache Restauration	99%	0.031	99%	0.035	99%	0.025
Area de Protección de Flora y Fauna	99%	0.041	99%	0.037	99%	0.037
Colonia Búfalo	90%	0.011	99%	0.025		0.002
La Estanzuela	99%	0.028	99%	0.034	99%	0.034
La Nopalera	95%	0.006	99%	0.018		-0.003
Campo Alto	99%	0.01	99%	0.024	95%	0.006
Sierra Madre Occidental 1	99%	0.038	99%	0.026	99%	0.036
Sierra Madre Occidental 2	99%	0.028	99%	0.028	99%	0.032
Sierra Madre Occidental 3	99%	0.051	99%	0.037	99%	0.064
Durango-Zacatecas	99%	0.012	99%	0.014	99%	0.013
Durango-Zacatecas 2	99%	0.012	95%	0.012	99%	0.014
Villanueva		-0.005		-0.008		0.003
Zapoqui		-0.004		-0.006		-2.60E-04
Jalpa		-0.004		-0.007	95%	-0.008
Las Tablas	99%	0.01	95%	0.009	99%	0.016
Norte Jalisco-Cultivos	95%	-0.003	95%	-0.014	95%	-0.008
Río Verde-Cultivos		-3.79E-04		-0.001	95%	-0.007
Reserva la Biosfera Mapimí	99%	0.02	99%	0.023	99%	0.022
Chihuahua	95%	0.055	99%	0.039	99%	0.049
Cd. Juárez	95%	0.062	99%	0.041	99%	0.048
Delicias	95%	0.024	99%	0.035	99%	0.034
Durango	95%	0.009	99%	0.036	99%	0.016
Fresnillo	95%	0.015	99%	0.031	95%	0.009
Matehuala	95%	0.019	99%	0.035	95%	0.009
Monclova	95%	0.008	99%	0.035	99%	0.02
Parral	95%	0.02	99%	0.039	99%	0.022
Saltillo	95%	0.056	99%	0.037	99%	0.011
San Luis Potosí	95%	0.009	99%	0.035		-0.002
Torreón	95%	0.029	99%	0.045	99%	0.014
Zacatecas	95%	0.015	99%	0.031	95%	0.005
Colonia El Valle	95%	0.009	99%	0.019		9.60E-04
El Uno	90%	0.009	95%	0.015		0.002
Jagueyes	99%	0.022	99%	0.025	99%	0.017
Noria De Junco	99%	0.012	95%	0.015	99%	0.016
Atascaderos	90%	0.009	95%	0.018		-0.001

Tabla 10. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura de **verano** promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	TMEAN		TMAX		TMIN	
	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE
Lincoln National Forest	99%	0.017	99%	0.019	99%	0.015
Fort Apache Restauration	99%	0.011	99%	0.014	95%	0.009
Area de Protección de Flora y Fauna	99%	0.01		0.005	99%	0.01
Colonia Búfalo	95%	0.005	95%	0.008		0.002
La Estanzuela	99%	0.011	95%	0.011	99%	0.012
La Nopalera		0.001		0.004		-0.002
Campo Alto	90%	0.004	90%	0.007		0
Sierra Madre Occidental 1	95%	0.005		0.003	99%	0.009
Sierra Madre Occidental 2	95%	0.006		0.004	99%	0.01
Sierra Madre Occidental 3	99%	0.007		0.001	99%	0.014
Durango-Zacatecas	95%	0.004		0.004	99%	0.004
Durango-Zacatecas 2	95%	0.005		0.005	95%	0.004
Villanueva		-0.002		-0.005		0
Zapoqui		-0.002		-0.006		-0.001
Jalpa		-0.002		-0.004	90%	-0.002
Las Tablas		0.001		-0.002	99%	0.004
Norte Jalisco-Cultivos		-0.001		-0.004		-0.001
Río Verde-Cultivos		0		-0.001		-0.002
Reserva la Biosfera Mapimí	95%	0.008	95%	0.008	99%	0.008
Chihuahua	99%	0.056	95%	0.034	99%	0.091
Cd. Juárez	99%	0.07	95%	0.039	99%	0.126
Delicias	95%	0.029	95%	0.037	99%	0.023
Durango	95%	0.009		0.007		0.007
Fresnillo	95%	0.016		0.008	99%	0.02
Matehuala	99%	0.022	95%	0.02	99%	0.017
Monclova	95%	0.019	90%	0.028		0.008
Parral	99%	0.023	95%	0.034	99%	0.023
Saltillo	95%	0.052	99%	0.021	99%	0.029
San Luis Potosí	95%	0.015		0.009	99%	0.017
Torreón	99%	0.031	99%	0.024	99%	0.042
Zacatecas	95%	0.014		0.004	95%	0.014
Colonia El Valle	90%	0.005		0.007		0.002
El Uno	95%	0.007	95%	0.009		0.003
Jagueyes	95%	0.008	90%	0.008	95%	0.006
Noria De Junco	95%	0.006		0.004	95%	0.005
Atascaderos	95%	0.006	95%	0.009		0

