



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN**

*REVISIÓN DE LA CLIMATOLOGÍA DE HELADAS Y
DÍAS CÁLIDOS EN MÉXICO*

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTAN:

**JOYCE IBETH CASANOVA CHACÓN
MÓNICA PAOLA OLGUÍN RODARTE**

ASESOR INTERNO:
M. en C. LEODEGARIO SANSÓN REYES

ASESOR EXTERNO:
DRA. ROSARIO DE LOURDES ROMERO CENTENO



CIUDAD DE MÉXICO

ABRIL DE 2016

AGRADECIMIENTOS

Joyce:

GRACIAS a mi madre por el infinito amor y apoyo brindado en este proyecto y a lo largo de mi existencia, por ser un motor e inspiración, mi heroína. A mi abuelita Elena por sembrar en mí la semilla del aprendizaje, su recuerdo y amor me acompañan siempre. Agradezco a mi padre por motivarme a estudiar una carrera universitaria, a mi abuelo Rubén por su ejemplo de trabajo, a mi tía Silvia por sus cuidados y cariño. Agradezco a mis hermanos, mejores amigos, dadores de risa y amor: Grecia y Ricardito, porque pese a la distancia están conmigo en todo momento, porque puedo contar con ellos y viceversa. A mis primos que son como hermanos, con quienes he compartido alegrías, historias y siempre me preguntaban cómo iba la tesis, cómo me va en la vida: Julio, Betsy y Mariam.

Un especial agradecimiento a la familia Olguín Rodarte, por abrirme las puertas de su hogar, por su apoyo, su cariño, gracias por hacerme sentir en casa; a Carla, a Becky, por esta maravillosa experiencia y lo que vivimos en “El Depa”, y por supuesto a Monii, por la amistad que iniciamos en la Universidad y ha trascendido, por aventurarse conmigo en este proyecto no solo profesional también de vida, por la confianza, las risas, las discusiones, los viajes, los libros, las frases en la pared, las canciones... por tantas cosas que no terminaría de enumerar.

Gracias a los afortunados encuentros, por coincidir en este viaje con personas que me han brindado su apoyo y cariño, a la turista de la vida: Liz; a mis grandes amigas de la Universidad, roomies, compañeras de tareas, viajes, de noches, hermanas: Tere e Ilse; a mis amigos de la vida: Guillo, Pau... esa familia que uno escoge.

A la Dra. Rosario, a quien le tengo una gran admiración, gracias por la confianza que depositó en nosotras para llevar a cabo esta tesis, por la paciencia, su apoyo y todo el conocimiento compartido. Asimismo doy gracias al Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y al Dr. Jorge Zavala por el apoyo becario otorgado durante la realización de este trabajo.

Agradezco también al Maestro Leodegario por su apoyo en todo momento y por vincularnos con la Dra. Rosario, así como impulsarnos en este deseo de incursionar en la Meteorología.

Gracias al Instituto Politécnico Nacional, mi casa de estudios, por brindarme la oportunidad de estudiar una carrera profesional y formarme como Ingeniero Geofísico.

Y para finalizar por si algún agradecimiento se me pasó, pero seguro entra en éste donde coincido con Violeta Parra... ¡Gracias a la Vida!

Mónica:

Esta tesis está dedicada a quienes la han hecho posible ya sea por razones académicas o personales. A mi padre con sus manos fuertes y su mirada profunda, que con voz pausada me leía los cuentos en mis tardes enferma, que despertó en mi la curiosidad por la ciencia y el amor por las letras, a su rectitud, honestidad e inteligencia; a mi madre y sus manos suaves que han peinado mi pelo más de mil veces, que demuestra el amor y lo vive y me ha enseñado a hacerlo también, a su comprensión, ternura, calidez y confianza. A la sabiduría, astucia y bondad de mi abuelita que es un ejemplo de fortaleza.

Va también para mis almas gemelas, mis compañeras de juegos, mis cómplices de vida, que son a quienes les puedo contar hasta la más alocada de mis historias, con quienes río y lloro, mis mejores amigas, para mis hermanas Carla que es buena como ninguna y Becky que cuando se ríe no me queda más remedio que reír con ella, que no han permitido que mi vida sea aburrida, a quienes amo infinitamente.

A mis amigas, Joyce que me deja hacerle cualquier peinado, con quien comparto el amor por la ciencia, la poesía y los libros, mi compañera en este viaje y de muchos otros, Paty que ha llorado solo de verme llorar, e Ilse con sus eternos ojos llenos de ternura, que me conocen mejor que yo misma, con quienes cuento siempre, que me han visto crecer y convertirme en la persona que soy hoy, con las que he aprendido el verdadero valor de la amistad.

A la Dra. Rosario que con paciencia nos fue guiando para la realización de esta tesis, de quién he aprendido mucho y a quien admiro profundamente.

Al Maestro Leodegario por confiar en nosotras, quien ha sido un excelente maestro y nos ha brindado consejo y apoyo en los momentos que lo hemos necesitado.

También le agradezco a quienes me han apoyado, a mi tía Vero, mi tía Lina, mi tía Teresa, mi primo Hiram y mi prima Ellise, a todas esas personas que me han hecho reír, mis amigas de la universidad con quienes he compartido tanto, Tere e Ilse, a mis profesores de quienes he aprendido mucho y al Instituto Politécnico Nacional por abrirme las puertas de lo que ha sido una maravillosa aventura.

Y finalmente para todos los reyes y reinas de todas mis historias.

Gracias a todos.

Índice de contenido

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS	11
CAPÍTULO 1. CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTREMAS Y FACTORES QUE LAS FAVORECEN	12
1.1 EXTREMOS CLIMÁTICOS.....	12
1.2. LA ATMÓSFERA Y SU RELACIÓN CON CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTREMAS.....	14
1.2.1. <i>La atmósfera</i>	14
1.2.2. <i>Balance regional de radiación</i>	16
1.2.3. <i>Circulación general de la atmósfera</i>	17
1.2.4. <i>Ondas de Rossby</i>	20
1.3. HELADAS.....	23
1.3.1. <i>Elementos que influyen en la ocurrencia de heladas</i>	23
1.3.2. <i>Tipos de heladas</i>	25
1.3.3. <i>Consecuencias de las heladas</i>	29
1.4. ONDAS DE CALOR.....	31
1.4.1. <i>Origen de las ondas de calor</i>	31
1.4.2. <i>Consecuencias de las ondas de calor</i>	33
1.5. EL RELIEVE DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	35
1.6. EL NIÑO- OSCILACIÓN DEL SUR.....	37
1.7. RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS EVENTOS EXTREMOS.....	39
CAPÍTULO 2. BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA	44
2.1. DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	44
2.2. DATOS DEL NARR.....	46
2.3. METODOLOGÍA.....	47
2.3.1. <i>Algoritmo para el procesamiento de los datos de temperatura</i>	47
2.3.2. <i>Índices que definen a los extremos climáticos</i>	49
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
3.1. ÍNDICE FD.....	51
3.2 ÍNDICES BASADOS EN PERCENTILES.....	59
3.2.1. <i>Percentiles 10 y 90</i>	59

3.2.2. Índice TN10p	65
3.2.3. Índice TX90p	70
3.2.4. Índice WSDI.....	80
3.3 TENDENCIAS DE LA TEMPERATURA.....	85
3.3.1 Tendencias de la temperatura máxima y mínima.....	85
3.3.2 Tendencias del rango diurno de temperatura.....	87
3.3.3 Tendencias de las heladas en México	89
3.3.4 Tendencias de días cálidos en México	90
CONCLUSIONES.....	92
RECOMENDACIONES.....	95
REFERENCIAS	96

Índice de Figuras

Figura 1.2.1. Estructura vertical de la atmósfera	15
Figura 1.2.2. Efecto de Coriolis	18
Figura 1.2.3. Circulación general de la atmósfera	19
Figura 1.2.4. Formación de las ondas de Rossby	22
Figura 1.3.1. Tipos de heladas	26
Figura 1.3.2. Izquierda: Helada blanca, hielo sobre las hojas de una planta. Derecha: Helada negra, se observa el efecto de necrosis en el cultivo.	29
Figura 1.4.1. Patrón de sistemas de alta presión (H) en la parte media de la atmósfera sobre el hemisferio norte ...	32
Figura 1.4.2. Temperaturas máximas en México registradas el 5 de Junio de 2014	33
Figura 1.5.1. Mapa topográfico de la República Mexicana	37
Figura 1.6.1. Índice oceánico de El Niño (ONI).....	38
Figura 1.7.1. Esquema de la distribución de temperaturas en el clima actual	40
Figura 1.7.2. Esquema de la distribución de temperaturas si el promedio se desplazara hacia temperaturas más cálidas.....	41
Figura 1.7.3. Esquema de la distribución de temperaturas si las condiciones extremas fueran más frecuentes	41
Figura 1.7.4. Esquema de la distribución de temperaturas en un posible clima futuro, en el cual cambiara tanto el promedio como el rango de extremos.....	42
Figura 2.1.1. Estaciones de los EUA cercanas a la frontera con México.....	45
Figura 2.2.1. Dominio que abarca el reanálisis NARR ilustrado considerando uno de cada 17 puntos de la malla horizontal	47
Figura 3.1.1. Índice FD para los años de 1979 a 1981.	52
Figura 3.1.2. Índice FD para los años de 1994 a 1998.	54
Figura 3.1.3. Índice FD para los inviernos (Octubre-Marzo) de 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998 y 1998-1999.....	55
Figura 3.1.4. Índice FD para la zona centro del país en los años de 1983 y 1989.....	57
Figura 3.1.5. Índice FD para los estados de Chiapas y Oaxaca en los años de 1999 y 2009.....	58
Figura 3.2.1. Valores del percentil 10 para la temperatura mínima para los meses de Noviembre a Febrero.	60
Figura 3.2.2. Valores del percentil 10 para la temperatura mínima para los meses de Junio a Septiembre.....	61
Figura 3.2.3. Valores del percentil 90 para la temperatura máxima para los meses de Noviembre a Febrero.	62
Figura 3.2.4. Valores del percentil 90 para la temperatura máxima para los meses de Abril a Septiembre.....	64
Figura 3.2.5. Índice TN10p para los meses de invierno del periodo 1980-1981	66
Figura 3.2.6. Índice TN10p para los meses de invierno durante el evento de El Niño de 1982-1983	67
Figura 3.2.7. Índice TN10p para los meses de invierno del periodo 1993-1994.	68
Figura 3.2.8. Índice TN10p para los meses de invierno durante el evento de El Niño de 1997-1998	69
Figura 3.2.9. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1982.....	71
Figura 3.2.10. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1982.....	72
Figura 3.2.11. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1983.....	73
Figura 3.2.12. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1983.....	74
Figura 3.2.13. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1997.....	76
Figura 3.2.14. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1997.....	77
Figura 3.2.15. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1998.....	78
Figura 3.2.16. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1998.....	79
Figura 3.2.17. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 1981 a 1984	81
Figura 3.2.18. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 1995 a 1998	83
Figura 3.2.19. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 2007 a 2009	84

<i>Figura 3.3.1. Mapa de tendencias de la temperatura máxima durante 1979-2009</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.3.2. Mapa de tendencias de la temperatura mínima durante 1979-2009</i>	<i>87</i>
<i>Figura 3.3.3. Mapa de tendencias del rango diurno de temperaturas durante 1979-2009.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.3.4. Mapa de tendencias del índice FD durante 1979-2009.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.3.5. Mapa de tendencias del índice WSDI durante 1979-2009</i>	<i>91</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Años en los que ocurrieron eventos de ENSO durante el periodo de 1979 a 2009, clasificados según su fase e intensidad.....</i>	<i>39</i>
--	-----------

RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión actualizada de las temperaturas máximas y mínimas diarias para la República Mexicana utilizando los registros históricos del Servicio Meteorológico Nacional y otras fuentes de información complementarias, con el fin de analizar las variaciones temporales y espaciales de la ocurrencia de heladas y días cálidos en el país durante el periodo de 1979 a 2009. Para este propósito se calcularon diversos índices, absolutos y basados en percentiles, que proporcionan información sobre dichas variaciones. Se analizaron también las tendencias de las temperaturas máximas (TMax) y mínimas (TMin), del rango diurno de temperatura, de las heladas y de los eventos cálidos en el periodo mencionado. Los resultados obtenidos muestran tendencias positivas en la TMax en el 77% del territorio, con valores particularmente elevados en amplias zonas de la península de Baja California, Sonora y Chihuahua, mientras que en algunas zonas de Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Oaxaca y la península de Yucatán se observaron tendencias negativas. Asimismo, el 75% del país presentó tendencias positivas en la ocurrencia de eventos cálidos, siendo el noroeste, centro y sur las regiones más afectadas. Por otra parte, el mapa de tendencias de la TMin muestra una gran variabilidad espacial, con valores positivos en el 58% del territorio y negativos en el 42% restante; asimismo, el 38% del país presentó una tendencia a la disminución en el número de heladas por año, principalmente en el sur de Durango, centro y norte de Chihuahua y algunas zonas de Tlaxcala, Estado de México e Hidalgo, mientras que hacia el centro y sur de Zacatecas, el occidente de San Luis Potosí y algunas regiones altas de Sonora, Chihuahua y Durango se observó una tendencia positiva en la ocurrencia anual de heladas. También se realizó un análisis sobre el comportamiento de las condiciones extremas de temperatura durante los eventos muy intensos de El Niño de 1982-1983 y 1997-1998, el cual muestra que los impactos de este fenómeno en México varían de un evento a otro y de una región a otra del país.

ABSTRACT

In this thesis, an updated review of the daily maximum and minimum temperatures for Mexico is presented using historical records from the Servicio Meteorológico Nacional and other sources of information, in order to analyze the temporal and spatial variations in the occurrence of frost and warm days in the country during the period 1979-2009. For this purpose several indices were calculated, both absolute and based on percentiles, which provide information about such variations. Trends in maximum temperature (TMax), minimum temperature (TMin), the diurnal temperature range, and frost and warm events were also analyzed in the mentioned period. The results show positive trends in TMax in 77% of the territory, with particularly high values in large areas of the Baja California peninsula, Sonora and Chihuahua, while negative trends were observed in some areas of Coahuila, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Oaxaca and the Yucatan peninsula. Also, 75% of the country shows positive trends in the occurrence of warm events, being the northwest, central and southern regions the most affected. On the other hand, the map of TMin trends shows a high spatial variability, with positive values in 58% of the territory and negative in the remaining 42%; moreover, 38% of the country showed a decrease trend in the number of frost per year, mainly in the south of Durango, central and northern Chihuahua and parts of Tlaxcala, State of Mexico and Hidalgo, while a positive trend was observed towards the center and southern Zacatecas, western San Luis Potosí and some higher regions of Sonora, Chihuahua and Durango. The analysis of the behavior of extreme temperature conditions during the intense El Niño events of 1982-1983 and 1997-1998, shows that the impacts of this phenomenon in Mexico vary from one event to another and from one region of the country to another.

INTRODUCCIÓN

Año con año muy diversas regiones del planeta se ven afectadas por eventos meteorológicos extremos, entre los cuales se encuentran las heladas y las ondas de calor. Este tipo de eventos afectan al territorio mexicano, produciendo un impacto negativo en distintos sectores sociales, económicos y productivos. Por ejemplo, en el caso de las ondas de calor, las poblaciones afectadas pueden sufrir un impacto económico por el alto consumo de energía eléctrica utilizada para mitigar los efectos de las altas temperaturas. Sin embargo, habría que mencionar que en muchas localidades de México las casas habitación, los lugares de trabajo y las escuelas no cuentan con sistemas de aire acondicionado, haciéndolas aún más vulnerables a este tipo de eventos. En este sentido, las poblaciones se ven afectadas de manera muy importante en el sector salud al aumentar la morbilidad y mortalidad de los habitantes, siendo más vulnerables los niños pequeños, los ancianos y las personas que padecen alguna enfermedad (Ize, 2002); de hecho, las ondas de calor se encuentran entre los eventos meteorológicos extremos que producen más muertes a nivel mundial (Robinson, 2001). Asimismo, sus efectos se pueden ver agravados en las zonas urbanas debido a lo que se conoce como “efecto de isla de calor”, provocado por el cambio de áreas con vegetación por áreas pavimentadas y con edificaciones (Jáuregui, 2009), y también pueden contribuir a provocar incendios y producir daños a los cultivos con las consecuentes pérdidas económicas y de ecosistemas.

En cuanto a las heladas (ocurrencia de temperatura por debajo de los 0°C cerca de la superficie), éstas afectan principalmente a la agricultura y a las poblaciones en zonas rurales altas y marginadas, donde la gente no cuenta con los recursos necesarios para protegerse de las bajas temperaturas. Buena parte del territorio mexicano está conformado por cadenas montañosas y cordilleras con elevaciones considerables, en donde prevalece un clima frío y suelen ocurrir heladas. Por otra parte, nuestro país se ve afectado año con año por masas de aire frío y seco provenientes de latitudes altas, especialmente a finales del otoño y durante el invierno, que producen heladas intensas conforme se desplazan a lo largo del territorio¹. De forma similar a lo que sucede con las

ondas de calor, la población más susceptible y vulnerable a las heladas son los niños y adultos mayores de las comunidades pobres y marginadas. Cabe mencionar que el aumento poblacional acelerado y el incremento de la pobreza en México generan mayor vulnerabilidad y agravan los impactos de estos eventos extremos.

Dadas las consecuencias de estos fenómenos meteorológicos en diversos sectores de la población y en la economía de una sociedad, es evidente la importancia que tiene su estudio. Una de las preocupaciones más grandes en la actualidad es el posible incremento en la frecuencia de estos eventos a nivel global como consecuencia de un cambio climático. Trabajos realizados recientemente plantean que: “En los últimos 50 años, días calientes, noches calientes y ondas de calor se han hecho más frecuentes y podrían afectar la salud de miles de personas en algunas partes del mundo, particularmente en aquéllas con poca capacidad de adaptabilidad.” (IPCC, 2007). Sin embargo, la evaluación de los cambios en los extremos climáticos no es trivial. Por razones estadísticas, un análisis válido de los extremos climáticos requiere de series de tiempo largas para obtener estimaciones razonables de la intensidad y frecuencia de dichos fenómenos. Además, las series de datos deben tener preferentemente una resolución de tiempo diaria. Este requisito puede ser especialmente problemático porque en varias partes del mundo hay una falta de observaciones diarias de alta calidad (WMO, 2009). Como se señala en el Cuarto Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, 2007), en muchas regiones del mundo todavía no es posible hacer evaluaciones firmes de eventos extremos. Como resultado, no se sabe acerca de los cambios que éstos han tenido con el tiempo (WMO, 2009).

En este contexto, el objetivo general y los objetivos particulares que se plantearon para el desarrollo de esta tesis se describen a continuación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Analizar las variaciones espaciales y temporales de la ocurrencia de heladas y días cálidos en la República Mexicana utilizando mapas diarios de las temperaturas máximas y mínimas de alta resolución espacial para el periodo de 1979 a 2009.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Obtener los mapas que representan el conteo anual de días con ocurrencia de helada para los 31 años del periodo 1979-2009 para analizar la variabilidad espacial e interanual.
2. Obtener los valores mensuales de los percentiles 10 y 90 para las temperaturas mínimas y máximas, respectivamente, y analizar su variabilidad espacial y estacional.
3. Calcular diversos índices basados en los percentiles obtenidos con el objeto de realizar un análisis de extremos climáticos.
4. Calcular y obtener los mapas de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas, del rango diurno de temperatura, de la ocurrencia anual de heladas y de eventos cálidos para el periodo de estudio.

CAPÍTULO 1. CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTREMAS Y FACTORES QUE LAS FAVORECEN

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, las condiciones climáticas extremas afectan de una manera muy importante a la sociedad en distintos rubros, como el económico, el ecológico y el social. Entre los eventos climáticos extremos se encuentran las heladas y las ondas de calor, las cuales afectan a México con frecuencia. A continuación se describen las condiciones climáticas y los factores ambientales que están asociados con la ocurrencia de estos fenómenos.

1.1 EXTREMOS CLIMÁTICOS

El término “extremos climáticos”, como se utiliza en el documento de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los E.U.A. (NOAA, por sus siglas en inglés), define a los fenómenos meteorológicos individuales que son inusuales en su ocurrencia o tienen potencial destructivo, como los huracanes y tornados, mientras que la expresión “condiciones climáticas extremas” se utiliza para describir eventos similares pero que perduran durante periodos de tiempo más largos (por ejemplo, sequías) (USCCSP, 2008).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Cuarto Informe de Evaluación analiza las condiciones meteorológicas extremas a nivel mundial y los cambios proyectados en el clima a largo plazo. En la actualidad hay evidencia de que el calentamiento global estará acompañado por cambios en la intensidad, la duración, la frecuencia y la extensión espacial del clima extremo.

Los extremos son una parte natural de un sistema climático estable. Por ejemplo, los huracanes causan mucha destrucción pero también proporcionan la precipitación necesaria a ciertas áreas del terreno y algunas comunidades de plantas tropicales

dependen de los vientos huracanados que derriban árboles altos, lo que permite que haya más luz solar para rejuvenecer árboles de crecimiento lento. La humanidad se ha adaptado a estos fenómenos, por lo que aquéllos que tengan lugar fuera de su rango de ocurrencia pueden producir impactos negativos. Los eventos extremos que ocurren en un periodo de tiempo corto reducen la capacidad de adaptación del sistema. El efecto acumulativo puede tener un impacto mucho más grande que los mismos eventos repartidos a lo largo de un periodo más largo. Por ejemplo, las ondas de calor y las sequías suelen ocurrir al mismo tiempo y su impacto es más grave que el provocado por cualquiera de ellos individualmente (USCCSP, 2008).

Dentro de un sistema de clima cambiante, la frecuencia de algunos de estos eventos tendrá modificaciones; por ejemplo, pueden ocurrir más ondas de calor y menos ondas de frío. El calentamiento inducido por el hombre afecta las variables climáticas, como la temperatura y la precipitación. Pequeños cambios en los promedios de muchas variables dan lugar a grandes cambios en sus extremos. Sin embargo, el impacto del cambio climático no sólo depende de los cambios en los eventos extremos, sino también de la adaptabilidad de la sociedad ante éstos. El grado de impacto está determinado por factores tales como la dinámica de la población, la situación económica, los códigos adecuados de construcción, la preparación para desastres y la eficiencia en el uso del agua (USCCSP, 2008).

Se ha hecho notar la importancia de los extremos climáticos en la sociedad, y en todas las latitudes del mundo se han realizado diversos estudios para su comprensión. Las heladas y ondas de calor son extremos climáticos que impactan a México y tienen fuertes consecuencias en diferentes sectores, de ahí la importancia de realizar estudios para avanzar en entender sus causas y poder pronosticarlas.

1.2. LA ATMÓSFERA Y SU RELACIÓN CON CONDICIONES CLIMÁTICAS EXTREMAS

1.2.1. La atmósfera

La Tierra está rodeada por una capa gaseosa llamada **atmósfera**, la cual está constituida principalmente por los siguientes gases: nitrógeno (78%), oxígeno (20.9%), argón (0.93%) y dióxido de carbono (0.038%). Asimismo, el aire incluye muchos otros gases y partículas que varían significativamente en el espacio y el tiempo, algunos ejemplos importantes son: el vapor de agua, partículas de polvo y el ozono.

Los intercambios de energía que continuamente ocurren entre la atmósfera y la superficie de la Tierra y entre la atmósfera y el espacio producen los efectos que llamamos *tiempo* (Lutgens et al., 2007).

La estructura vertical de la atmósfera, según Lutgens et al., 2007, se divide en (Fig.1.2.1):

- **Troposfera:** Es la capa donde vivimos y en ella la temperatura decrece con el incremento en la altitud. El espesor de la tropósfera no es el mismo alrededor del planeta, alcanza alturas superiores a los 16 km en los trópicos mientras que en las regiones polares se extiende a los 9 km o menos. Está en constante movimiento y en ella ocurren la mayoría de los fenómenos que conforman el tiempo meteorológico. El límite entre la tropósfera y la estratósfera es conocido como **tropopausa**. Debajo de la tropopausa las propiedades atmosféricas son transferidas fácilmente por turbulencias.
- **Estratosfera:** “Está formada por estratos de aire con poco movimiento vertical y, por lo mismo, es estable.” (Ayllón, 2013). En los primeros niveles de la estratósfera la temperatura permanece casi constante, hasta una altura de alrededor de 20 km, para después mostrar un incremento agudo que continúa hasta la **estratopausa** que se encuentra a una altura aproximada de 50 km sobre la superficie de la Tierra.

Las altas temperaturas en la estratósfera se deben a que el ozono contenido en ella absorbe la radiación solar.

- **Mesosfera:** En esta capa la temperatura vuelve a decrecer con la altura hasta la **mesopausa**, a unos 80 km sobre la superficie terrestre. El promedio aproximado de la temperatura en la mesósfera es de -90°C . Las temperaturas más bajas en la atmósfera ocurren en la mesopausa.
- **Termosfera:** Esta capa contiene sólo pequeñas cantidades de gases, pierde densidad gradualmente hasta que la atmósfera deja de existir. No se encuentra bien definido el límite superior de esta capa; la temperatura vuelve a incrementarse debido a la absorción de la radiación de onda corta, alcanzando valores mayores a los $1,000^{\circ}\text{C}$. La termosfera está completamente libre de nubes y vapor de agua y en ella ocurren ocasionalmente las auroras boreales y australes.

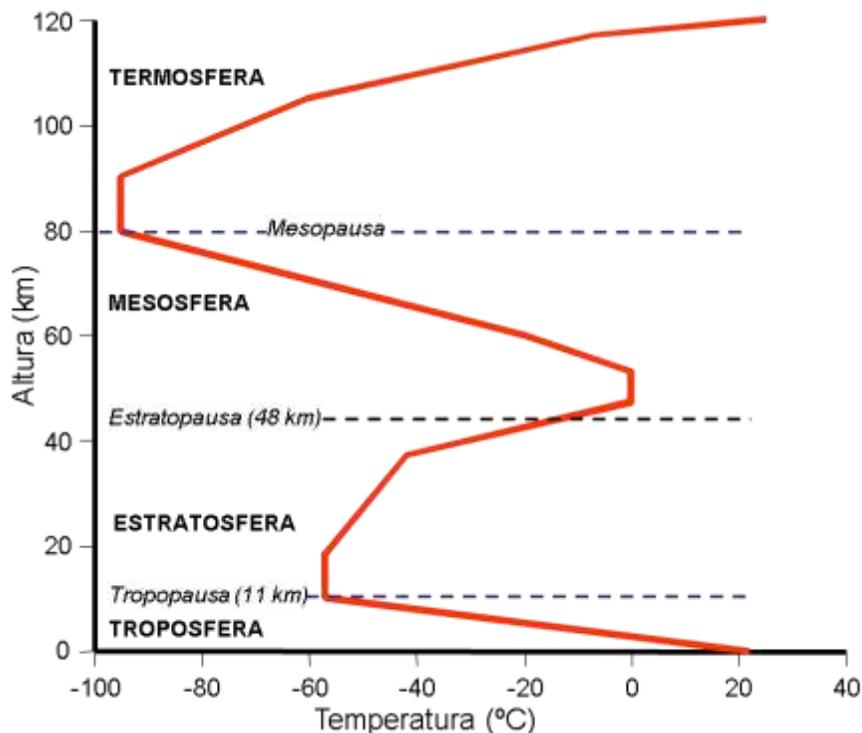


Figura 1.2.1. Estructura vertical de la atmósfera.²

A los cambios de la atmósfera que modifican las condiciones del tiempo se les denomina fenómenos meteorológicos; cuando éstos abarcan extensas zonas del planeta se les denomina sinópticos. La meteorología de *escala sinóptica* es la rama que se ocupa del análisis y la predicción de las estructuras meteorológicas cuya escala excede los 2,000 km³. Entre los factores sinópticos que condicionan la época de ocurrencia y la extensión de las regiones donde se desarrollan las heladas y ondas de calor se encuentran el balance regional de la radiación, la circulación general de la atmósfera y las ondas de Rossby.

A continuación se describe con detalle cada uno de estos factores.

1.2.2. Balance regional de radiación

La Tierra recibe energía del Sol en forma de radiación; cierta parte de esta energía solar es reflejada al espacio, lo cual se conoce como *albedo* y representa el 30% de la energía incidente. La superficie terrestre (incluyendo tierra y océanos) absorbe el 51% de la energía proveniente del Sol y otra porción, aproximadamente el 19%, es absorbida por las nubes y la atmósfera.

La radiación sobre la superficie terrestre no es homogénea, varía espacialmente porque depende de la inclinación con que llegan los rayos solares a una zona determinada, lo que influye en la cantidad de energía que ésta recibe. Por ejemplo, la región del ecuador recibe mayor cantidad de energía solar de la que radía, caso contrario a las zonas polares donde se pierde más energía de la que se obtiene por radiación solar. Si no hubiera transferencia de calor entre los trópicos y los polos, los trópicos se calentarían cada vez más y las regiones polares estarían cada vez más frías.

Cuando en una región de la superficie terrestre se emite una cantidad mayor de calor con respecto a la que se recibe, esto origina un enfriamiento que favorece la formación de la helada. Por el contrario, cuando una zona del planeta recibe más energía solar de la que puede radiar esto beneficia la ocurrencia de ondas de calor. La radiación solar afecta la ocurrencia de estos fenómenos meteorológicos, ya que la variación

estacional en el ángulo del Sol sobre el horizonte afecta a la cantidad de energía recibida en la superficie de la Tierra, por lo que es común que se presenten más heladas en invierno y ondas de calor durante el verano.

1.2.3. Circulación general de la atmósfera

Se le conoce como **Circulación General de la Atmósfera** (CGA) al “conjunto de sistemas de vientos y corrientes de aire que se presentan en la tropósfera debido a las diferencias de presión atmosférica que se originan en ella” (Castro et al., 2002). Dichos sistemas se presentan de forma más o menos permanente en todo el planeta.

La circulación atmosférica es un fenómeno impulsado por el reparto desigual de la energía solar en la superficie terrestre: “la energía calorífica se redistribuye desde las regiones más cálidas hasta las más frías por medio de la circulación de la atmósfera y del océano”⁴. Sin embargo, la configuración de la circulación atmosférica también depende de otros factores, como la rotación de la Tierra, la configuración de tierras y mares y las propiedades físicas del aire.

Además de la transferencia de energía que ocurre en la atmósfera es necesario incluir la transferencia de **momento angular**, que es una magnitud constante en los cuerpos en rotación. El momento angular (L) de una partícula de masa m que se mueve con velocidad v , se define como el producto de su vector de posición r y su momento lineal p , es decir, $L = r \times p = r \times mv$ ⁵. Es decir, que si se mantiene constante la masa, una disminución en el radio implica un aumento en la velocidad. Un ejemplo es el aumento de la velocidad de los vientos que se desplazan desde el ecuador hacia los polos y la disminución de los vientos que se desplazan en sentido contrario. Los vientos que se dirigen hacia el ecuador tienden a perder su velocidad conforme se acercan a éste, quedando retrasados respecto a la velocidad de rotación de la Tierra, por lo que se transforman en vientos del este; mientras que los vientos que parten del ecuador, llegan a latitudes medias ganando velocidad para conservar el momento angular, así rebasan la velocidad de rotación de la Tierra, transformándose en vientos del oeste.

Cuando masas de aire o de agua se desplazan siguiendo meridianos terrestres, su trayectoria y velocidad se ven modificadas debido al **efecto de Coriolis**, que es la fuerza que se genera debido a la rotación de la Tierra. Esta fuerza tiende a desviar la trayectoria de las partículas que se desplazan sobre la superficie terrestre, hacia la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda en el hemisferio sur (Fig.1.2.2). El efecto de Coriolis alcanza un valor máximo en los polos y es igual a cero en el ecuador.

El parámetro de Coriolis se define como: “la medida que corresponde a dos veces la componente vertical local de la velocidad angular de un planeta esférico”⁵, y se expresa como: $f = 2\Omega \cdot \sin \varphi$, donde: Ω es la velocidad angular del planeta ($=2\pi \text{ rad}$) y φ es la latitud.

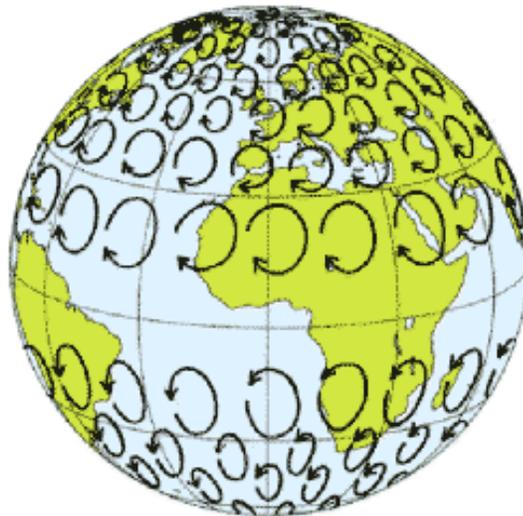


Figura 1.2.2. Efecto de Coriolis.⁶

Tomando en cuenta lo anterior, se puede explicar la CGA como un modelo idealizado en el que se consideran tres celdas o células de circulación vertical y que determinan los patrones de viento en superficie, como se representa en la figura 1.2.3 y que se describen a continuación.

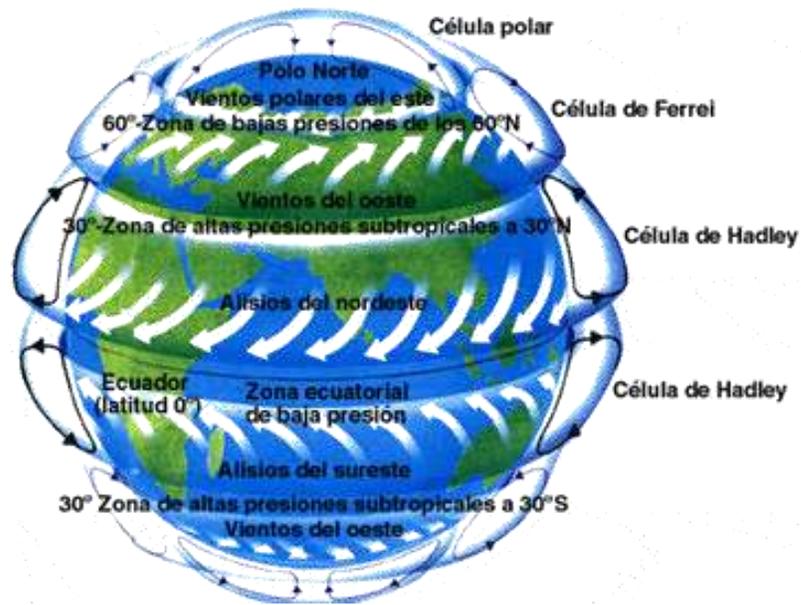


Figura 1.2.3. Circulación general de la atmósfera.⁷

Entre el ecuador y los 30° de latitud norte y sur se lleva a cabo un tipo de circulación vertical que “domina la atmósfera tropical con movimientos de ascenso cerca del ecuador y de descenso en latitudes medias”⁸ al que se le conoce como **celda de Hadley**. En el ecuador el aire es más caliente, lo cual origina el ascenso de estas masas cálidas y húmedas por convección; al elevarse, el vapor de agua contenido en estas parcelas de aire se condensa, liberando calor latente y dando origen a la formación de nubes cúmulos y cumulonimbos que producen abundantes precipitaciones en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

Las celdas que se localizan en las latitudes más altas se conocen como **celdas Polares**. Las masas de aire que se dirigen desde los polos hacia latitudes inferiores adquieren suficiente energía (en forma de calor) a unos 60° de latitud como para ascender. Al llegar a la tropopausa se dirigen hacia el polo de nuevo donde, tras enfriarse, volverán a descender iniciando de nuevo el ciclo y creando la célula polar.⁹

En la **celda de Ferrel** o de latitudes medias, el aire cercano a la superficie fluye hacia los polos y hacia el este, y el aire de los niveles más altos se desplaza hacia el Ecuador y al oeste. En su parte inferior, la célula está completada por masas de aire

superficial que se originan en los trópicos y que se desplazan hacia el frente polar, donde son obligadas a ascender por convección¹⁰. La celda de Ferrel se encuentra entre la celda de Hadley y la celda Polar, es decir, desde los 30° a los 60° de latitud. Es a su vez la causante de la existencia de los vientos del oeste o vientos predominantes del oeste.

La CGA ayuda a explicar la ocurrencia de heladas en México ya que durante el invierno llegan al país numerosos frentes fríos provenientes de Norteamérica, los cuales dejan a su paso condiciones de baja temperatura y baja humedad que favorecen la ocurrencia de heladas. Asimismo, los frentes fríos están asociados con cambios en la presión atmosférica conforme se desplazan.

En cuanto a la relación entre la CGA y las ondas de calor, podemos mencionar que un caso particular para México es cuando durante el verano un anticiclón (zona de alta presión atmosférica) que se desarrolla en los Estados Unidos se vuelve estacionario en una zona cercana al noroeste mexicano y produce subsidencia (movimiento descendente de una masa de aire sobre una extensa zona). La subsidencia genera condiciones de tiempo estables, evitando la formación de nubes y produciendo ausencia de lluvias, por lo que se acumula el calor en la superficie favoreciendo la ocurrencia de ondas de calor. Cabe mencionar que se pueden presentar otros sistemas atmosféricos en el territorio nacional que favorezcan las condiciones para el desarrollo de dicho fenómeno.

1.2.4. Ondas de Rossby

La atmósfera es un fluido compuesto por gases que responde ante cualquier perturbación generando ondas mecánicas para llegar a un estado de equilibrio. Las ondas atmosféricas transportan energía en forma de calor y energía cinética (momento), por eso son de gran importancia para el régimen climático y están asociadas a fenómenos que afectan la vida diaria, como pueden ser el fenómeno de El Niño o las ondas de calor.

La teoría de ondas predice diferentes tipos de ondas presentes en la atmósfera. Sus diferencias se encuentran en la dirección de propagación y en el patrón que van

formando en la atmósfera distintas variables meteorológicas como la presión, la humedad y la dirección de los vientos.

Entre las ondas atmosféricas se encuentran las ondas de **Rossby**, las cuales deben su comportamiento a las perturbaciones causadas por el relieve del planeta, así como por inestabilidades térmicas o dinámicas en las latitudes medias. La atmósfera en movimiento encuentra barreras en su avance y se ve forzada a superarlas ascendiendo y, posteriormente, descendiendo bajo la influencia gravitacional; estos movimientos producen que las columnas de aire se contraigan o expandan, generando variaciones en la **vorticidad**.

La vorticidad se define como la rotación local del flujo, calculada a partir del rotacional del vector de viento. Se expresa como:

$$\xi = \nabla \times v$$

donde: $\xi =$ vorticidad relativa, $v =$ vector viento, $\nabla =$ operador nabla, definido como:

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$$

Las variaciones en la vorticidad se deben compensar en un planeta en rotación como la Tierra para que el sistema permanezca estable. A este principio se le conoce como la conservación de la vorticidad absoluta (suma de la vorticidad relativa y la vorticidad planetaria) y fue estudiado por Carl Gustav Rossby, el cual se puede expresar como sigue:

$$(\zeta + f)/h = \text{constante}$$

donde $\zeta = \xi_z = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ es la componente vertical de la velocidad relativa, f es el parámetro de Coriolis o vorticidad planetaria y h es el espesor de la columna de aire.

Considerando el hemisferio norte, el aire que se ve forzado a ascender tiende a verse desviado hacia la izquierda para conservar su vorticidad absoluta y, en su descenso, hacia la derecha, generando un patrón de ondas de Rossby, las cuales son elementos clave en la circulación atmosférica. Estas ondas se caracterizan por una gran

longitud de onda y una amplitud notable, por lo que existen pocas en cada hemisferio¹¹; en cualquier momento dado, existen entre 3 y 7 de tales ondas. Rossby derivó la siguiente relación al investigar estas ondas largas¹²

$$C = U - \frac{2\omega \cos \varphi}{4\pi r} \lambda^2$$

la cual proporciona la velocidad (C) de las ondas transversales en el movimiento horizontal y donde:

U = viento zonal medio en altura (de oeste a este),
 ω = velocidad angular de la Tierra,
 φ = latitud,
 r = radio medio de la Tierra,
 λ = longitud de onda.

Las ondas de Rossby siempre tienen propagación de fase hacia el oeste con respecto al flujo zonal. En la atmósfera de latitudes medias, debido a la presencia de fuertes vientos del oeste, se observa que, si bien las ondas se están propagando hacia el oeste relativo al flujo, con respecto a la superficie de la Tierra se propagan hacia el este¹³.

“En cada hemisferio hay dos corrientes en chorro: el chorro subtropical y el chorro polar. Éste último se origina debido al contraste entre el aire frío polar y el aire tropical cálido. La corriente en chorro sufre en su recorrido grandes perturbaciones, describiendo ondas de Rossby (Fig. 1.2.5). En las latitudes medias, las ondas de Rossby originan bajas presiones al norte y núcleos de alta presión al sur, que generan borrascas y anticiclones respectivamente”¹⁴.



Figura 1.2.4. Formación de las ondas de Rossby.¹⁵

Las ondulaciones originadas por las ondas de Rossby pueden romper la corriente en chorro; debido a esto, penetra una gota de aire frío en la masa de aire cálido y finalmente ésta se aísla (Fig. 1.2.5). Dicha gota viene de latitudes altas hacia más bajas y a su paso puede traer condiciones que generen heladas.

Por otra parte, cuando las ondas de Rossby penetran hacia el norte, éstas llevan el calor de los trópicos hacia latitudes más altas. En periodos con condiciones climáticas extremas, algunas de estas ondas quedan prácticamente estacionarias y se amplifican. Si estos periodos son prolongados, los efectos sobre las personas y los ecosistemas pueden ser severos, a diferencia del poco impacto que tiene un par de días cálidos.

1.3. HELADAS

Se considera la ocurrencia de heladas cuando la temperatura del aire cercana a la superficie del suelo es igual o menor a 0°C.

1.3.1. Elementos que influyen en la ocurrencia de heladas

El clima está determinado por varios elementos atmosféricos, tales como: temperatura, presión, humedad, precipitaciones (lluvia, nieve, granizo, etc.), insolación, nubosidad y viento. La acción conjunta de todos estos elementos, que varían espacial y temporalmente, influye en la formación de las heladas. A continuación se describen las características de estos elementos atmosféricos.

1. Nubosidad. “Las *nubes* son grandes conjuntos de pequeñas gotas de agua o de partículas diminutas de hielo que se encuentran suspendidas en la atmósfera” (Ayllón, 2013). Las *nubes* actúan como una barrera que evita la pérdida de energía, por lo que favorecen la disminución de la pérdida de calor del suelo por radiación hacia la atmósfera y devuelven parte de ese calor a la Tierra. Es decir, que cuando el cielo se encuentra despejado la pérdida de calor es continua, por lo que la superficie terrestre se enfría y esto favorece la aparición de heladas.

2. Viento. El viento es el desplazamiento horizontal del aire con respecto a la superficie terrestre. Se origina como consecuencia de las diferencias de presión en la atmósfera y viaja desde las zonas de alta presión hacia las de baja presión. Para caracterizar los vientos se usan dos magnitudes: la dirección y la rapidez.

La dirección o procedencia se observa con la veleta y la rapidez se mide con el anemómetro y se expresa en *m/s*, *km/h* o en *nudos* ($1 \text{ nudo} = 1 \text{ milla marina/hora} = 1.852 \text{ km/h}$).

“El viento contribuye a mezclar las capas de aire igualando las temperaturas de la masa del aire. Mezcla el aire cálido que está a cierta altura con el aire frío a nivel del suelo provocando un calentamiento del aire frío y de esta forma disminuye el riesgo de helada. Por ello, si no hay viento, hay mayor posibilidad de que se produzca una helada”¹⁶.

3. Humedad atmosférica. Se denomina humedad atmosférica a la cantidad de vapor de agua (H_2O en estado gaseoso) que contiene el aire. Este elemento regula la pérdida de calor que irradia la Tierra, lo cual influye en el enfriamiento y calentamiento de la atmósfera.

Para estimar la cantidad de vapor de agua en el aire se utilizan las siguientes medidas:

- Humedad absoluta: es la cantidad de vapor de agua, expresada en gramos, que contiene 1 m^3 de aire en un momento dado.
- Humedad relativa: es la relación, expresada en tanto por ciento, entre la cantidad de vapor de agua que existe y la que podría existir como máximo.
- Humedad específica: “La humedad específica es la cantidad de vapor de agua que se halla contenido en el aire, pero a diferencia de la humedad absoluta, en ésta el vapor se mide en gramos (*gr*) y el aire en kilogramos (*Kg*)”¹⁷.

La cantidad de vapor de agua que puede contener una determinada masa de aire depende de la temperatura. “Cuando disminuye la temperatura a los 0°C o menos, y el viento es escaso, el vapor de agua contenido en el aire, se condensa; si la humedad es

abundante, ésta produce niebla y cuando tiene poco contenido de humedad, se forma la helada” (CENAPRED, 2001). Por lo tanto, una gran cantidad de humedad en la atmósfera reduce la probabilidad de ocurrencia de heladas.

4. Radiación solar. La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. “El Sol es la estrella del sistema planetario fuente de las radiaciones caloríficas y otras formas de energía, las cuales influyen en el estado de nuestra atmósfera.” (Ayllón, 2013). Se encuentra a una temperatura media de $6000^{\circ}K$ y en su interior tienen lugar una serie de procesos termonucleares que consisten principalmente en la transformación de hidrógeno en helio, lo que produce la liberación de una gran cantidad de energía la cual se transmite al exterior mediante la radiación solar. “El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro, el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a la temperatura ya citada. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas de longitud corta son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado)”¹⁸.

“Durante el día, el suelo retiene calor y durante la noche lo pierde; estos procesos dependen de la nubosidad y del viento que existan en una región determinada. Cuando los días son más cortos y las noches más largas, aumenta la ocurrencia de heladas” (CENAPRED, 2001).