Tabla 11. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para temperatura de **invierno** promedio, máxima y mínima, al aplicar la prueba de Mann – Kendall, la pendiente de Sen indica el cambio por año (°C/año). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	TMEAN		TMAX		TMIN	
	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE
Lincoln National Forest		0.009		0.007	95%	0.011
Fort Apache Restauration		0.006		0.005		0.007
Area de Protección de Flora y Fauna	95%	0.015	95%	0.016	95%	0.013
Colonia Búfalo		-0.002		0.003		-0.008
La Estanzuela		0.008	95%	0.011		0.007
La Nopalera		0.004	95%	0.011		-0.004
Campo Alto		0.006	95%	0.011		0.001
Sierra Madre Occidental 1	99%	0.015	99%	0.016	99%	0.013
Sierra Madre Occidental 2	99%	0.014	99%	0.015	99%	0.012
Sierra Madre Occidental 3	99%	0.022	99%	0.02	99%	0.023
Durango-Zacatecas		-0.003		0.008		0.003
Durango-Zacatecas 2		0.004		0.006		0.002
Villanueva		0.001		0.002		-0.003
Zapoqui		0		0.002		-0.004
Jalpa		-0.001		0	95%	-0.007
Las Tablas	90%	0.006		0.007		0.003
Norte Jalisco-Cultivos		-0.003		-0.004		-0.006
Río Verde-Cultivos		-0.002		0.002		-0.006
Reserva la Biosfera Mapimí		0.002		0.003		0.002
Chihuahua	99%	0.059	95%	0.034	99%	0.068
Cd. Juárez	99%	0.058	95%	0.037	99%	0.082
Delicias		0.003	95%	0.018		-0.005
Durango		0.004	90%	0.017		0.004
Fresnillo		-0.002		0.007		-0.003
Matehuala	90%	0.009	95%	0.007	95%	0.015
Monclova		0.002		0.015		-0.003
Parral		0.006	95%	0.03		-0.006
Saltillo	99%	0.049	95%	0.009	99%	0.089
San Luis Potosí		-0.005		-0.011		-4.27E-04
Torreón		0.011	90%	0.011		0.016
Zacatecas		-0.001		0.007		-0.007
Colonia El Valle		0.003		0.005		0.002
El Uno		0.002		0.005		-0.001
Jagueyes	90%	0.008	90%	0.001		0.003
Noria De Junco		0.004		0.004		0.002
Atascaderos		-0.002		0.002		-0.005