1.3.2. Tipos de heladas

Existen diferentes criterios para clasificar las heladas (ver el esquema de la figura 1.3.1), a continuación se exponen los más comunes (la mayoría de los textos fueron tomados de Castro et al., 2002):

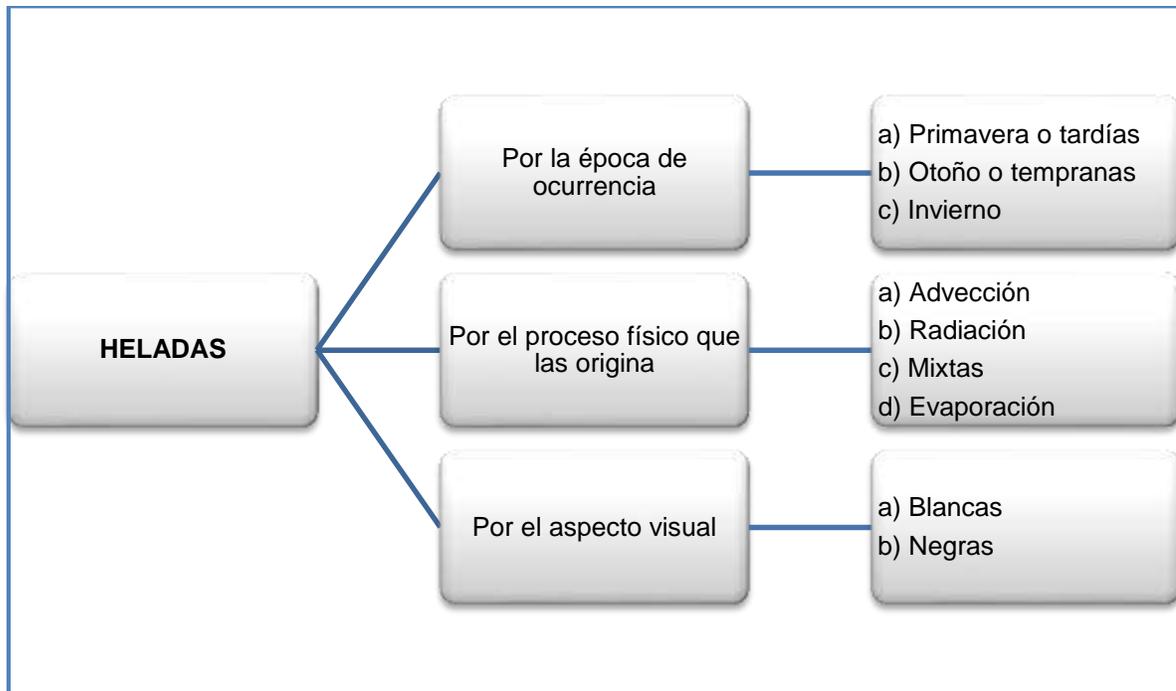


Figura 1.3.1. Tipos de heladas.

Por la época de ocurrencia:

a) Primavera o tardías. Las *heladas de primavera* se presentan en la época de intensa productividad vegetativa. Principalmente afectan cultivos de ciclo anual (como el maíz) que se encuentran en etapa de germinación (proceso mediante el cual una semilla se desarrolla hasta convertirse en planta), emergencia (proceso donde se desarrollan las raíces y la planta sale a la superficie) y estadios juveniles (proceso de desarrollo de hojas). Sin embargo, también pueden observarse efectos negativos en los órganos externos de los cultivos perennes, es decir, plantas que viven durante más de dos años.

Cuando se produce una helada el daño en la planta es en el ámbito celular. Se congela el agua intercelular provocando su deshidratación o la ruptura de la célula, posteriormente las células mueren, así como los órganos vegetativos o de reproducción que componen una planta¹⁹.

b) Otoño o tempranas. Debido a la llegada de las primeras masas de aire frío sobre el país provenientes de latitudes medias y altas en los meses de septiembre y octubre se forman las *heladas de otoño*. Éstas llegan a causar estragos en la agricultura, puesto que pueden interrumpir bruscamente el proceso de maduración de los frutos y la formación de yemas florales (órgano que da lugar a hojas y flores) de las cuales depende la producción del año siguiente.

c) Invierno. Las *heladas de invierno* se forman cuando la temperatura disminuye notablemente. Aunque son las de mayor intensidad, los estragos que causan son menores, dado que, en esta época la mayoría de las plantas se encuentran en reposo y por lo tanto, sus órganos son más tolerantes ante las bajas temperaturas.

El periodo comprendido entre la última helada tardía y la primera helada temprana recibe el nombre de periodo libre de heladas.

Por el proceso físico que las origina:

Dentro de esta clasificación las heladas se pueden considerar de carácter *macroclimático* (condiciones climáticas que se dan en una zona muy amplia) o *microclimático* (clima de los alrededores inmediatos).

a) Heladas por advección: son de carácter macroclimático y se presentan en una región cuando ésta es "invadida" por una masa de aire frío polar cuya temperatura es inferior a 0°C. Este tipo de heladas se caracteriza por la presencia de vientos con velocidades iguales o superiores a los 15 km/h y el gradiente de temperatura (variación de la temperatura con la altura) es negativo, es decir, no hay inversión térmica. Las áreas afectadas son extensas y pueden estar acompañadas de tiempo nublado y lluvioso.

b) Heladas por radiación: Se producen por el enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera y de los cuerpos que en ellas se encuentran debido a la pérdida de calor terrestre por irradiación durante la noche. Se produce una estratificación del aire en donde las capas más bajas son más frías y las capas más altas son más cálidas (inversión térmica). Este tipo de heladas se produce en condiciones de viento calmo o escaso, ya

que la ausencia de viento impide mezclar estas capas, y además, con cielo despejado que permite una mayor pérdida de calor desde la superficie terrestre. La pérdida de calor es mayor cuando las noches comienzan a ser más largas y el contenido de humedad del aire es menor. En los suelos cubiertos de vegetación y en el fondo de los valles es más probable que se den este tipo de heladas. En el caso de la cubierta vegetal, esta actúa como aislante entre el suelo y la atmósfera, evitando que el calor del suelo se transmita con rapidez al aire. Además disminuye la acumulación de calor en el suelo al impedir el ingreso de la radiación solar. El relieve del suelo, por sus diversos accidentes, determina la dirección e intensidad del flujo de aire frío nocturno. Si el suelo tiene pendiente, el aire frío (más denso) buscará niveles más bajos, donde se estacionará y continuará enfriándose. Es por ello que el fondo de los valles es un lugar propicio para la formación de heladas.

c) Heladas mixtas. Cuando se da una combinación de heladas de convección y heladas de radiación, ya sea que ocurran simultáneamente o que una ocurra primero seguida inmediatamente por la otra, se denomina *helada mixta*.

d) Heladas por evaporación: Estas se dan cuando la humedad relativa atmosférica disminuye (menor de 60%) y hay presencia de fuertes corrientes de aire seco (mayor de 5 m/s), que provocan la evaporación intensa del rocío formado sobre las plantas. El paso de agua líquida a su estado gaseoso requiere calor. Ese calor lo aporta la planta con su consiguiente enfriamiento.

Por los efectos visuales que ocasionan:

a) Helada blanca. Para que se presente una *helada blanca o escarcha* “es indispensable que el aire cercano al follaje y las flores tenga temperaturas iguales o menores que 0°C, de esta manera, el aire alcanza la temperatura del punto de rocío, ya que con ello existe condensación y de inmediato el vapor de agua del aire pasa al estado sólido para formar hielo” (CENAPRED, 2001). Recibe este nombre puesto que el suelo, así como los cultivos, presenta un aspecto blanquecino debido al hielo depositado sobre ellos como se observa en la figura 1.3.2.

b) Helada negra. “Se desarrolla cuando el aire tiene poco vapor de agua (humedad baja) y la temperatura del punto de rocío es inferior a 0° C; de modo que existe escasa condensación y nula formación de hielo sobre las plantas” (Castro et al., 2002). Sin embargo, en este tipo de helada, las plantas sufren los efectos del descenso de temperatura presentando quemaduras o necrosis en sus tejidos (Figura 1.3.2).



Figura 1.3.2. Izquierda: Helada blanca, hielo sobre las hojas de una planta.²⁰ Derecha: Helada negra, se observa el efecto de necrosis en el cultivo.²¹

1.3.3. Consecuencias de las heladas

Las heladas tienen diversos efectos en la población, principalmente en el sector salud, agrícola y de servicios públicos.

Consecuencias de las heladas en el sector salud.

Las heladas pueden producir un aumento en las infecciones respiratorias agudas (IRAs), el congelamiento de la piel y la hipotermia. (CENAPRED, 2001). Las IRAs son enfermedades causadas por microbios que afectan el aparato respiratorio (oído, nariz, garganta, bronquios y pulmones) y duran menos de quince días. Sin embargo, uno de los factores que aumenta la probabilidad de padecer IRAs es el clima, debido a cambios bruscos de temperatura, caluroso-frío, seco-húmedo o frío-húmedo.

El *congelamiento* es una lesión grave que sufren los tejidos como resultado de una exposición al frío extremo. Cuando hay una situación climática de frío extremo aparecen

lesiones en los tejidos que están expuestos, sobre todo en las zonas del cuerpo que son más propensas a sufrir una congelación: las manos, los pies, la nariz, la cara y las orejas.

“La *Hipotermia* se define como una temperatura corporal central por debajo de 35°C y consiste en la exposición prolongada al frío. El individuo manifiesta temblores, incoordinación motora, taquicardia, hipertensión arterial, gran disminución del gasto cardíaco y del consumo cerebral de oxígeno” (Ruza, 2002). En algunas ocasiones la hipotermia severa puede ocasionar la muerte.

Las afectaciones de las heladas repercuten principalmente en las zonas rurales, donde la población no está bien informada acerca de medidas de prevención ante dichos fenómenos meteorológicos y existe escasez de medios para protegerse de las bajas temperaturas.

Consecuencias de las heladas en el sector agrícola.

Los cultivos son vulnerables a las heladas cuando en sus células internas se forman cristales. Si la helada ocurre cuando la flor está en botón ésta se ennegrece, se seca y cae. Si se produce cuando la flor está abierta puede dañarse toda la floración de los árboles. En caso de que la helada ocurra cuando los frutos se empiezan a formar, generalmente éstos mueren y los que sobreviven se malforman, disminuyéndose su valor comercial. El proceso de deterioro de las plantas depende del estado vegetativo en que se encuentren y de la especie a la que pertenecen.

Las afectaciones al campo traen consigo grandes pérdidas económicas. En México, tan sólo por las heladas registradas en enero de 2013, las aseguradoras privadas pagaron alrededor de dos mil millones de pesos²².

Los porcentajes de apoyo para los agricultores varían dependiendo de la región. En México, la distribución de las heladas se manifiesta principalmente en dos grandes regiones, la primera y la más extensa está sobre las sierras Tarahumara, de Durango y Tepehuanes; la segunda, aunque no de menor importancia, se localiza en la parte centro del país²³. Éstas regiones son las más afectadas por heladas; sin embargo, son las zonas menos apoyadas por las aseguradoras. Según información de *Agroasemex*, en el norte

del país, el subsidio es del 35% de la prima del seguro; en el Golfo de México es de 40%; en el centro, 45%, y en el sur es del 60%.

Consecuencias de las heladas en el sector de servicios públicos.

Debido a las bajas temperaturas que se dan durante una helada, los servicios como el abastecimiento de luz eléctrica, agua, telefonía, internet, entre otros, se pueden ver afectados.

Durante febrero de 2011 se presentaron en México heladas que trajeron consigo temperaturas bajas históricas, afectando el norte del país, principalmente al estado de Chihuahua. Las bajas temperaturas hicieron que colapsaran dos plantas generadoras de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), “El Encino” y “El Sauz”. Debido a esto, en la capital del estado dejaron de funcionar cientos de semáforos, varias colonias se quedaron sin luz y algunos municipios quedaron totalmente sin suministro de energía. Los pozos de agua se congelaron y también se reportaron tuberías rotas debido al congelamiento de dicho líquido²⁴.

Las heladas en México, además de las consecuencias ya mencionadas en los diversos sectores, traen consigo fuertes pérdidas económicas y humanas. De ahí la importancia de estudiar el fenómeno meteorológico de las heladas, para mantener a la población informada de la época de ocurrencia, así como medidas preventivas e indicaciones para actuar cuando se presenten.

1.4. ONDAS DE CALOR

1.4.1. Origen de las ondas de calor

Una onda de calor es una condición climática extrema caracterizada por periodos de días consecutivos anormalmente cálidos e inusualmente húmedos. Típicamente una onda de calor dura dos o más días²⁵.

Las ondas de calor se originan por invasión de masas de aire muy cálido o bien por la permanencia prolongada de una de estas masas en una determinada zona. “Es un fenómeno en el que las temperaturas de una región se incrementan más de lo normal, debido a un sistema de alta presión que actúa como un caparazón que retiene el aire caliente, que al no poder elevarse evita que se formen nubes o llueva, acumulándose el calor en la superficie²⁶”. En la figura 1.4.1 se muestra un patrón de sistemas de alta presión característico de condiciones de estancamiento asociadas a menudo con ondas de calor prolongadas en Norteamérica. La alta presión tiende a causar el hundimiento de aire y suprime la precipitación, lo que puede permitir el desarrollo e intensificación de una onda de calor.

La ocurrencia del fenómeno depende de la temperatura que se considere como normal en una región, ya que una temperatura que es considerada habitual en una localidad con clima cálido, puede ser excesiva en lugares con clima templado o frío.

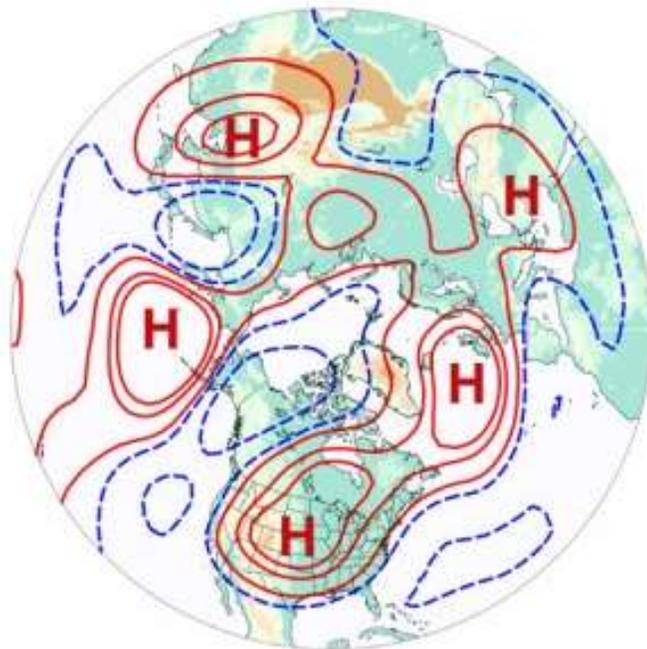


Figura 1.4.1. Patrón de sistemas de alta presión (H) en la parte media de la atmósfera sobre el hemisferio norte.²⁷

La humedad atmosférica regula las temperaturas de climas húmedos, por lo tanto los climas secos sufren mayor cantidad e intensidad de ondas de calor.

En la figura 1.4.2 se muestra el mapa de las temperaturas máximas en la República Mexicana para el día 5 de Junio de 2014, en donde se pueden observar amplias zonas del estado de Sonora con temperaturas cercanas a los 50 °C. El Servicio Meteorológico Nacional reportó el valor más alto de temperatura máxima, de 49.5 °C, el día 3 de Junio en Hermosillo, Son. En general, en esta época del año, la región noroeste del país es en donde se reportan las temperaturas diarias absolutas más elevadas. En particular durante el mes de Junio de 2014, la mayor parte de Sonora tuvo un promedio mensual de temperatura máxima por arriba de los 40.0°C (CONAGUA-SMN, 2014).

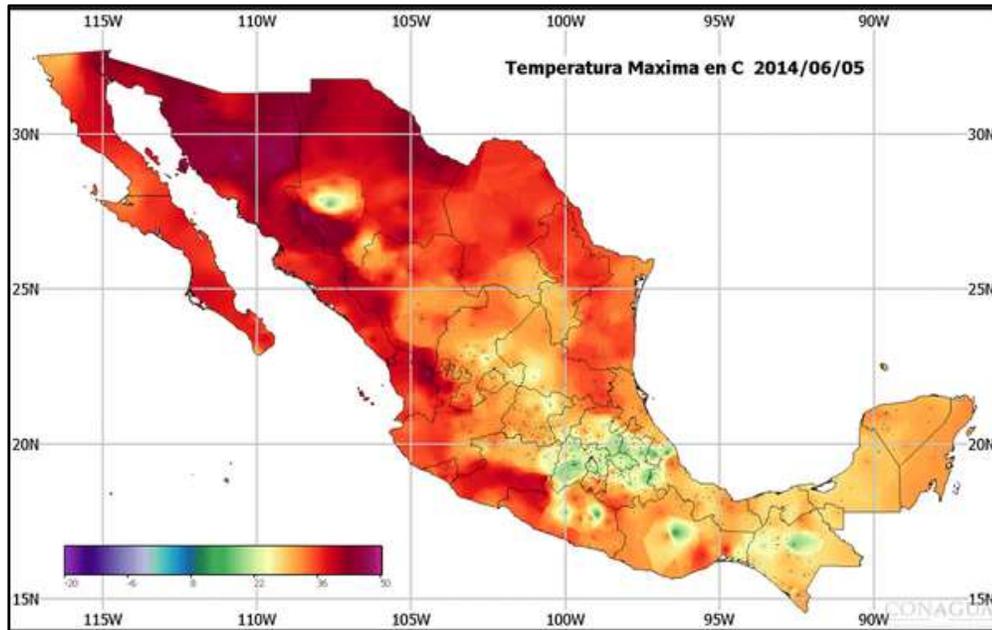


Figura 1.4.2. Temperaturas máximas en México registradas el 5 de Junio de 2014, superando los 40°C en ocho estados del país.²⁸

1.4.2. Consecuencias de las ondas de calor

Las ondas de calor afectan a la sociedad principalmente en el sector salud y el de servicios de energía eléctrica.

Consecuencias de las ondas de calor en el sector salud.

Una enfermedad en específico que se puede presentar a causa de un golpe de calor es la *hipertermia*, la cual se caracteriza por un aumento de la temperatura del cuerpo por encima del valor hipotalámico normal, esto es, por encima de los 37.5°C, debido a que fallan los mecanismos de control de la temperatura, de manera que la producción de calor excede a la pérdida de éste. “Otros efectos que puede producir el calor es la insolación o colapso por calor, cuyos síntomas son: náuseas, vómitos, dolor de cabeza, calambres, falta de apetito²⁹”.

Cabe mencionar que toda la población se encuentra expuesta a este tipo de eventos, sin embargo, existen factores que aumentan el riesgo, tales como: la edad, nivel de ingresos, nivel de aislamiento social, vivir en el último piso de un edificio y trabajar sin aire acondicionado, entre otros. (García et al., 2009).

Consecuencias de las ondas de calor en el sector de servicios públicos.

Cuando se presenta una onda de calor prolongada, ésta puede hacer que el nivel del caudal de un río disminuya, lo que puede repercutir en la productividad de energía hidroeléctrica.

Al presentarse una onda de calor, la población en general incrementa el consumo de energía eléctrica, debido a que las personas hacen uso de diversos aparatos electrodomésticos como medida para contrarrestar la sensación de calor; sin embargo, dicho aumento de consumo puede ocasionar cortes en el suministro lo que incrementa la vulnerabilidad de la población afectada.

Consecuencias de las ondas de calor en el medio ambiente.

Los periodos de ondas de calor provocan gran pérdida de agua por evaporación, si además de la onda de calor se produce una sequía, la cual seca la vegetación, esto puede dar lugar a situaciones de alto riesgo como la ocurrencia de incendios forestales.

1.5. EL RELIEVE DE LA REPÚBLICA MEXICANA

El relieve es uno de los factores que afecta las condiciones climáticas en cualquier región del planeta. Por ejemplo, el relieve crea barreras que alteran los patrones de viento y precipitación y las montañas y mesetas están expuestas a temperaturas más bajas debido a su mayor altitud; esto último se debe al fenómeno conocido como gradiente ambiental de temperatura (Carrasco, 2013).

México presenta un relieve bastante complejo, a continuación se describen los principales sistemas montañosos de la República Mexicana (ver Fig. 1.5.1):

- **Sierra de Baja California:** “El principal sistema orográfico de Baja California cruza longitudinalmente al Estado; se inicia al norte, en la Sierra de Juárez, y continúa al sur con el nombre de Sierra de San Pedro Mártir, donde se divide en sierras más pequeñas, con diferentes nombres, hasta el límite con Baja California Sur. Los picos más altos son los de las sierras de Juárez (1,800 msnm) y San Pedro Mártir (3,100 msnm)”³⁰.
- **Sierra Madre Occidental:** “La Sierra Madre Occidental (SMO) es el complejo montañoso más grande de México, extendiéndose por casi 1,200 km desde el noreste de Sonora (30°35' N) hasta el norte de Jalisco (21°00' N)”³¹. Recorre parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit, y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal”³². “Tiene una altura media de 2,600 msnm, aflorando algunos picos que sobrepasan los 3,000 msnm como el Cerro Gordo en Durango (3,401 msnm)”³³.
- **Sierra Madre Oriental:** “Está situada en el este del país, tiene una dirección noroeste-sureste, inicia en el sur del estado de Texas y continúa hacia Veracruz hasta su punto de contacto con el Eje Neovolcánico”³⁴.
- **Eje Neovolcánico:** También conocido como Eje Transversal Volcánico es la cordillera más alta de México. “Se extiende desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México, constituyendo una ancha faja de 130 km y alcanzando 880 km de longitud”³⁵. Los principales volcanes en el Eje Neovolcánico son: los volcanes de las Islas Revillagigedo (el Bárcena y el Evermann); el Cerro del Cimatarío en

Querétaro con una altitud de 2,350 msnm; el Sangangüey en Nayarit a 2,624 msnm; el Volcán de Fuego en Colima a 3,860 msnm; el Nevado de Colima abarcando el estado de Colima y Jalisco a 4,260 msnm; el Parícutín en Michoacán a 4,244 msnm (el volcán más joven del mundo); el Nevado de Toluca en el Estado de México a 4,680 msnm; el Matlacueye (conocido como La Malinche) entre Tlaxcala y Puebla a 4,460 msnm; el Popocatepetl a 5,500 msnm y el Iztaccíhuatl a 5,286 msnm ubicados entre los límites de Puebla y el Estado de México; el cofre de Perote en Veracruz a 4,200 msnm y el Pico de Orizaba o el Citlaltépetl ubicado en los límites territoriales de los estados mexicanos de Puebla y Veracruz., con una altitud de 5,610 msnm³⁶.

- **Sierra Madre del Sur:** Esta cadena montañosa se localiza en el sur de México, “se extiende a lo largo de 1,200 km entre el occidente de Jalisco y el Istmo de Tehuantepec, al oriente de Oaxaca, corre paralela a la costa del Océano Pacífico y al Eje Neovolcánico; su altitud media es de 2,000 msnm, el punto más alto es el cerro Quie Yelaag que se encuentra a una altura de 3,710 msnm, en el sur de Oaxaca”³⁷.
- **Sierra Madre de Chiapas:** Está situada en su mayor parte dentro del estado de Chiapas, “se extiende desde el límite de la Sierra Madre del Sur en Oaxaca, hasta la frontera con Guatemala, ocupa la parte sur del estado y se extiende en las proximidades del Océano Pacífico. Las cimas más sobresalientes son: Cerro de la Cruz de Piedra con 2,500 msnm, Cerro de San Miguel con 2,800 msnm, Pico de Niquivil con 2,700 msnm y el Volcán de Tacaná con 4,026 msnm”³⁸.

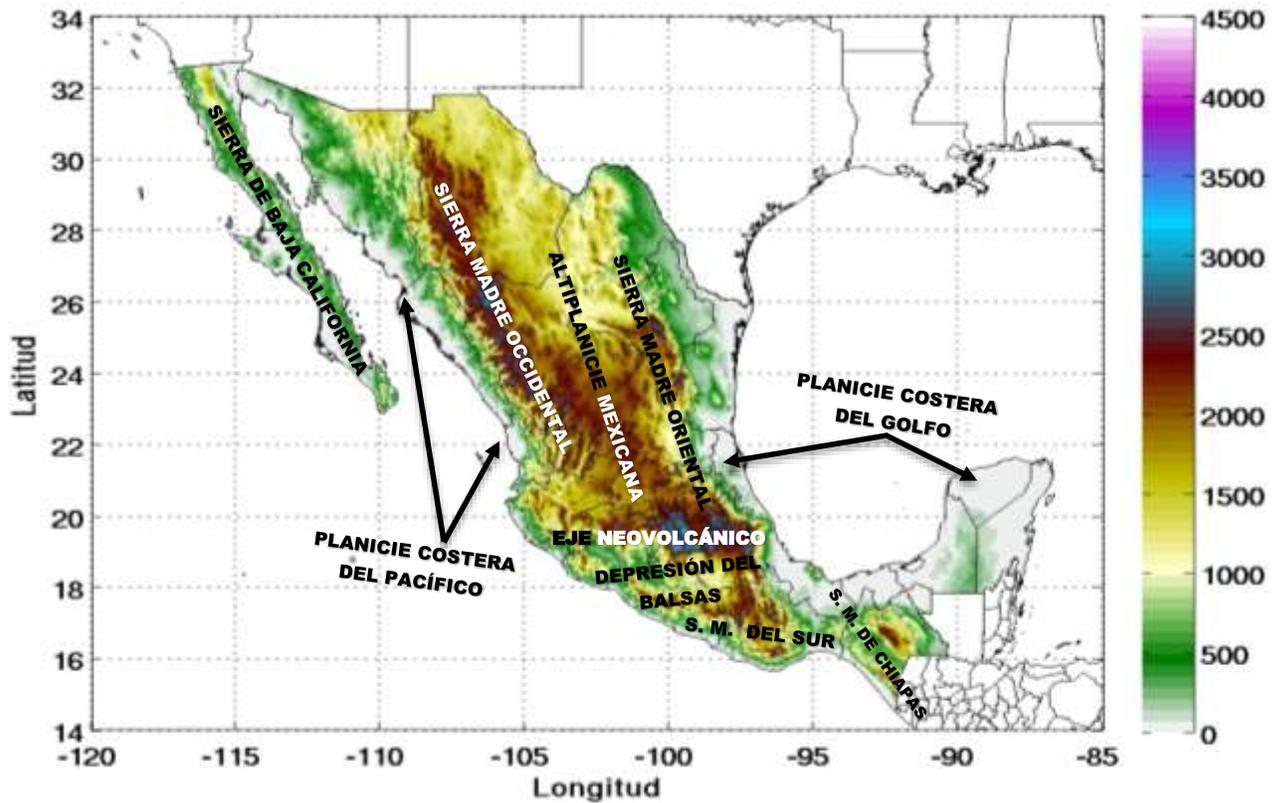


Figura 1.5.1. Mapa topográfico de la República Mexicana. La barra de colores indica la altura en metros.

Además de las cadenas montañosas, el territorio mexicano está compuesto por valles, cañones, grandes llanuras costeras, altiplanicies y depresiones, rasgos que también se aprecian en el mapa de la figura 1.5.1.

1.6. EL NIÑO - OSCILACIÓN DEL SUR

Un fenómeno climático de importancia, que tiene diversos impactos en el clima de México, es El Niño – Oscilación del Sur (ENOS o ENSO por sus siglas en inglés), un patrón oceánico-atmosférico de variabilidad natural. “Este fenómeno se presenta a lo largo del Pacífico Ecuatorial y se caracteriza, principalmente, por la variabilidad de la temperatura superficial del océano, la circulación de los vientos alisios y la profundidad de la termoclina o capa de mezcla. El fenómeno no se presenta de manera periódica,

sino que lo hace de manera irregular, con ciclos que se presentan cada 2 a 7 años³⁹. El ciclo ENOS consiste en una oscilación entre una fase cálida (El Niño) y una fase fría (La Niña), que se manifiestan por el calentamiento o enfriamiento anormal de la superficie del mar en el Océano Pacífico ecuatorial central y oriental, respectivamente. Hasta ahora se desconocen las causas precisas que originan un evento de esta naturaleza, pero sí se han detectado signos que lo identifican en sus componentes oceánica y atmosférica (Carrasco, 2013).

Existen varios índices que se utilizan para clasificar la intensidad del fenómeno ENSO. Uno de ellos es el Oceanic Niño Index (ONI), que está basado en las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región comprendida entre 5°N-5°S y 120°-170°W con respecto al periodo base 1971-2000. En la figura 1.6.1 se muestra un gráfico del ONI donde están marcados los umbrales que se consideraron para determinar la intensidad del evento, tanto para la fase cálida como para la fase fría.

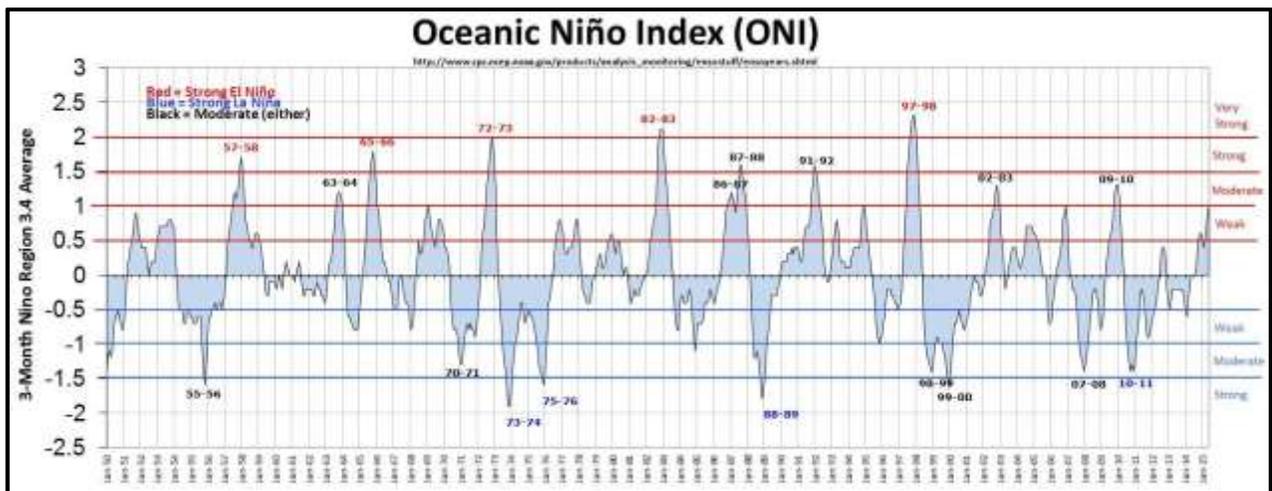


Figura 1.6.1. Índice oceánico de El Niño (ONI).⁴⁰

La intensidad se divide en *débil* (con valores de anomalía de 0.5° a 0.9°C), *moderado* (con valores de anomalía de 1.0° a 1.4°C), *intenso* (con valores de anomalía de 1.5° a 1.9°C) y *muy intenso* (con valores de anomalía $\geq 2^\circ\text{C}$). En la siguiente tabla se presenta la clasificación de los eventos ENSO, según su fase y categoría, ocurridos durante el periodo 1979-2009.

EL NIÑO				LA NIÑA		
Débil	Moderado	Intenso	Muy Intenso	Débil	Moderado	Intenso
1979-1980	1986-1987	-	1982-1983	1983-1984	1998-1999	1988-1989
1994-1995	1987-1988	-	1997-1998	1984-1985	1999-2000	
2004-2005	1991-1992	-		1995-1996	2007-2008	
2006-2007	2002-2003	-		2000-2001		
				2011-2012		

Tabla 1. Años en los que ocurrieron eventos de ENSO durante el periodo de 1979 a 2009, clasificados según su fase e intensidad.

La ocurrencia de un evento "El Niño" puede afectar de manera considerable los patrones de precipitación y temperatura en México. En general, los inviernos de años Niño son más fríos en casi todo el país debido a un aumento en la ocurrencia de frentes fríos, llegando a nevar en las partes más altas e incluso en la parte central del país. Un ejemplo de ello fueron las nevadas en algunas partes de Jalisco, Guanajuato y el Distrito Federal en el invierno de 1997. En veranos Niño disminuye la cantidad de nubes, por lo que una mayor cantidad de radiación entra a través de la atmósfera y llega a la superficie terrestre, en consecuencia las temperaturas registradas son más altas de lo normal en gran parte del país. (Ver referencias en Carrasco, 2013).

1.7. RELACIÓN ENTRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS EVENTOS EXTREMOS

La mayoría de los siguientes textos, relacionados con las variaciones en la temperatura debidas al cambio climático, así como las figuras presentadas, fueron tomados de "Cambio climático: tiempo extremo" producido por The Comet Program.

Los eventos meteorológicos extremos no son ninguna novedad. El tiempo varía naturalmente a causa de muchos factores que pueden combinarse para producir sequías extremas, inundaciones devastadoras, huracanes más fuertes o nevadas históricas. Sin embargo, en las últimas décadas se ha venido observando un incremento de la temperatura media de la atmósfera, los océanos también se están calentando y el hielo

polar y los glaciares se están derritiendo. Los episodios de lluvia o nieve intensa se han vuelto más frecuentes y los periodos secos que median entre ellos duran más tiempo.

El clima está determinado por las complejas interacciones entre muchos factores que afectan a los océanos, los continentes y la atmósfera. Un cambio en uno de ellos — como un aumento en las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero— puede repercutir en todo el sistema.

El calentamiento global puede ser un factor que afecte los extremos climáticos y el tiempo extremo de varias maneras posibles. Si consideramos la temperatura, se podrían presentar variaciones en su distribución como se describe a continuación.

La distribución de las temperaturas se puede concebir en términos de una curva normal, como la que se muestra en la figura 1.7.1, en la cual la mayoría de las observaciones caen en la parte central y algunos eventos raros, como las temperaturas extraordinariamente altas o bajas, se encuentran en los extremos.

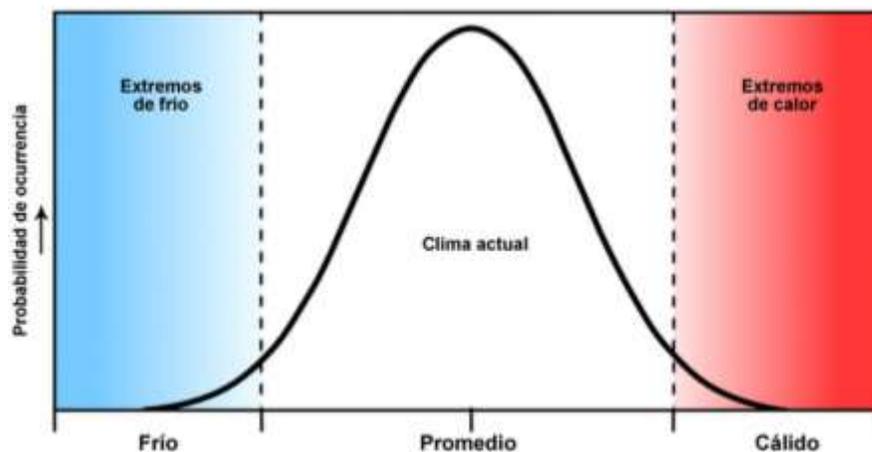


Figura 1.7.1. Esquema de la distribución de temperaturas en el clima actual.

Por ejemplo, el calentamiento global podría desplazar la distribución hacia la derecha de la gráfica, disminuyendo la frecuencia de los eventos de tiempo muy frío, pero aumentando enormemente la ocurrencia de eventos de tiempo caluroso (Fig. 1.7.2).

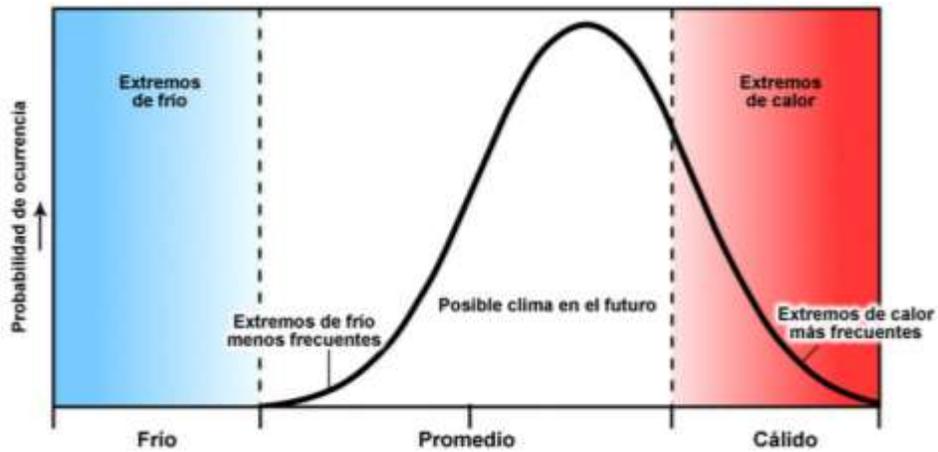


Figura 1.7.2. Esquema de la distribución de temperaturas si el promedio se desplazara hacia temperaturas más cálidas.

Otra posibilidad es que el cambio climático aumente la varianza en la distribución de las temperaturas, es decir, que se amplíe el rango de posibilidades en ambos extremos de la distribución (Fig. 1.7.3).

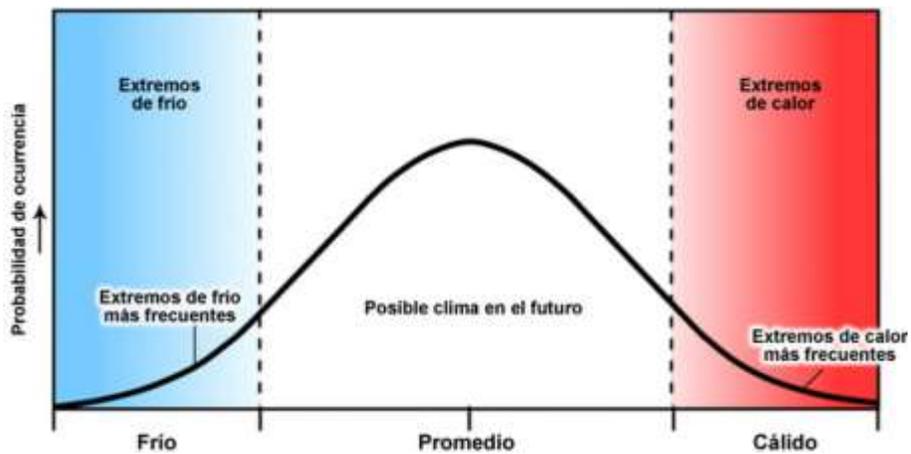


Figura 1.7.3. Esquema de la distribución de temperaturas si las condiciones extremas fueran más frecuentes.

El cambio climático podría incluso producir una combinación de estos dos tipos de distribuciones (Fig.1.7.4).

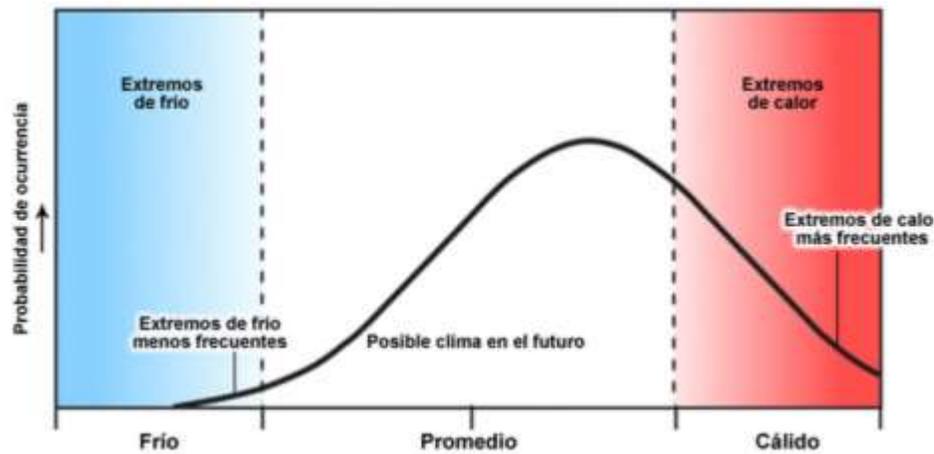


Figura 1.7.4. Esquema de la distribución de temperaturas en un posible clima futuro, en el cual cambiara tanto el promedio como el rango de extremos.

Como se mencionó anteriormente en este capítulo, el clima global puede variar de manera natural debido a la influencia de diferentes factores, como las variaciones en la temperatura de los océanos y en la cubierta de hielo y nieve o los cambios en la cubierta vegetal, y también por la influencia de fenómenos como ENOS. A diferencia de la variabilidad climática natural, en la actualidad el cambio climático está asociado con actividades humanas, como por ejemplo: la quema de combustibles fósiles, la deforestación o agricultura intensiva y la urbanización, entre otras, que resultan en alteraciones de la composición atmosférica. Mientras que las variaciones naturales del clima se presentan en ciclos, el cambio climático de origen antropogénico se observa como una tendencia en las condiciones medias de las variables (Magaña et al., 2004).

La comunidad científica ha comenzado a arrojar luz sobre los posibles efectos del cambio climático en la probabilidad de que ocurra un evento extremo. Los investigadores que trabajan en el campo de la atribución científica utilizan modelos numéricos y técnicas estadísticas avanzadas para estimar las probabilidades de que el calentamiento global haya aumentado (o disminuido) la posibilidad de que ocurran ciertos eventos extremos. Según el Quinto Reporte de Evaluación emitido por el IPCC, las observaciones indican que han disminuido la frecuencia e intensidad de los eventos fríos extremos, mientras

que se prevé un incremento en la frecuencia e intensidad de los extremos de calor en la mayor parte de Norteamérica (Canadá, Estados Unidos y México).

Un estudio acerca de las ondas de calor en la ciudad de México (Jáuregui, 2009) indica que estos eventos ocurren con mayor frecuencia durante Abril y Mayo, al final de la estación seca cuando la humedad relativa es muy baja (~20%). Para esta localidad, Jáuregui define una onda de calor como un periodo de tres días consecutivos o más con una temperatura máxima superior a 30°C y una temperatura promedio diaria igual o mayor a 25°C. Utilizando esta definición, se identificó un gran número de ondas de calor en las series de temperatura que abarcan más de cien años de observaciones. A partir de un análisis por décadas se observó un marcado incremento de estos eventos, de 6 en la década de los 50's a 17 en la década de los 90's, cuando la capital experimentó un acelerado crecimiento. La onda de calor más larga (15 días de duración) se registró en 1998, cuando ocurrió uno de los eventos ENOS más intensos y que es considerado globalmente como el año más cálido de los 90's.

Analizando los resultados del estudio, se puede concluir que los fenómenos naturales así como el cambio climático antropogénico repercuten en la frecuencia, intensidad y duración de condiciones extremas. El entendimiento de la variabilidad climática ayuda a la realización de pronósticos más precisos que permiten a las sociedades prepararse para reducir los daños ante la ocurrencia de extremos climáticos.

CAPÍTULO 2. BASES DE DATOS Y METODOLOGÍA

Con la finalidad de realizar el análisis de heladas y días cálidos en la República Mexicana, en este trabajo se usaron los datos diarios de las temperaturas máximas y mínimas de más de 5,000 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para el periodo de 1979 a 2009. Asimismo, como fuentes complementarias de información, se utilizaron datos de temperatura del reanálisis denominado North American Regional Reanalysis (NARR) (Messinger et al., 2006) y de 67 estaciones de la base de datos de los Estados Unidos ubicadas cerca de la frontera con México. Estas bases de datos, en conjunto con los datos de elevación del terreno de la base denominada General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) ⁴¹, se usaron para generar un producto de mapas diarios con alta resolución espacial (~1.8 km) para el periodo mencionado, obteniéndose un total de 11,322 mapas para cada una de las variables de temperatura. La primera versión del producto fue descrita y utilizada en la tesis de maestría de Norma Carrasco Mijarez (Carrasco, 2013) y en este trabajo se utiliza una versión revisada de dichos mapas.

Las bases de datos y el algoritmo empleado para generar los mapas diarios de alta resolución se describen en las siguientes secciones (para más detalles se puede consultar Carrasco, 2013). Asimismo, se describen los índices empleados para el análisis de los extremos climáticos relacionados con la temperatura.

2.1. DATOS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

La base de datos históricos del SMN contiene, además de la información de identificación y ubicación de cada estación, los valores diarios de la temperatura máxima y mínima registrada a una altura aproximada de 2 m sobre el suelo en más de 5,000 estaciones distribuidas a lo largo y ancho del territorio nacional. Aunque existen

estaciones con registros desde 1903, sólo se usaron los datos a partir de 1979 ya que la base de datos del NARR inicia en este año.

Es importante mencionar que existen muchos errores de diversa índole en la base de datos del SMN, algunos de los cuales fueron identificados gracias a los mapas de anomalías obtenidos con la primera versión del producto y fueron corregidos manualmente, mientras que otros son eliminados por el mismo procedimiento utilizado en la elaboración de los mapas diarios. Sin embargo, persisten algunos datos erróneos en zonas con muy poca cobertura de estaciones ya que no se cuenta con la información de estaciones vecinas para poder tener un valor de referencia que indique el error en la medición. Esto genera que se propague el error al momento de realizar la interpolación.

De la base de datos de las estaciones meteorológicas de los EUA, se escogieron 67 estaciones ubicadas cerca de la frontera con los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas (Figura 2.1.1).

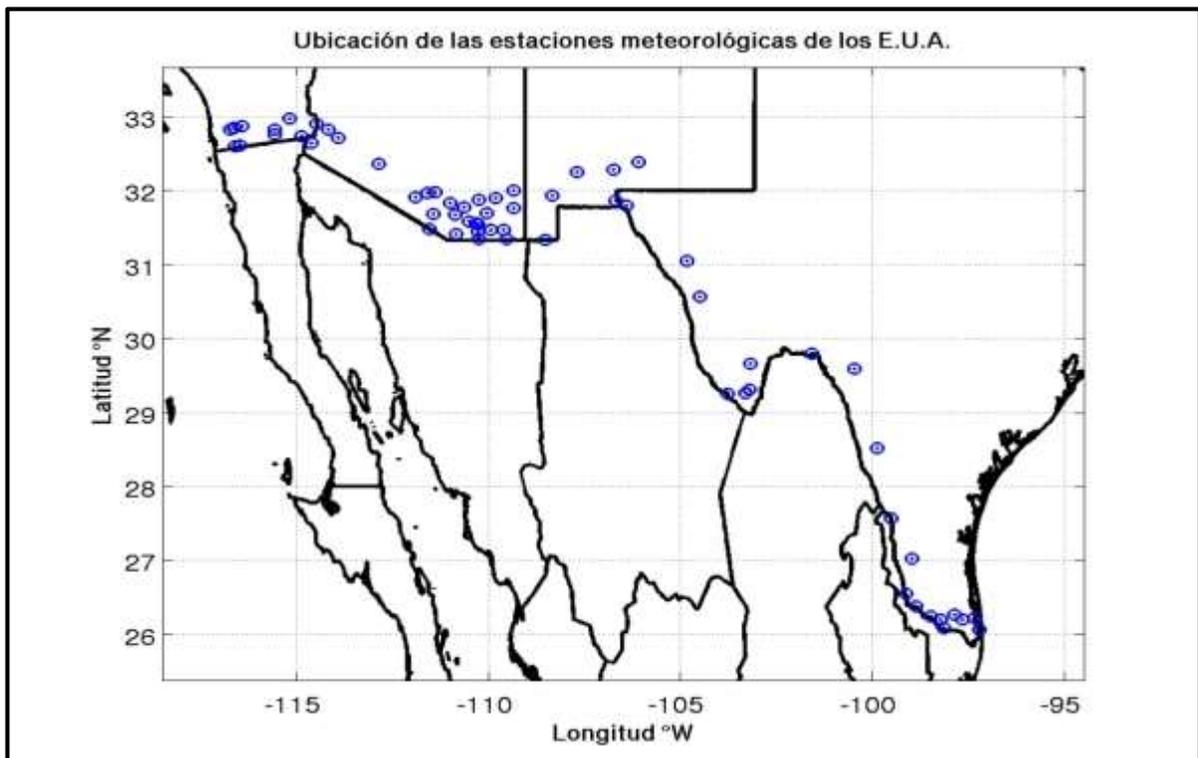


Figura 2.1.1. Estaciones de los EUA cercanas a la frontera con México.