Tabla 12. Muestra los cálculos de error (BIAS y RMSE) con unidades [g/kg] y la correlación, usando NARR y las simulaciones numéricas. Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	HUMEDAD PROMEDIO			HUMEDAD - VERANO			HUMEDAD - INVIERNO		
	BIAS	RMSE	PEARSON	BIAS	RMSE	PEARSON	BIAS	RMSE	PEARSON
Lincoln National Forest	-0.22	0.47	0.99	0.16	0.49	0.96	-0.44	0.52	0.85
Fort Apache Restauration	-0.05	0.39	0.99	0.26	0.58	0.98	-0.17	0.25	0.90
Area de Protección de Flora y Fauna	0.00	0.61	0.99	0.57	0.90	0.96	-0.12	0.32	0.88
Colonia Búfalo	0.11	0.71	0.97	0.73	1.04	0.87	-0.36	0.50	0.90
La Estanzuela	0.08	0.76	0.98	0.91	1.13	0.90	-0.38	0.49	0.92
La Nopalera	0.12	0.78	0.98	1.02	1.18	0.92	-0.30	0.42	0.92
Campo Alto	0.18	0.77	0.97	0.88	1.15	0.82	-0.23	0.42	0.92
Sierra Madre Occidental 1	0.52	1.01	0.97	1.31	1.43	0.83	-0.01	0.54	0.81
Sierra Madre Occidental 2	-0.77	1.02	0.98	-0.64	0.87	0.84	-0.69	0.87	0.85
Sierra Madre Occidental 3	0.94	1.44	0.98	2.32	2.40	0.91	0.31	0.51	0.87
Durango-Zacatecas	0.06	0.78	0.96	0.74	0.98	0.79	-0.54	0.67	0.90
Durango-Zacatecas 2	0.03	0.77	0.96	0.65	0.90	0.77	-0.56	0.69	0.89
Villanueva	-0.01	0.83	0.97	0.73	0.95	0.75	-0.60	0.75	0.88
Zapoqui	-0.01	0.82	0.97	0.73	0.94	0.76	-0.60	0.75	0.88
Jalpa	0.03	0.80	0.97	0.75	0.96	0.78	-0.44	0.66	0.87
Las Tablas	-0.09	0.86	0.97	0.73	0.95	0.78	-0.62	0.81	0.85
Norte Jalisco-Cultivos	-0.04	0.75	0.96	0.45	0.80	0.73	-0.50	0.72	0.86
Río Verde-Cultivos	0.77	1.13	0.97	1.43	1.51	0.54	0.01	0.50	0.81
Reserva la Biosfera Mapimí	-0.18	0.81	0.96	0.27	0.86	0.77	-0.78	0.92	0.87
Chihuahua	-0.06	0.65	0.98	0.64	0.91	0.93	-0.34	0.46	0.90
Cd. Juárez	0.14	0.55	0.99	0.74	0.87	0.97	-0.27	0.39	0.89
Delicias	-0.08	0.70	0.97	0.56	0.97	0.89	-0.45	0.56	0.91
Durango	-0.08	0.87	0.97	0.75	1.01	0.80	-0.43	0.63	0.88
Fresnillo	0.12	0.75	0.96	0.65	0.87	0.75	-0.43	0.60	0.88
Matehuala	0.03	0.73	0.97	0.78	0.91	0.59	-0.57	0.73	0.85
Monclova	-0.43	0.74	0.98	-0.28	0.63	0.80	-0.71	0.86	0.85
Parral	0.01	0.72	0.98	0.76	1.01	0.88	-0.40	0.50	0.92
Saltillo	0.22	0.64	0.98	0.58	0.70	0.80	-0.40	0.53	0.91
San Luis Potosí	1.09	1.24	0.97	1.22	1.30	0.63	-0.01	0.45	0.85
Torreón	-0.14	0.73	0.96	0.18	0.78	0.75	-0.56	0.71	0.90
Zacatecas	-0.02	0.73	0.97	0.45	0.71	0.74	-0.57	0.72	0.87
Colonia El Valle	0.06	0.65	0.99	0.79	1.00	0.97	-0.41	1.01	0.25
El Uno	0.14	0.64	0.98	0.83	1.02	0.95	-0.30	0.39	0.92
Jagueyes	-0.04	0.63	0.98	0.69	0.90	0.95	-0.44	1.02	0.32
Noria De Junco	0.28	0.80	0.96	0.76	0.92	0.71	-0.57	1.43	0.24
Atascaderos	0.19	0.72	0.98	0.90	1.11	0.87	-0.41	0.49	0.92

Tabla 13. Muestra la significancia estadística y pendiente de Sen para la razón de mezcla promedio para el ciclo anual y estacional, al aplicar la prueba de Mann – Kendall la pendiente de Sen indica el cambio por año ($g\ kg^{-1}/\ año$). Los campos están indicados en color naranja, las zonas de cultivos en verde y, las ciudades en marrón.

	HUMEDAD PROMEDIO		HUMEDAD - VERANO		HUMEDAD - INVIERNO	
	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE	SIGNIFICANCIA	PENDIENTE
Lincoln National Forest	95%	-0.008		0.001	95%	-0.003
Fort Apache Restauration	99%	-0.011		-0.002	95%	-0.003
Area de Protección de Flora y Fauna		9.39E-04	90%	0.008	95%	-0.004
Colonia Búfalo		-0.002		0.004	95%	-0.005
La Estanzuela		-0.001		0.005	95%	-0.005
La Nopalera		-0.002	90%	0.006	95%	-0.006
Campo Alto		0.003	90%	0.005	95%	-0.005
Sierra Madre Occidental 1	95%	0.011	95%	0.006		-0.003
Sierra Madre Occidental 2		0.006	95%	0.006	95%	-0.005
Sierra Madre Occidental 3		0.002	95%	0.008	95%	-0.007
Durango-Zacatecas	90%	0.011	95%	0.006		-0.003
Durango-Zacatecas 2	95%	0.012	95%	0.005		-0.002
Villanueva	99%	0.018	99%	0.009		-0.001
Zapoqui	99%	0.019	99%	0.009		-0.001
Jalpa	99%	0.019	95%	0.008		-0.001
Las Tablas	99%	0.017	99%	0.008		-0.001
Norte Jalisco-Cultivos	99%	0.015	95%	0.008		-0.001
Río Verde-Cultivos		0.008	95%	0.005	95%	-0.006
Reserva la Biosfera Mapimí		0.007		0.003	95%	-0.005
Chihuahua	95%	-0.008		-0.001	99%	-0.006
Cd. Juárez	95%	-0.008		0	95%	-0.005
Delicias		-0.003		0.002	95%	-0.005
Durango		0.007	95%	0.005	90%	-0.004
Fresnillo	95%	0.017	95%	0.006		-0.002
Matehuala	95%	0.018	99%	0.006		-0.003
Monclova		0.0001832		0.002	95%	-0.006
Parral		-0.001		0.005	95%	-0.006
Saltillo		0.003		0.001	95%	-0.005
San Luis Potosí	95%	0.019	99%	0.006		-0.001
Torreón		0.006	95%	0.004	95%	-0.005
Zacatecas	95%	0.016	95%	0.006		-0.002
Colonia El Valle		0.003		0.004	90%	-3.00E-03
El Uno		-0.004		0.003	95%	-0.004
Jagueyes		-5.24E-04		0.004	95%	-0.004
Noria De Junco	95%	0.011	95%	0.005		-0.003
Atascaderos		-7.37E-04		0.003	95%	-0.01