2.2. DATOS DEL NARR

Un reanálisis meteorológico es un proyecto de asimilación de datos cuyo objeto es asimilar datos históricos observados durante un periodo largo de tiempo utilizando un sólo esquema de asimilación (o “análisis”) ⁴².

El producto de reanálisis denominado North American Regional Reanalysis (o NARR) desarrollado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) de los E.U., es un conjunto de datos climáticos de alta resolución que cubre el periodo de 1979 a la fecha. El NARR se desarrolló como una mejora a los reanálisis anteriores desarrollados por NCEP, el NCEPR1 y NCEPR2, tanto en resolución espacial y temporal como en precisión, y toma las ventajas de los sistemas de asimilación de datos que se desarrollaron después de 1995. Algunas de las mejoras más importantes son la asimilación directa de las radiancias, el uso de fuentes adicionales de datos, mejoras en el procesamiento de los datos y la inclusión de procesos relacionados con el acoplamiento entre el suelo y la atmósfera.

El NARR tiene una resolución en la horizontal de aproximadamente 32 km y tiene 45 capas en la vertical. Está orientado a la zona de Norteamérica y utiliza una malla en una proyección cónica conforme tipo Lambert, cuyas ‘esquinas’ son (12.2°N, 133.5°W), (54.5°N, 152.9°W), (57.3°N, 49.4°W) y (14.3°N, 65.1°W) (Fig. 2.2). El modelo genera una salida cada 3 horas, a diferencia de los reanálisis globales que generan una salida cada 6 horas.

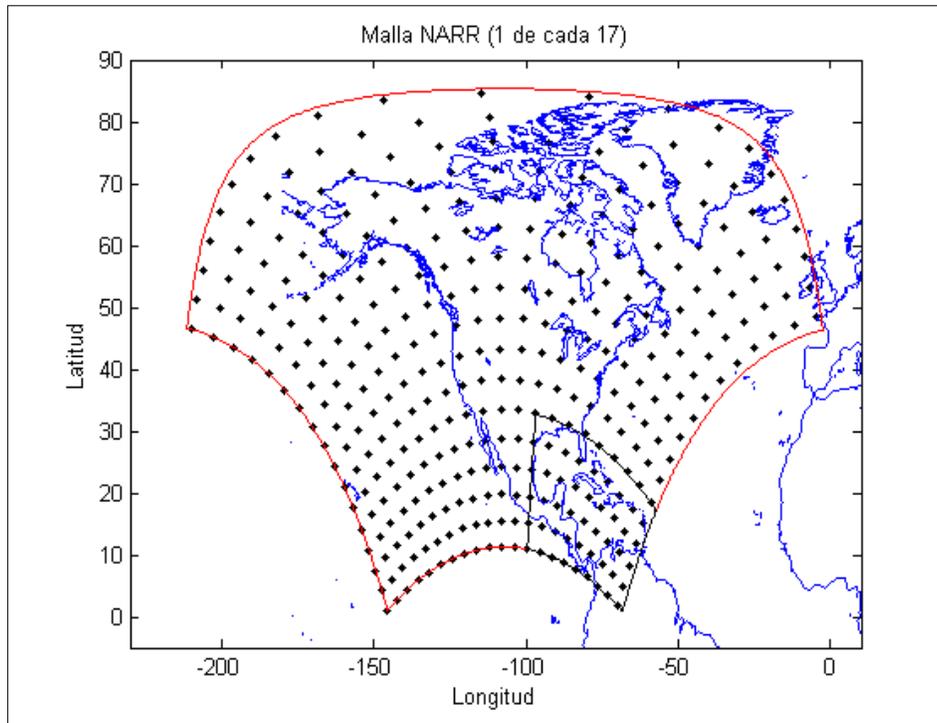


Figura 2.2.1. Dominio que abarca el reanálisis NARR ilustrado considerando uno de cada 17 puntos de la malla horizontal.

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. Algoritmo para el procesamiento de los datos de temperatura

A continuación se describe el algoritmo empleado para la obtención de los mapas diarios de temperaturas máximas y mínimas, que es muy similar al utilizado para generar la primera versión del producto (ver Carrasco, 2013) pero es más eficiente computacionalmente.

1. Se leen los datos de topografía de GEBCO con resolución espacial de aproximadamente 1.85 km.
2. Se leen los datos de latitud, longitud y altura de la malla del NARR (para un dominio que abarca la República Mexicana) y estos últimos se interpolan a la malla de alta resolución de GEBCO.

3. Se lee la información del identificador, altitud, latitud y longitud de las estaciones del SMN y se agrega la información de latitud, longitud y altura de las estaciones de E.U.A. (SMN+EUA).
4. Para cada día específico se leen los datos de temperatura del NARR y se checa si hay registros de temperatura en las estaciones (SMN+EUA) para esa fecha. El procedimiento continúa considerando solamente la información de dichas estaciones.
5. Se estiman las temperaturas al nivel del mar en los sitios de las estaciones considerando sus alturas correspondientes y un gradiente vertical de temperatura con la altura de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (ver Carrasco, 2013 para una explicación detallada).
6. De manera similar, se reducen a nivel del mar las temperaturas del NARR.
7. Se interpolan las temperaturas estimadas a nivel del mar a la malla de alta resolución espacial tanto para las estaciones como para el NARR y se calcula la diferencia entre los dos mapas obtenidos.
8. Se suaviza el mapa de diferencias mencionado en el punto anterior mediante la aplicación de un promediado considerando cajas de 9 puntos de malla.
9. Se obtiene un mapa con la diferencia entre el mapa suavizado y el mapa original (paso 7).
10. Se interpola el mapa mencionado en el paso anterior a los sitios de las estaciones y se calcula la desviación estándar del vector obtenido, eliminándose aquellas estaciones para las cuáles la diferencia (en valor absoluto) fue mayor o igual a 1.5 veces la desviación estándar.
11. Se ubican las posiciones de las estaciones que sí pasaron el filtro anterior y, utilizando sólo dichas estaciones, se interpolan los valores de la temperatura reducida a nivel del mar a la malla de alta resolución.
12. Utilizando la información topográfica de la malla de alta resolución y aplicando la relación del gradiente vertical de temperatura de manera inversa se obtiene el mapa diario de temperatura.

2.3.2. Índices que definen a los extremos climáticos

Para tener una perspectiva uniforme sobre los cambios observados en el clima y en los fenómenos climáticos extremos, se ha definido un conjunto básico de índices descriptivos de los extremos. Estos índices describen características particulares de dichos fenómenos, incluyendo su frecuencia, amplitud y persistencia (WMO, 2009). Los índices incluyen, por ejemplo, el cálculo del número de días en un año en que la temperatura máxima fue superior a un cierto umbral específico o el recuento del número de días con temperatura mínima por debajo del percentil 10 considerando un periodo base particular (WMO, 2009).

Estos índices permiten el monitoreo de tendencias en la frecuencia o intensidad de eventos que, aún sin ser particularmente extremos, pueden causar diversos problemas. La razón de elegir principalmente umbrales basados en percentiles en lugar de umbrales fijos, es que el número de días que superan tales umbrales se distribuye de manera más uniforme en el espacio y es representativo de cada región (WMO, 2009).

Los índices que consideran el recuento de días basados en los umbrales de percentiles son expresiones de anomalías relativas al clima local. Los umbrales se eligen de manera que son superados con una frecuencia fija, a menudo 10%, durante el periodo base que se utiliza para definirlos. En consecuencia, los valores de los umbrales son específicos de cada sitio. Tales índices permiten comparaciones espaciales, debido a que muestrean la misma parte de la distribución de probabilidad de la temperatura en cada ubicación, a diferencia de los índices basados en umbrales absolutos que pueden muestrear partes muy diferentes de tales distribuciones (WMO, 2009).

Una definición general del percentil es la siguiente: El percentil es una medida usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un conjunto de datos.

Los índices utilizados para analizar algunos extremos climáticos relacionados con la temperatura en esta tesis son los siguientes:

FD. Número de días con heladas: Conteo anual de días en los que la temperatura mínima diaria (TN) fue $<0^{\circ}\text{C}$.

TN10p. Noches frías. Porcentaje de días en los que la TN $<$ percentil 10 para cada mes.

TX90p. Días cálidos. Porcentaje de días en los que la temperatura máxima diaria (TX) $>$ percentil 90 para cada mes.

WSDI. Índice de duración de periodos cálidos. Conteo anual de periodos con al menos 6 días consecutivos en los cuales TX $>$ percentil 90.

DTR. Rango diurno de temperatura. Diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima diaria.

Para determinar los índices basados en percentiles, estos últimos se calcularon considerando los datos diarios para cada mes específico, es decir, tomando en cuenta, por ejemplo, los datos diarios de temperatura máxima (o mínima) para todos los Eneiros en el periodo de 1979 a 2009, con lo cual se obtuvieron 12 mapas para cada percentil calculado. Así, los índices basados en percentiles se calcularon para cada mes de cada uno de los 31 años del periodo, obteniéndose un total de 372 mapas para cada índice.

Se calcularon también las tendencias para las temperaturas máximas y mínimas y para el índice DTR en el periodo analizado, ajustando una recta por mínimos cuadrados a las series de promedios mensuales para cada punto de la malla. También se calcularon las tendencias para el índice FD, el cual corresponde a los conteos anuales de la ocurrencia de heladas y para el índice WSDI para la ocurrencia anual de eventos cálidos.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ÍNDICE FD

El índice FD, que es el conteo anual de días con ocurrencia de helada, se calculó para cada uno de los años en el periodo 1979-2009. Los mapas muestran una variabilidad interanual importante, pero en general, se observa que las partes altas de las cordilleras montañosas son las más afectadas por la ocurrencia de heladas. Entre ellas sobresale la Sierra Madre Occidental, con valores superiores a los 160 días por año en Chihuahua y Durango que en ocasiones rebasan los 200 días anuales con helada.

Además de Chihuahua y Durango, los estados que presentan mayor ocurrencia de heladas son: Baja California, Sonora, Coahuila y Zacatecas. También se pueden observar valores relativamente altos del índice FD en regiones altas de Nuevo León, San Luis Potosí (S.L.P.) y en los estados por donde atraviesa el Eje Neovolcánico.

Con el objeto de mostrar la variación interanual que presenta el índice FD se muestran, como ejemplo, los mapas para el periodo 1979-1981 (Fig. 3.1.1), donde se observa una marcada disminución en la ocurrencia de heladas en el año de 1981 con respecto a los años anteriores, principalmente en los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila.

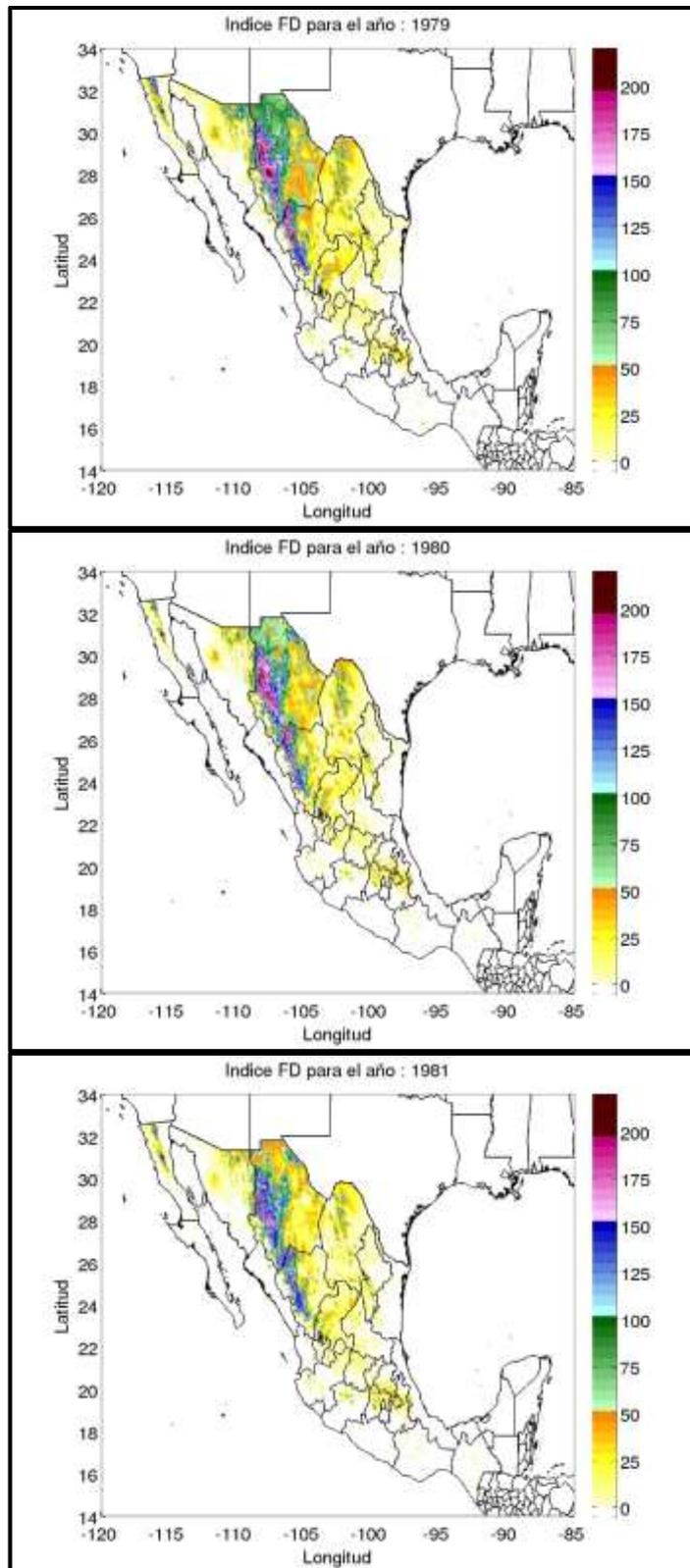


Figura 3.1.1. Índice FD para los años de 1979 a 1981. La barra de colores indica el número total de heladas por año.

Un periodo que muestra variaciones interesantes en el índice FD es el de 1994-1998 (Fig. 3.1.2). El año de 1994 presentó poca ocurrencia de heladas en comparación con otros años del periodo, sobre todo en las montañas de Durango, Coahuila y sur de Chihuahua, aunque se observó un número relativamente alto de heladas en el norte de la Sierra de Baja California. El número de heladas se incrementó en 1995 hacia el centro-sur de las montañas de Chihuahua (aunque disminuyeron hacia la parte norte del estado) y en las zonas altas de Durango, Coahuila y Zacatecas. En 1996 aumentó el número de heladas en todas las regiones antes mencionadas y se observa la ocurrencia de algunas heladas en amplias regiones de Sonora, Nuevo León y Tamaulipas y en algunas zonas de estados del centro y sur de México, además de un incremento en las partes altas del Eje Neovolcánico. En 1997 se observa cierto incremento en el número de heladas hacia el norte y noroeste del país, así como ocurrencia de heladas en buena parte de estados como Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato e Hidalgo. Un patrón parecido prevaleció en 1998, aunque se observa cierto aumento del índice FD en las partes altas del centro de México y de Zacatecas, mientras que prácticamente no ocurrieron heladas en Tamaulipas y hacia el norte de Nuevo León y sur de S.L.P.

Considerando solamente los meses de Octubre a Marzo, se puede apreciar mejor el incremento en el número de heladas durante el invierno de 1997-1998 con respecto a los inviernos de 1995-1996, 1996-1997 y 1998-1999, el cual podría estar relacionado con la ocurrencia del fenómeno de El Niño que fue muy intenso (Fig. 3.1.3). En diversos estudios se ha reportado un aumento de frentes fríos y “*nortes*” durante estos eventos (Magaña et al., 2004; Brito y Pedrozo, 2015), provocando inviernos más fríos en casi todo el país. Sin embargo, habría que mencionar que este efecto no fue tan marcado durante el invierno de 1982-1983, cuando ocurrió otro evento muy intenso de El Niño, con excepción de algunas regiones de Chihuahua, Baja California, Zacatecas y del centro del país que presentaron valores altos del índice FD.

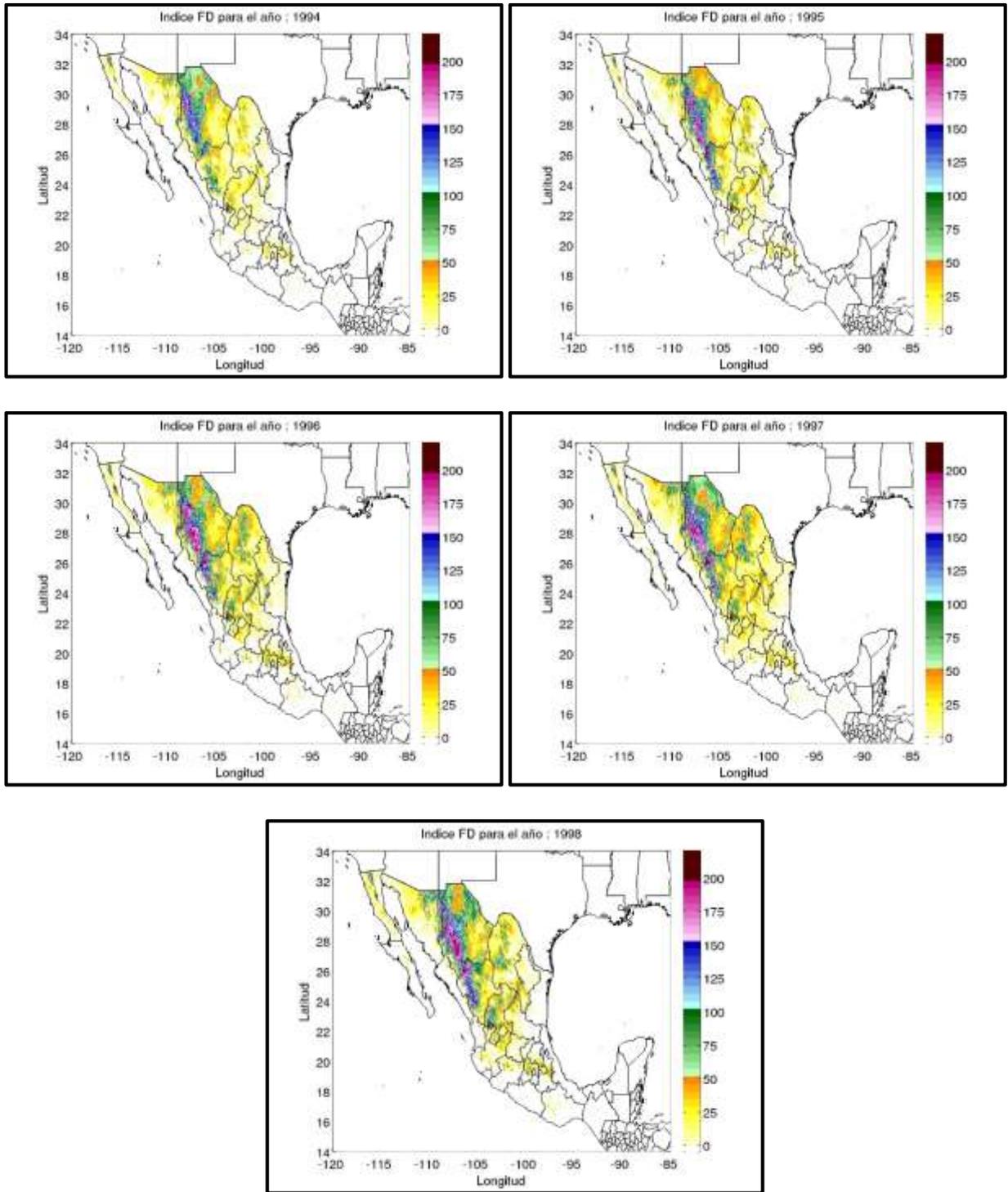


Figura 3.1.2. Índice FD para los años de 1994 a 1998. La barra de colores indica el número total de heladas por año.

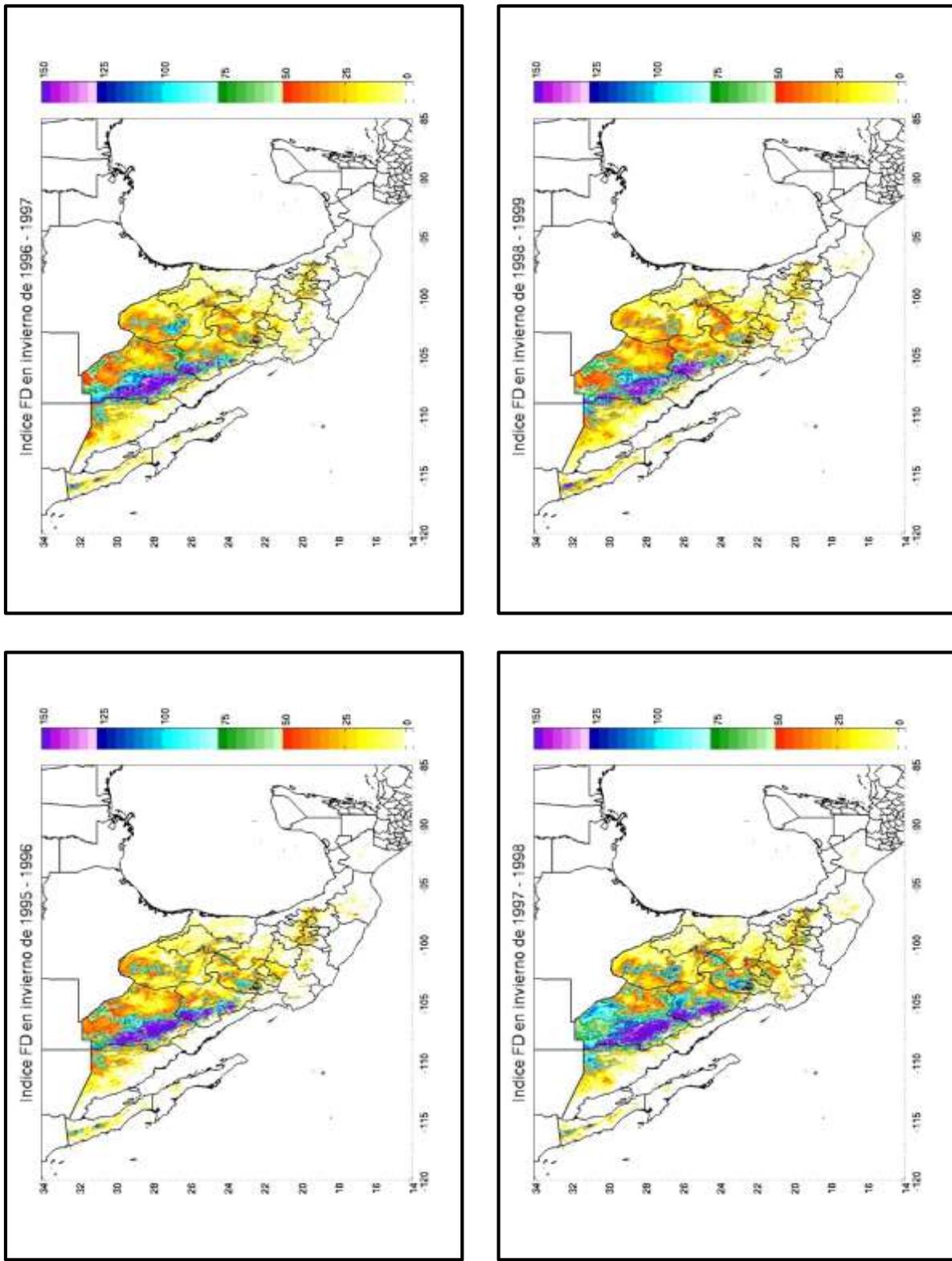


Figura 3.1.3. Índice FD para los inviernos (Octubre-Marzo) de 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998 y 1998-1999. La barra de colores indica el número de heladas por invierno.

En la región central del país, los estados con mayor presencia de heladas son:

- Distrito Federal
- Estado de México
- Tlaxcala
- Puebla
- Hidalgo
- Michoacán

En Veracruz, las heladas ocurren en el volcán Pico de Orizaba durante todos los años, y en ocasiones hay ocurrencia de heladas en la zona norte del estado que colinda con Tamaulipas, como se observó por ejemplo en 1983 y 1989 (ver Figura 3.1.4).

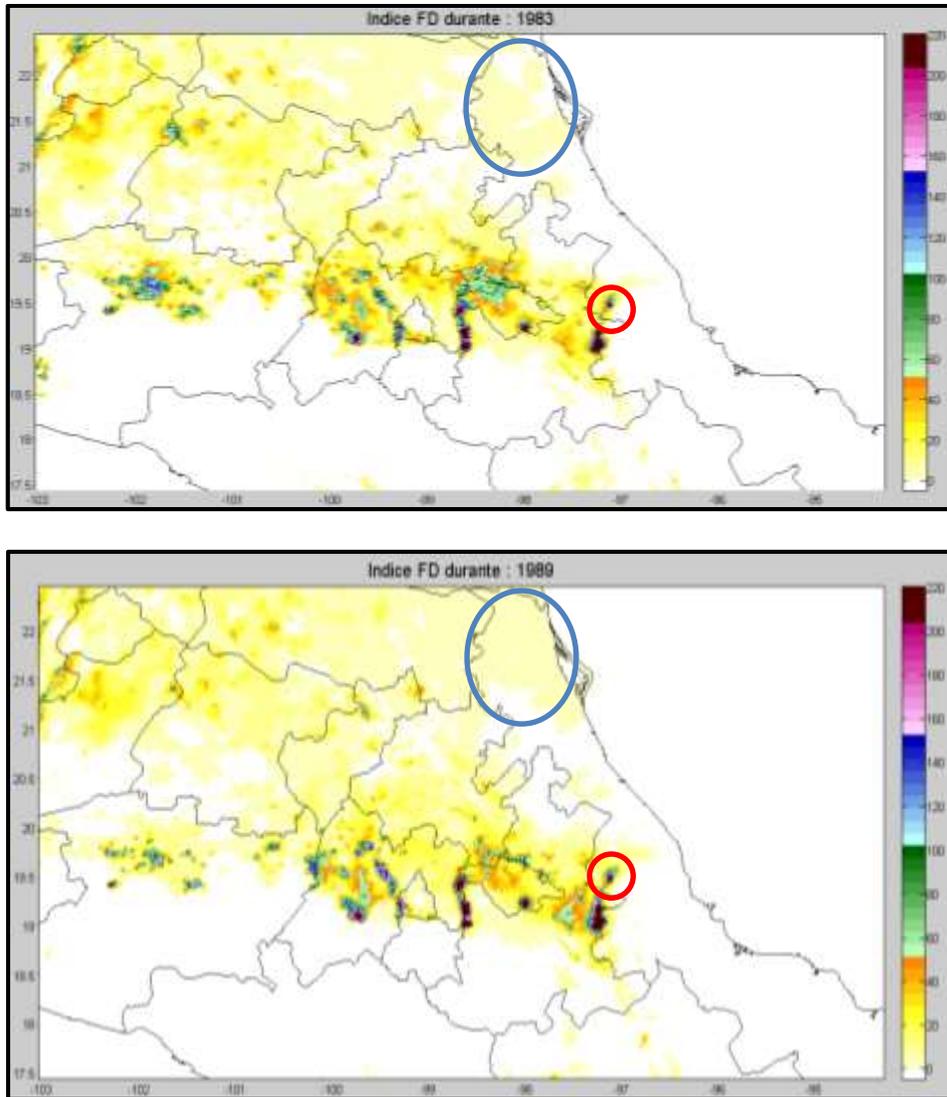


Figura 3.1.4. Índice FD para la zona centro del país en los años de 1983 y 1989. El círculo rojo marca la zona del volcán Pico de Orizaba y el círculo azul la zona norte de Veracruz. La barra de colores indica el número total de heladas por año.

En la figura 3.1.5 se muestran ejemplos de la ocurrencia de heladas en las regiones montañosas de los estados de Oaxaca y Chiapas para los años de 1999 y 2009.

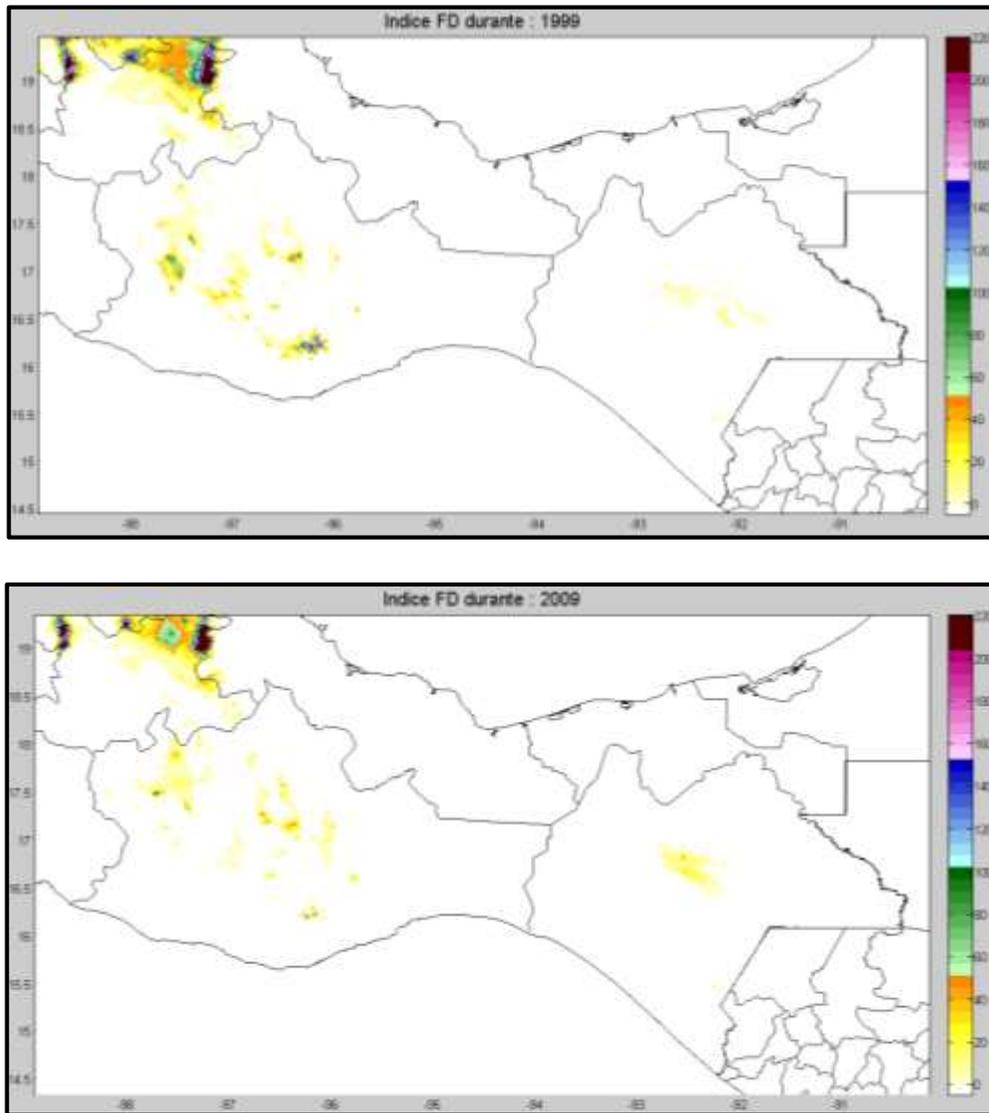


Figura 3.1.5. Índice FD para los estados de Chiapas y Oaxaca en los años de 1999 y 2009. La barra de colores indica el número total de heladas por año.

3.2 ÍNDICES BASADOS EN PERCENTILES

3.2.1. *Percentiles 10 y 90*

Como se describió en la sección 2.3.2 del capítulo anterior, los percentiles se calcularon para cada mes específico, considerando los mapas diarios para el mes dado en el periodo de 1979 a 2009. Como ejemplo, en la figura 3.2.1 se presentan los mapas correspondientes a los meses de invierno (Nov-Feb) para el percentil 10 de la temperatura mínima (TMin). En estos mapas se observa que las partes altas de las regiones montañosas tienen los valores más bajos del percentil 10 para la TMin, en el rango de -8 a -12°C, mientras que los valores más altos se encuentran en el rango de 16 a 20°C en algunas franjas costeras del sur y sureste de la República Mexicana.

Durante los meses de verano (Jun-Sep) amplias zonas costeras del Pacífico y Golfo de México, así como la zona del Istmo de Tehuantepec y las regiones más bajas de la Depresión del Balsas y del noreste del país, muestran valores del percentil 10 para la TMin en el rango de 20 a 24°C, principalmente durante Julio y Agosto. En esta temporada, gran parte del estado de Baja California Sur y la Península de Yucatán muestran valores entre 16 y 20°C, mientras que en las sierras se observan mayormente valores en el rango de 4° a 8°C y de 0 a 4°C en las partes más altas (ver Figura 3.2.2).

En cuanto al percentil 90 de la temperatura máxima (TMax), los valores más bajos durante los meses de invierno se presentan en las sierras, mayormente en el rango de 18° a 21°C y observándose valores entre 15° y 18°C en las partes más altas durante los meses de Diciembre y Enero (Fig. 3.2.3). En esta temporada, pequeñas regiones bajas del sur de Oaxaca y de la Depresión del Balsas muestran los valores más altos, en el rango de 36° a 39°C.

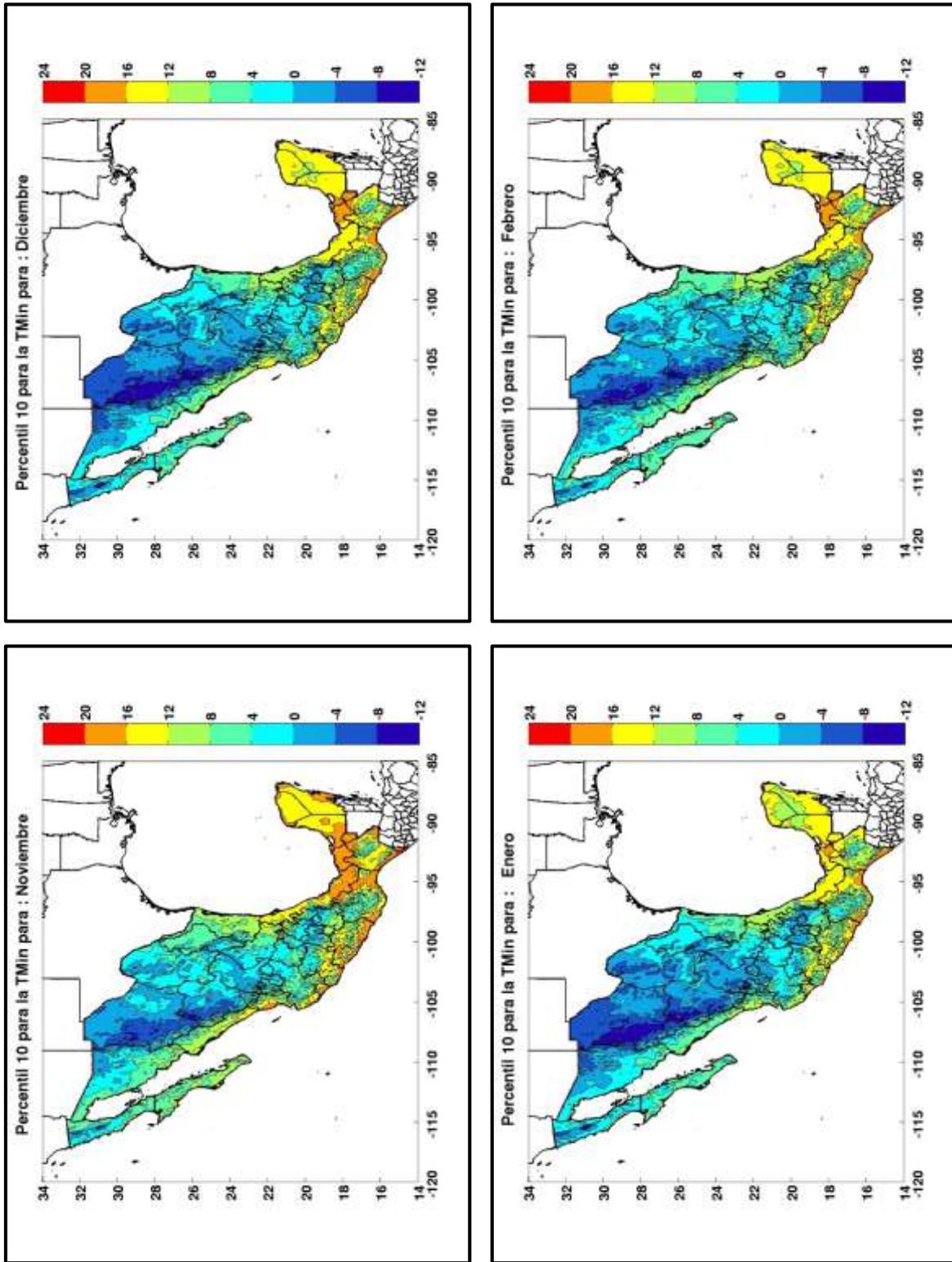


Figura 3.2.1. Valores del percentil 10 para la temperatura mínima para los meses de Noviembre a Febrero. La barra de colores indica los rangos de temperatura en °C.

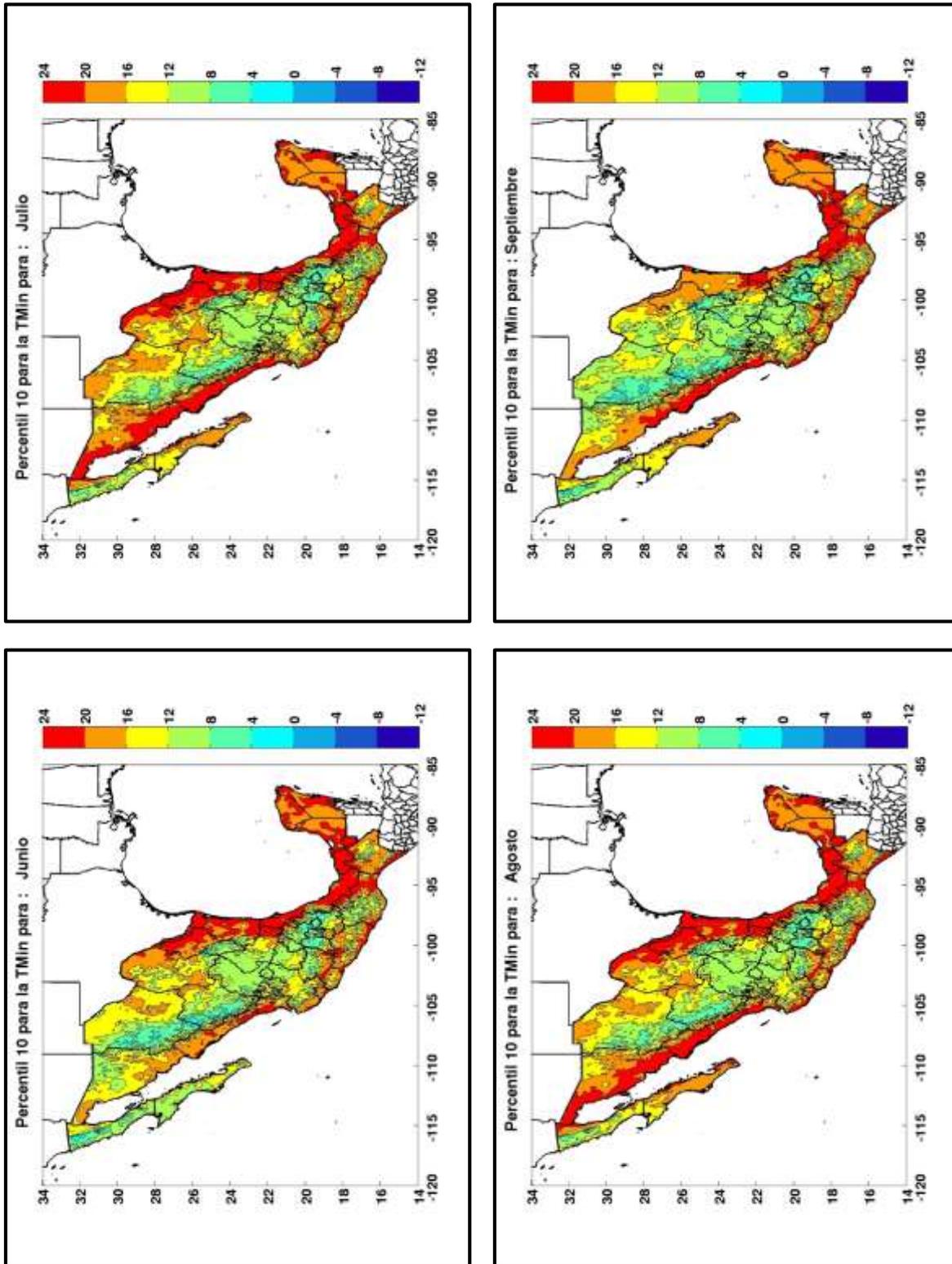


Figura 3.2.2. Valores del percentil 10 para la temperatura mínima para los meses de Junio a Septiembre. La barra de colores indica los rangos de temperatura en °C.

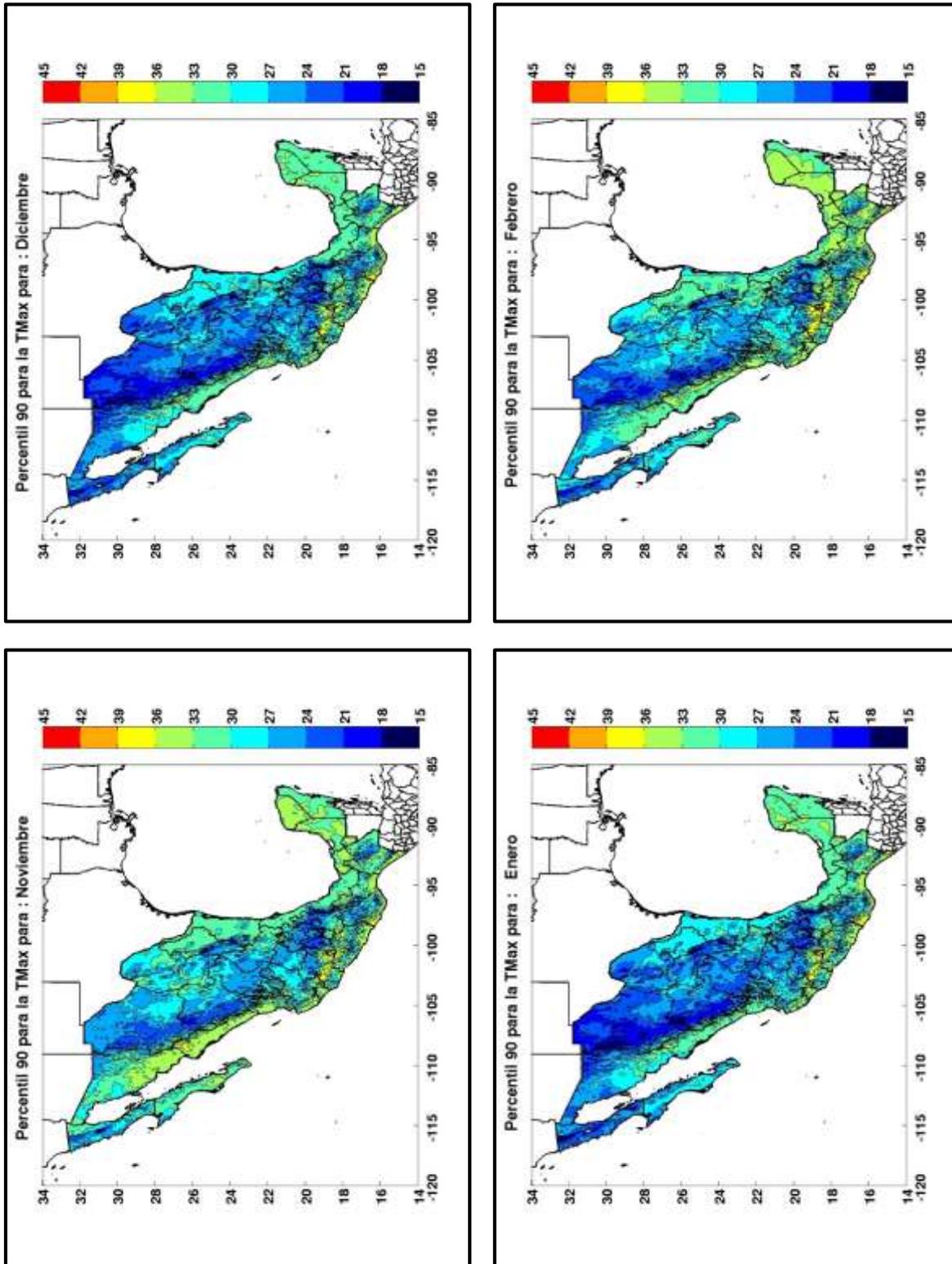


Figura 3.2.3. Valores del percentil 90 para la temperatura máxima para los meses de Noviembre a Febrero. La barra de colores indica los rangos de temperatura en °C.

Durante los meses de Junio y Julio, los valores más altos del percentil 90 de la TMax se presentan al noreste de Baja California y en buena parte del estado de Sonora, en el rango de 42° a 45°C (Fig. 3.2.4); mientras que durante los meses de Julio y Agosto los valores más bajos, en el rango de 18 a 21°C, se observan en las zonas más altas del Eje Neovolcánico. Cabe hacer notar que, en estas zonas, los valores más altos del percentil 90 para la TMax no se presentan en Julio y Agosto sino durante los meses de Abril a Junio; un comportamiento similar se observa en el sur de Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán. En los meses de Abril y Mayo sobresalen unas pequeñas regiones en la Depresión del Balsas por presentar los valores más altos, en el rango de 42° a 45°C.