Anexo IV. Promedios decadales de razón de mezcla

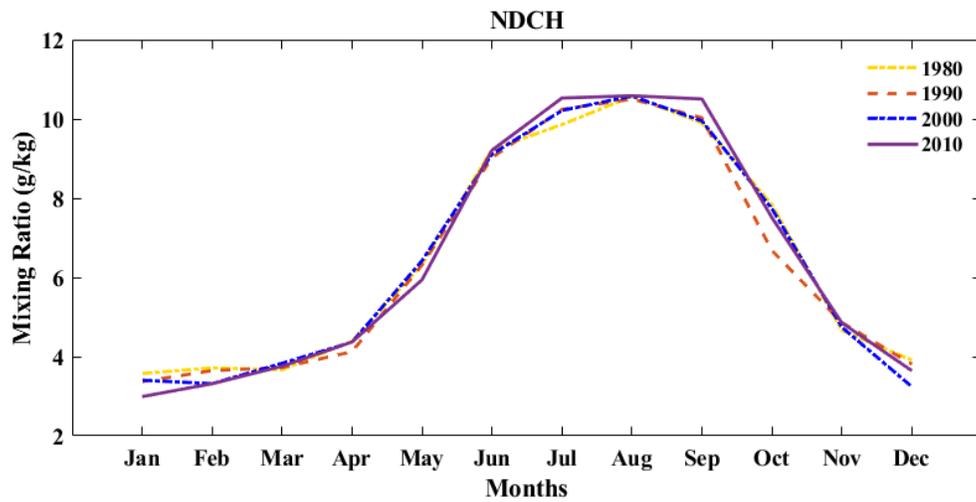


Figura 76. Muestra la distribución de razón de mezcla promedio mensual de cada década para el SDCH.

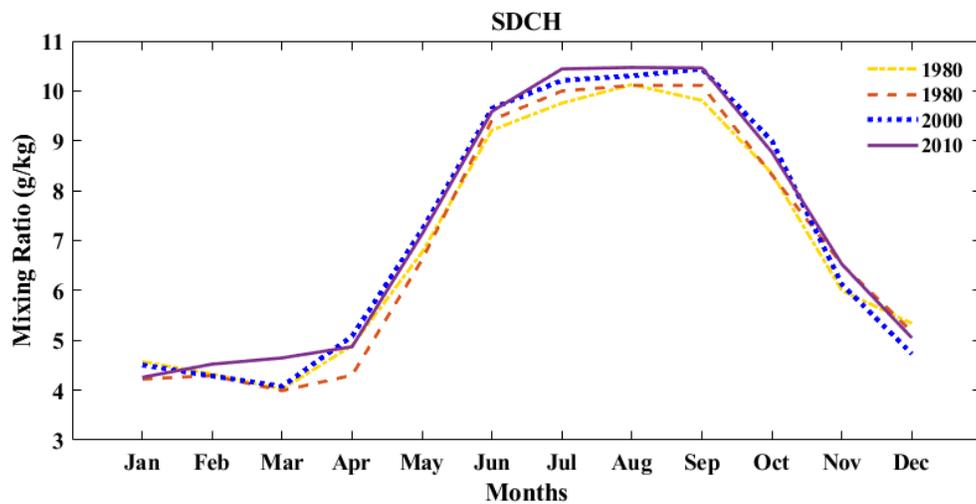


Figura 77. Muestra la distribución de razón de mezcla promedio mensual de cada década para el SDCH.