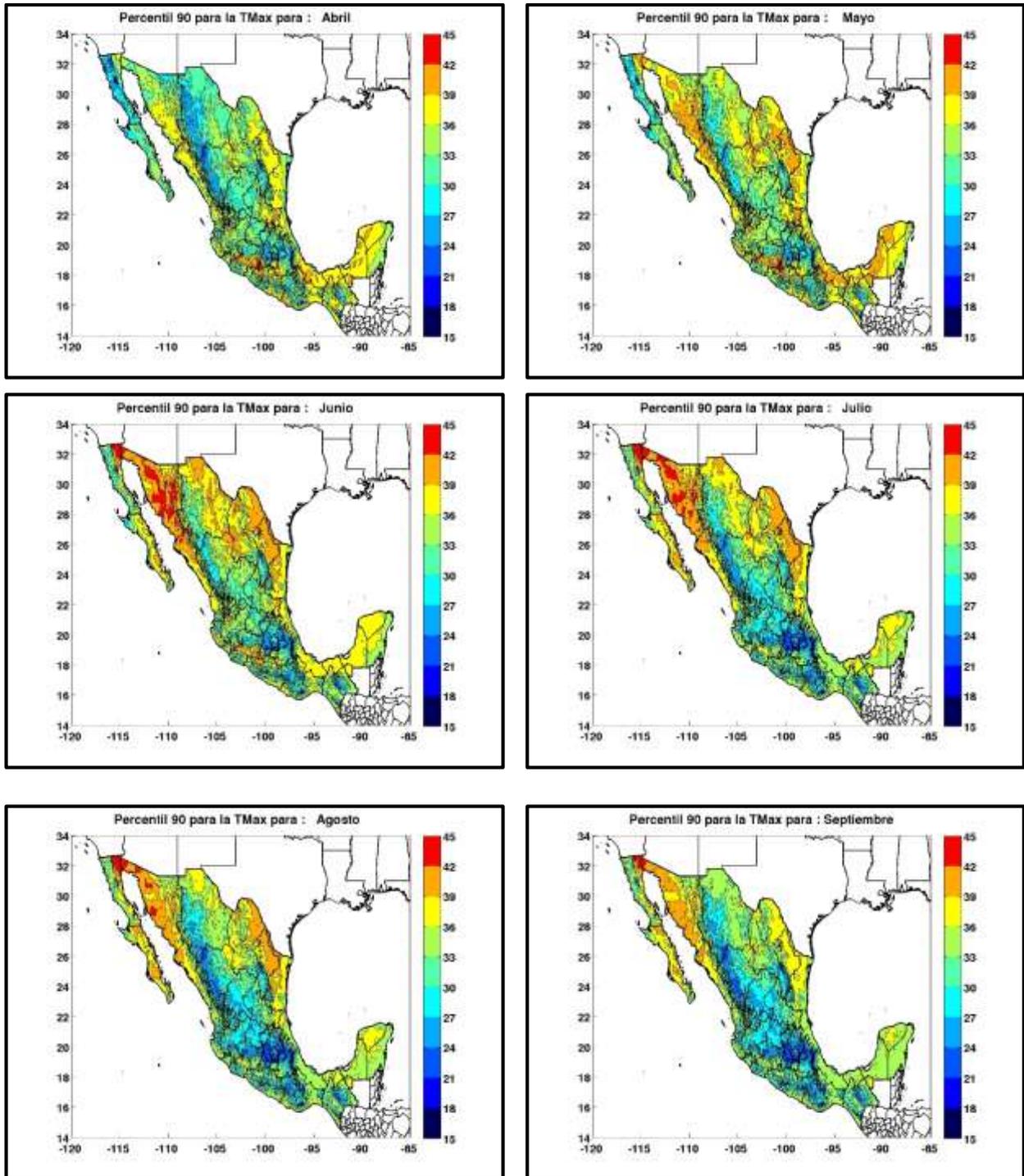


Figura 3.2.4. Valores del percentil 90 para la temperatura máxima para los meses de Abril a Septiembre. La barra de colores indica los rangos de temperatura en °C

3.2.2. Índice TN10p

El índice TN10p representa el porcentaje de días en los cuales la temperatura mínima estuvo por debajo del percentil 10, lo cual es indicativo del porcentaje de ocurrencia de noches frías. El cálculo del TN10p se hizo para cada mes del periodo 1979-2009 considerando los valores del percentil 10 descritos en la sección anterior.

A continuación se muestran algunos ejemplos de los mapas obtenidos del índice TN10p para los meses de invierno (Nov-Feb) durante años con evento de El Niño muy intenso comparándolos con otros años sin ocurrencia del fenómeno.

Comparando el invierno de 1980-1981 (Figura 3.2.5) con el invierno de 1982-1983 (Figura 3.2.6) se aprecia un aumento en el índice TN10p en la parte norte del estado de Baja California en los meses de noviembre y diciembre de 1982, con valores superiores al 50%. Sin embargo, esto no se observa en el resto del país, excepto en algunas regiones al sur en Diciembre de 1982. En Diciembre de 1980 y Enero de 1981 se observan valores relativamente altos del índice TN10p en la península de Yucatán en comparación con Diciembre de 1982 y Enero de 1983, pero en Febrero de 1983 es notorio el aumento en la ocurrencia de noches frías, con valores por arriba del 60% en gran parte del centro y sur del país.

También se compararon los meses de invierno de 1993-1994 con los de 1997-1998. De manera general, el invierno de 1997-1998 (Figura 3.2.8) muestra un aumento en el porcentaje de noches frías en comparación con el invierno de 1993-1994 (Figura 3.2.7), con excepción del noreste de la República Mexicana en el mes de noviembre de 1993. El mes de febrero de 1998 muestra un patrón similar al de febrero de 1983, con valores altos del TN10p en la parte centro y la región costera del Pacífico pero también en regiones más hacia el norte del país.

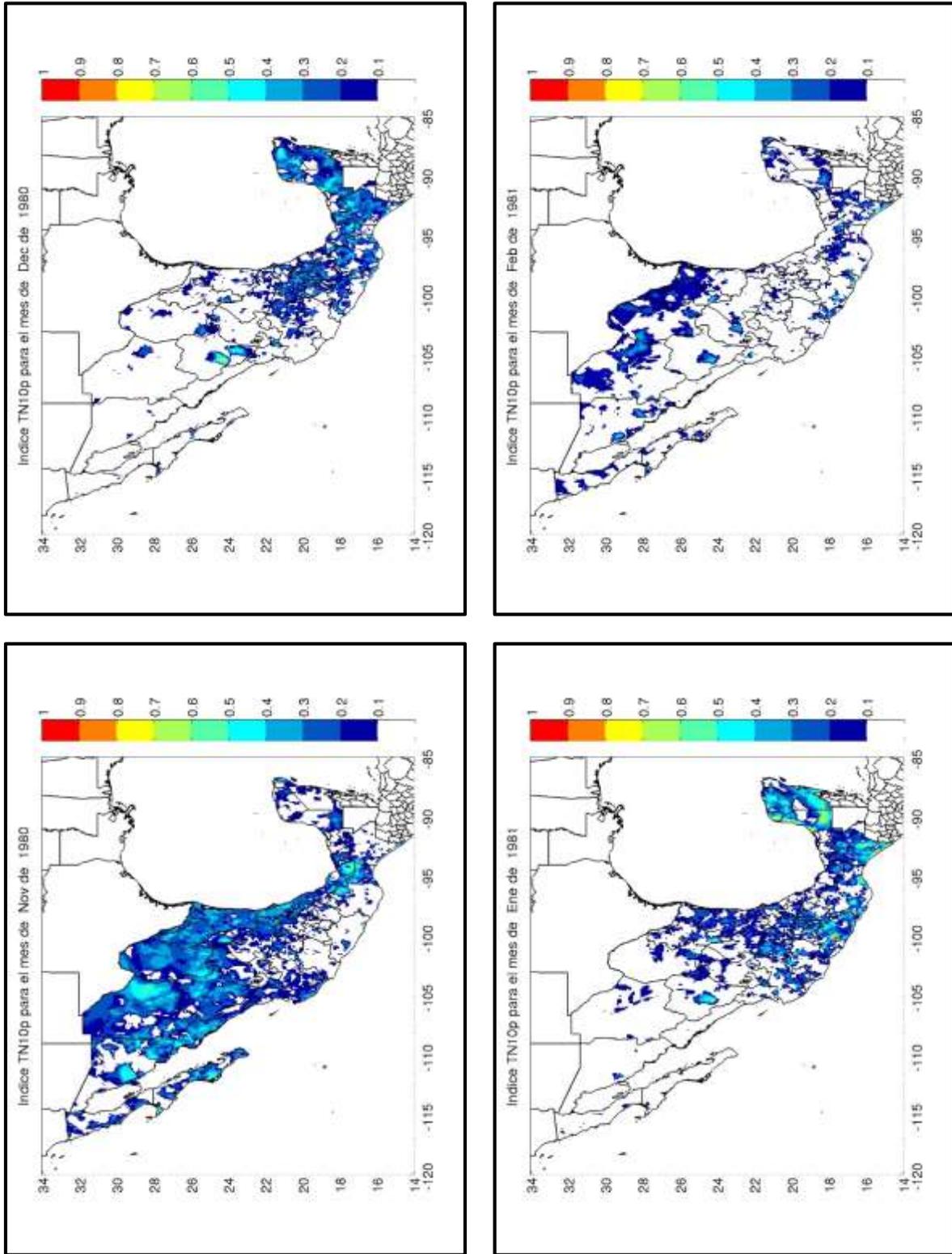


Figura 3.2.5. Índice TN10p para los meses de invierno del periodo 1980-1981. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la Tmin estuvo por debajo del percentil 10.

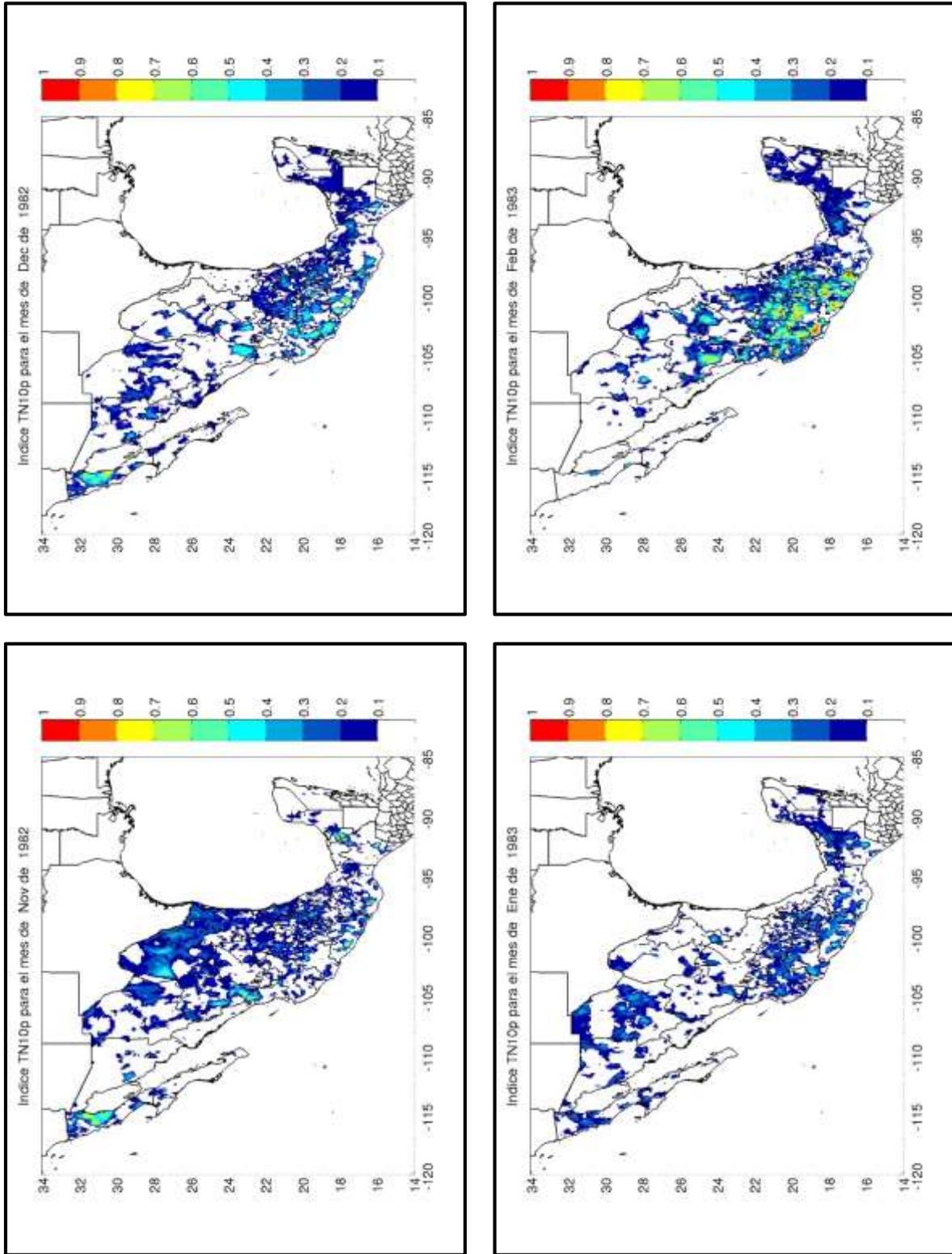


Figura 3.2.6. Índice TN10p para los meses de invierno durante el evento de El Niño de 1982-1983. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la T_{min} estuvo por debajo del percentil 10.

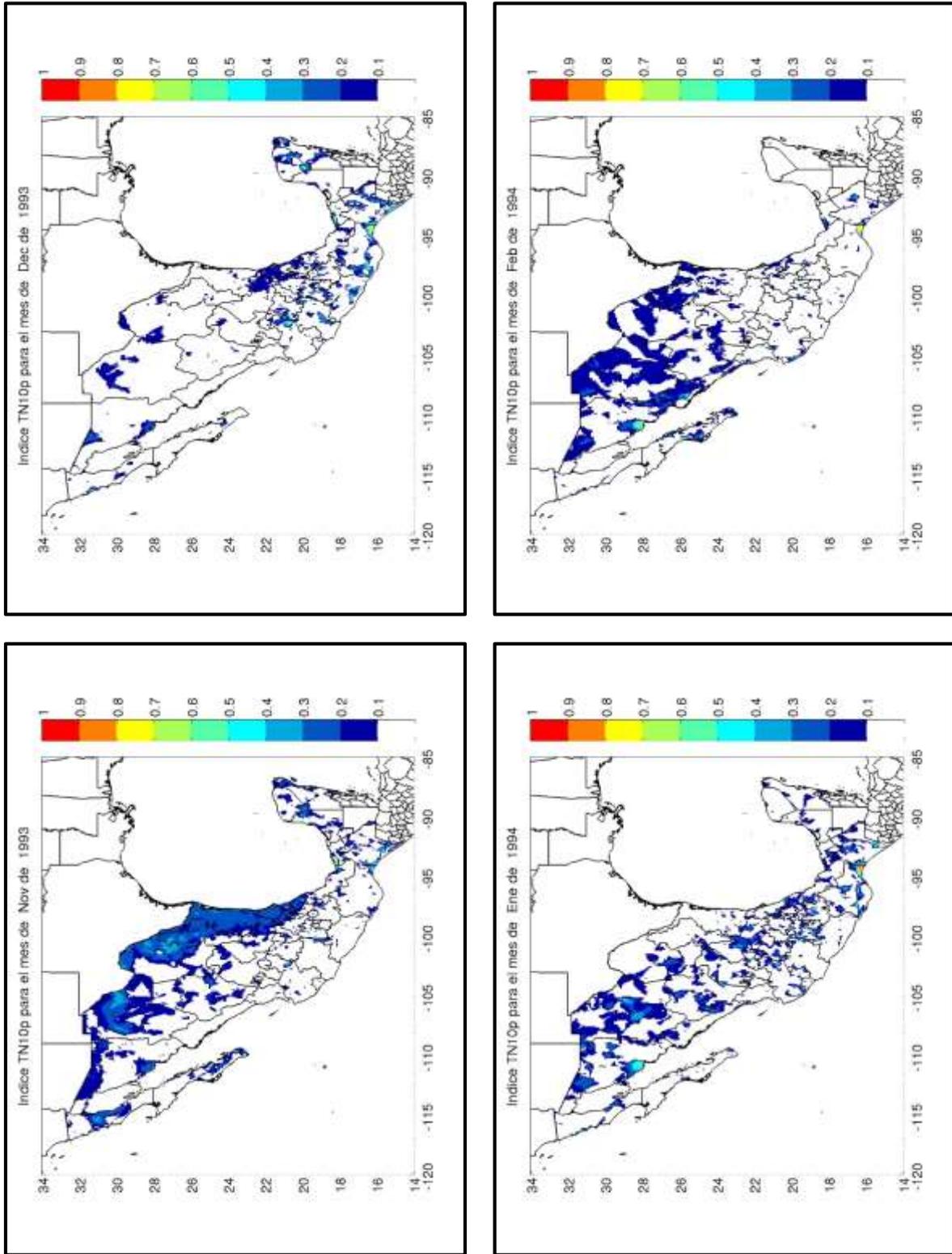


Figura 3.2.7. Índice TN10p para los meses de invierno del periodo 1993-1994. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la Tmin estuvo por debajo del percentil 10.

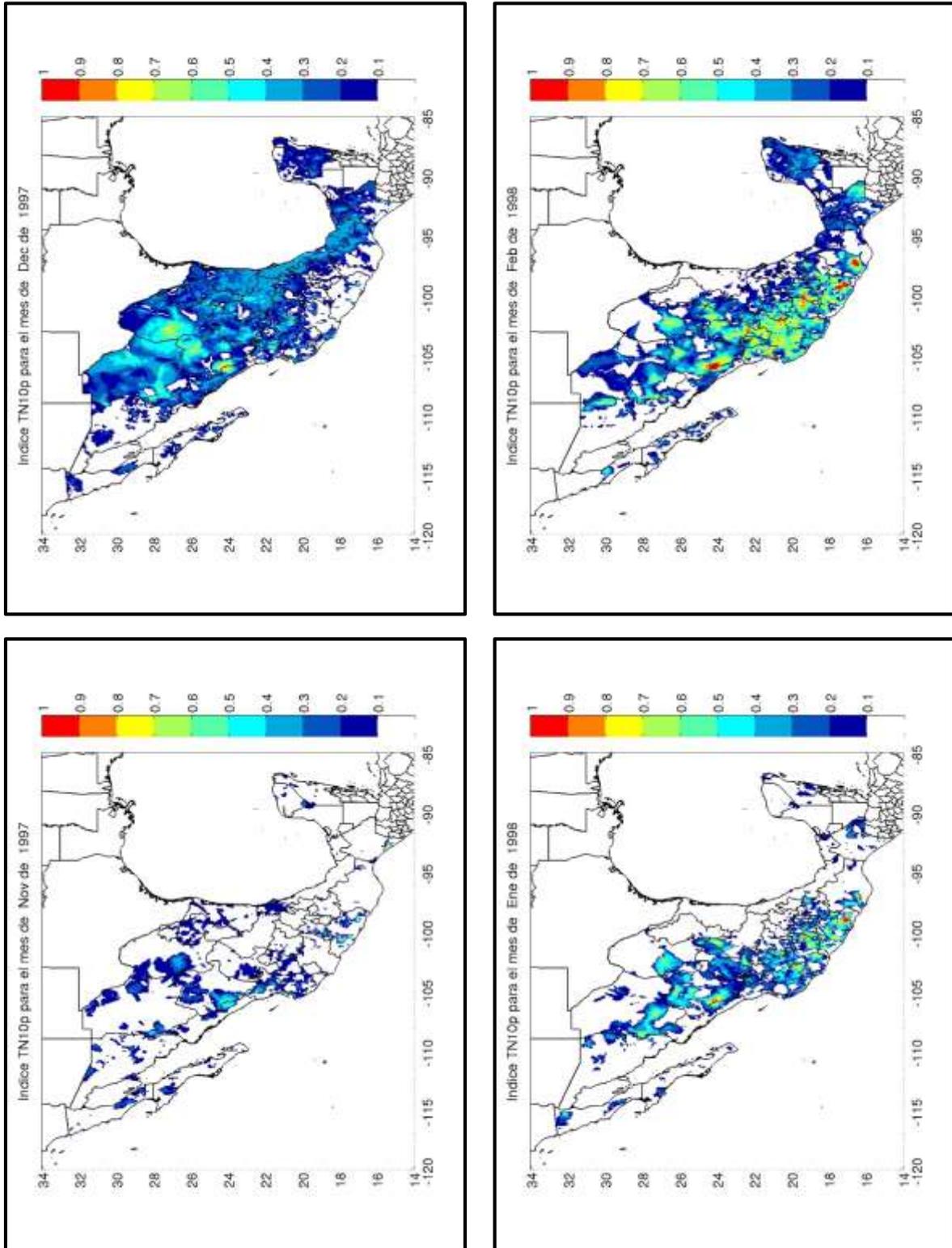


Figura 3.2.8. Índice TMIN10p para los meses de invierno durante el evento de El Niño de 1997-1998. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la Tmin estuvo por debajo del percentil 10.

3.2.3. Índice TX90p

El índice TX90p representa el porcentaje de días en los cuales la temperatura máxima rebasó el percentil 90, lo cual es indicativo del porcentaje de ocurrencia de días cálidos. El cálculo se hizo para cada mes del periodo 1979-2009, considerando los valores del percentil 90 que se describieron en la sección 3.2.1.

A continuación se presenta una comparación entre los mapas mensuales del índice TX90p para los años de 1982, 1983, 1997 y 1998 en los cuales ocurrieron eventos de El Niño muy intensos. Durante los primeros seis meses de 1982 (con excepción del mes de Mayo) (Fig. 3.2.9), se observan valores relativamente altos del índice en buena parte del territorio nacional, principalmente hacia la región central, indicando condiciones anómalamente cálidas. Los valores más bajos del índice se observan principalmente hacia el noroeste y en algunas regiones del sur y sureste del país.

Con excepción de Agosto y Septiembre, durante la segunda mitad de 1982 (Fig. 3.2.10) se observan en su mayoría valores relativamente bajos del índice TX90p en áreas extensas del territorio, siendo esto más notorio en el mes de Diciembre. La predominancia de valores muy bajos del índice continuó observándose en los primeros meses de 1983 (Fig. 3.2.11), sobre todo en los meses de Enero a Marzo, indicando condiciones menos extremas. Este patrón cambió durante los meses de Abril a Junio, cuando se observaron condiciones más cálidas sobre todo en Mayo y Junio hacia la mitad centro-sur y en algunas zonas del sureste del país.

Durante la segunda mitad de 1983 (Fig. 3.2.12) se presentaron valores relativamente bajos del índice TX90p en amplias regiones del país, principalmente durante Julio y Agosto, con excepción de algunas zonas muy localizadas que muestran valores muy elevados (lo cual puede deberse a información posiblemente errónea en la base de datos) y otras zonas con valores relativamente altos principalmente hacia el norte y oriente del país.

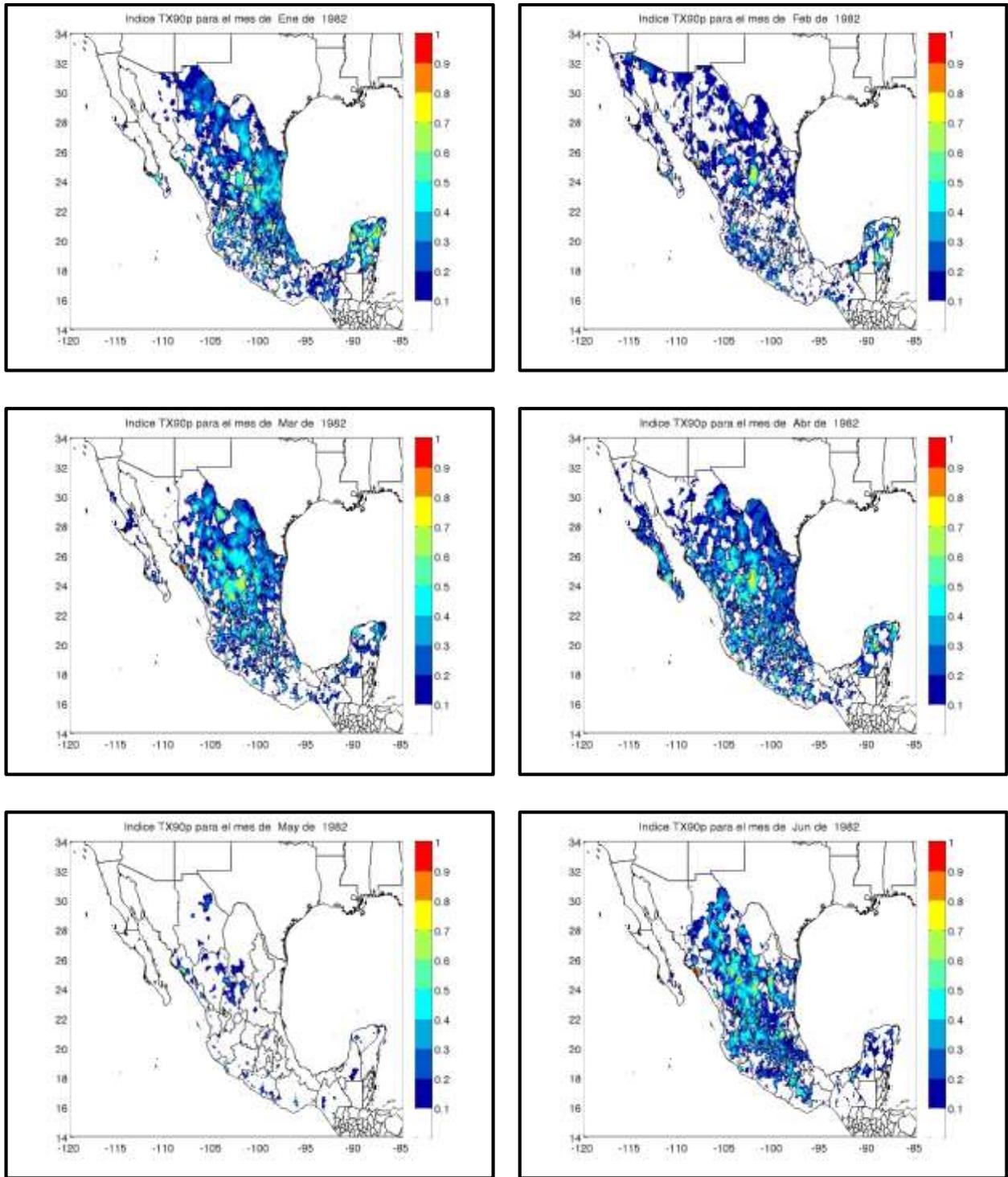


Figura 3.2.9. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1982. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

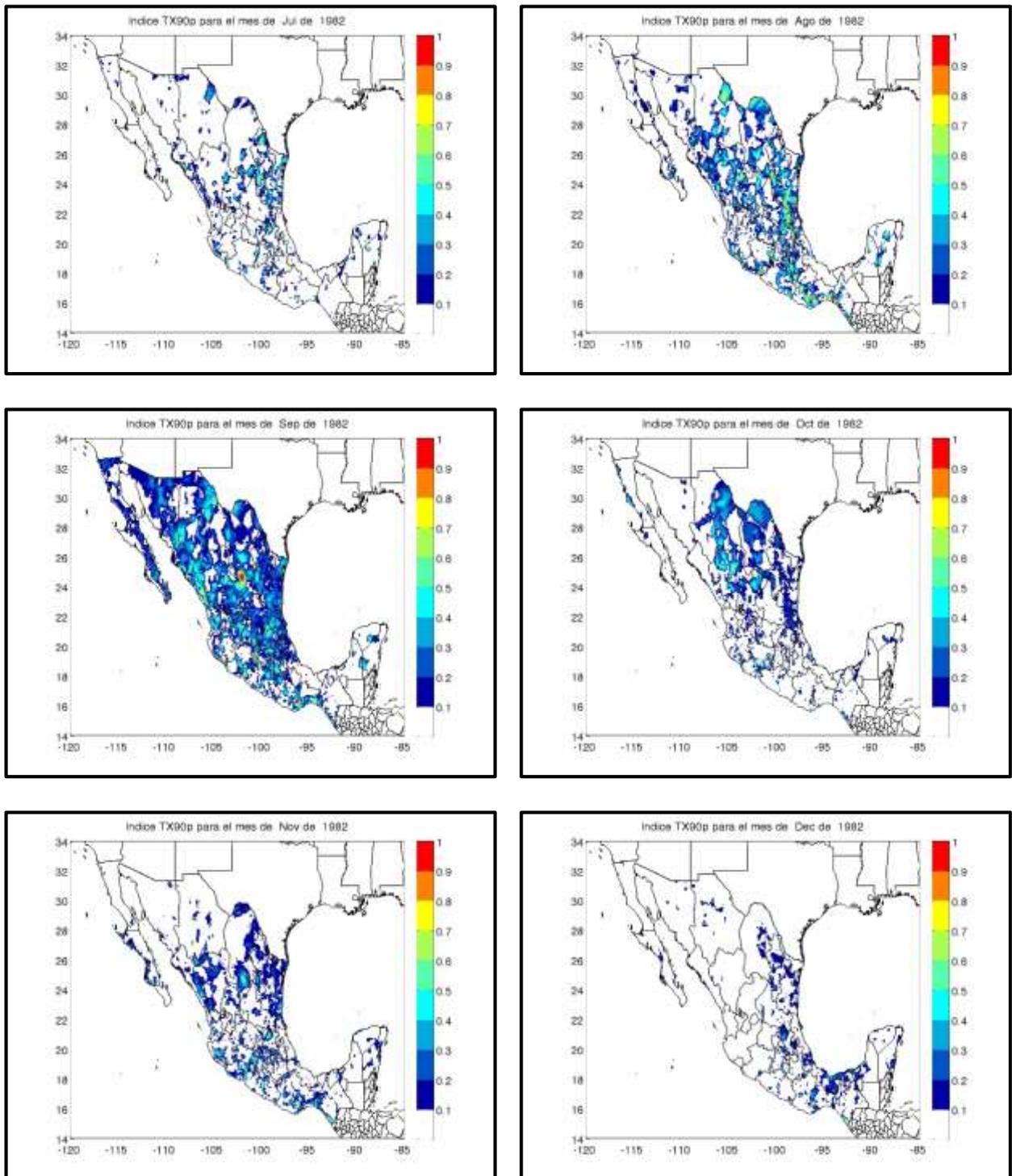


Figura 3.2.10. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1982. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

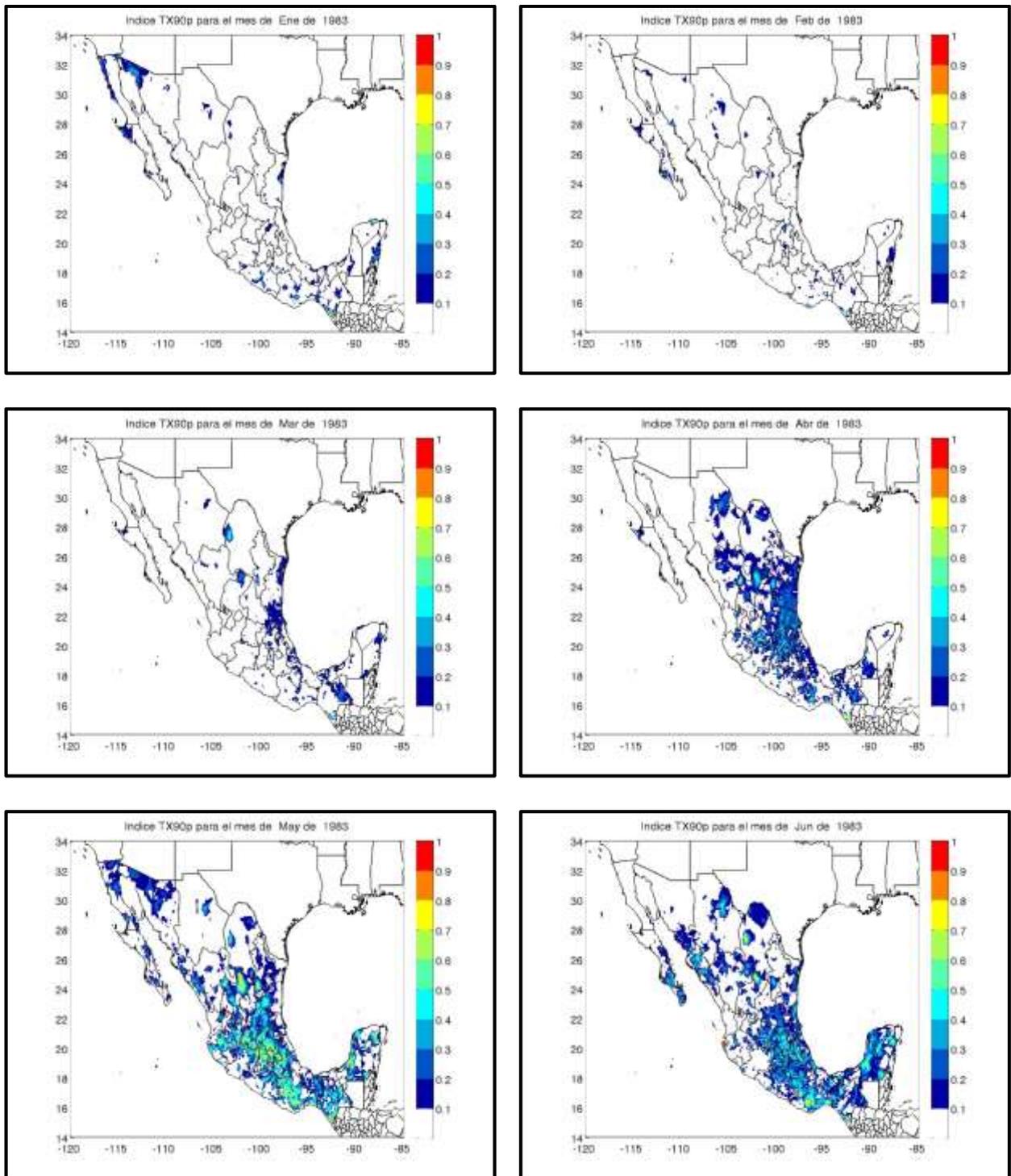


Figura 3.2.11. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1983. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

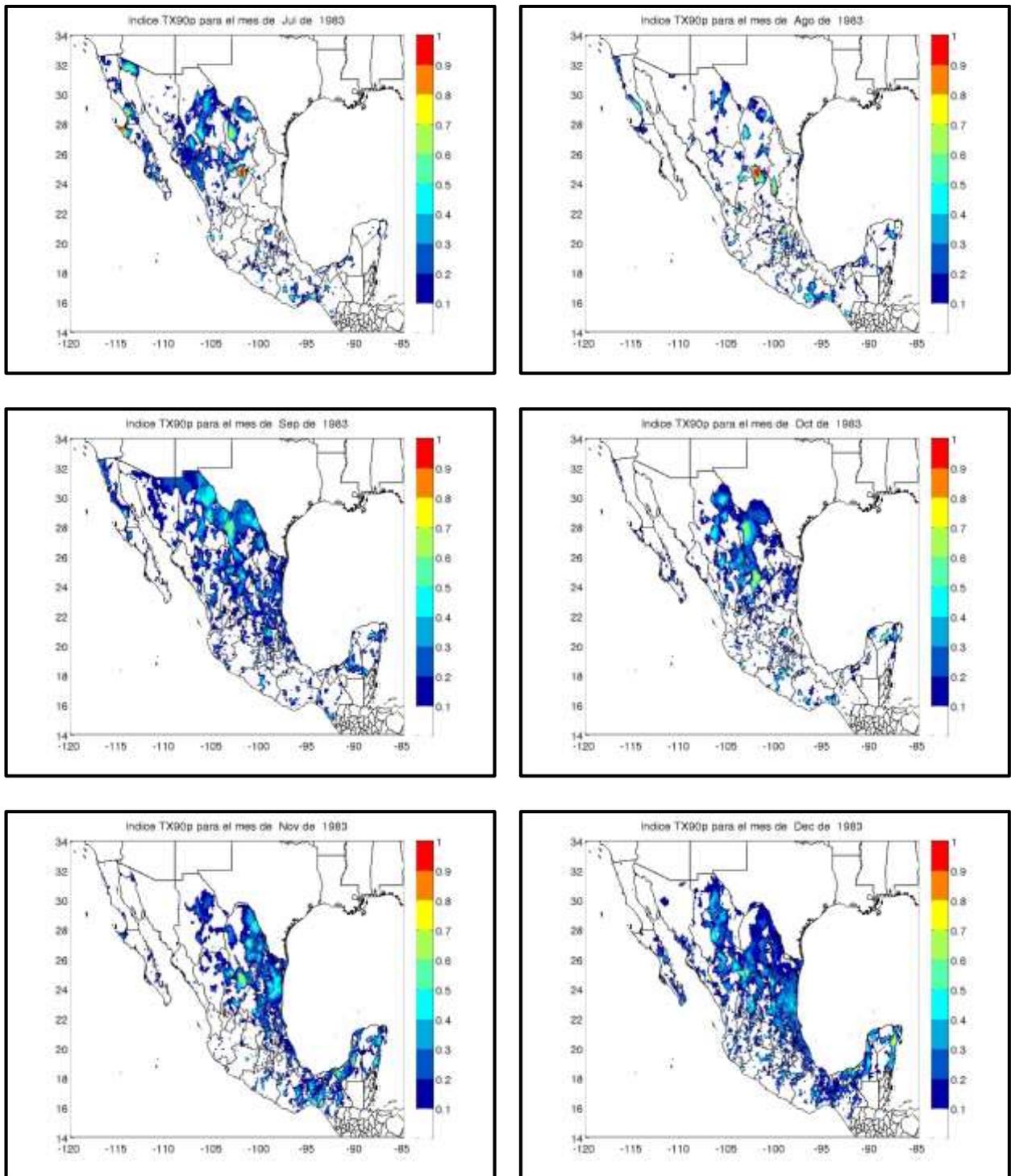


Figura 3.2.12. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1983. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

Comparando con los mapas mensuales del índice TX90p para los años de 1997 y 1998, se observan diferencias importantes con respecto a lo observado en 1982-1983. Por ejemplo, durante la primera mitad de 1997 (Fig. 3.2.13) se observan condiciones muy poco extremosas en gran parte del país, con excepción de algunas regiones al noroeste del país en los meses de Marzo y Mayo. Lo anterior difiere de lo observado durante la primera mitad de 1982 cuando, en general, las condiciones fueron bastante cálidas. Sin embargo, durante la segunda mitad de 1997 (Fig. 3.2.14) se observan patrones más parecidos a los de la segunda mitad de 1982, observándose valores altos del índice sobre todo en los meses de Agosto y Septiembre en buena parte del país. Aún cuando se mantuvieron condiciones relativamente poco extremosas durante los primeros meses de 1998 (Fig. 3.2.15), son notorios los valores tan altos del índice TX90p en gran parte del territorio nacional durante los meses de Mayo y Junio, sobre todo hacia la parte central en Mayo y hacia las costas del Golfo de México en Junio. Los valores del índice se ven disminuidos hacia la segunda mitad de 1998 (Fig. 3.2.16), principalmente a partir de Agosto, con excepción de algunas zonas relativamente poco extensas que muestran valores superiores al 40%.

El análisis anterior muestra que los impactos sobre las condiciones climáticas de México producidos por el fenómeno de El Niño varían sustancialmente de un evento a otro y también varían de un lugar a otro del país.

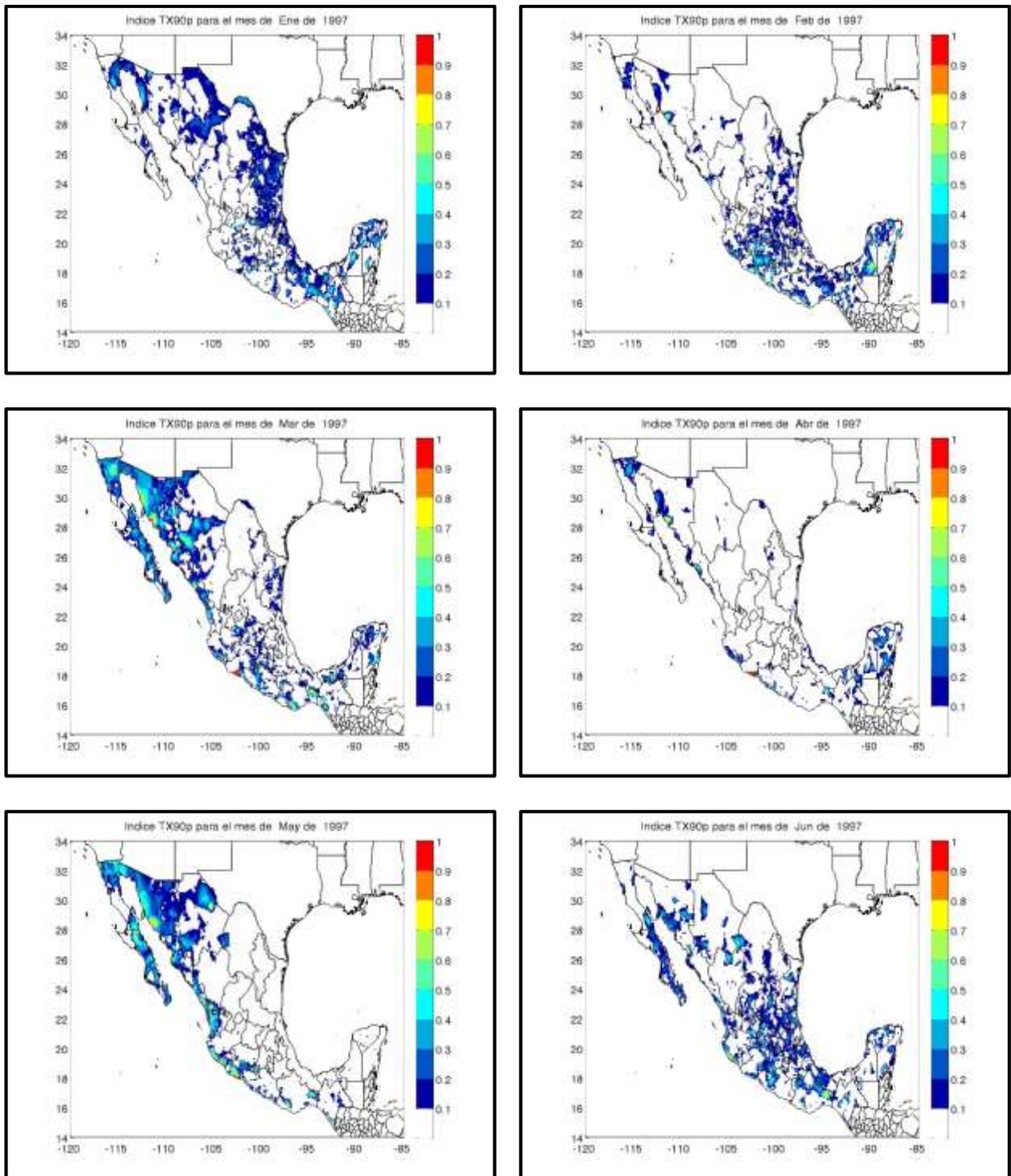


Figura 3.2.13. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1997. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

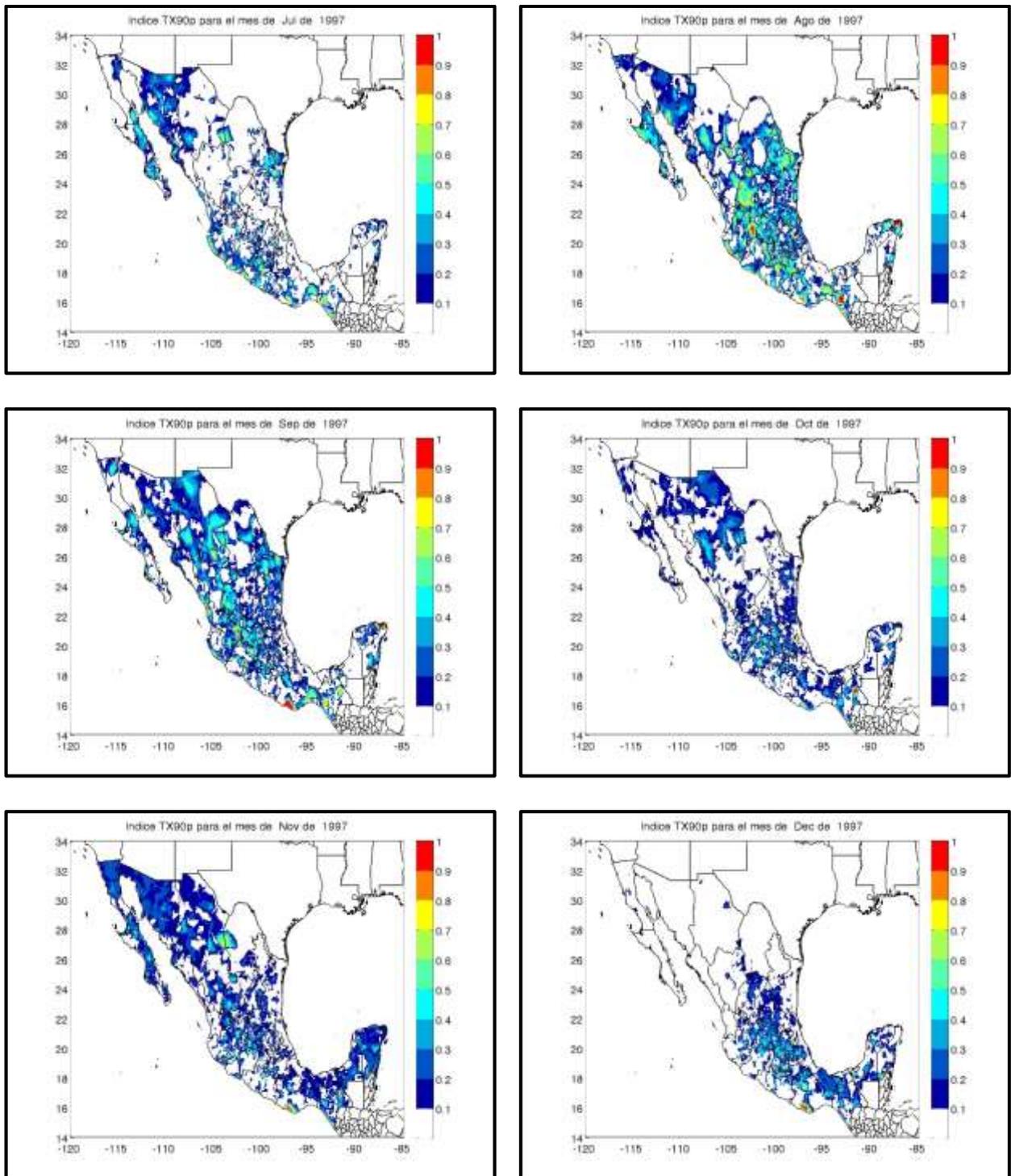


Figura 3.2.14. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1997. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

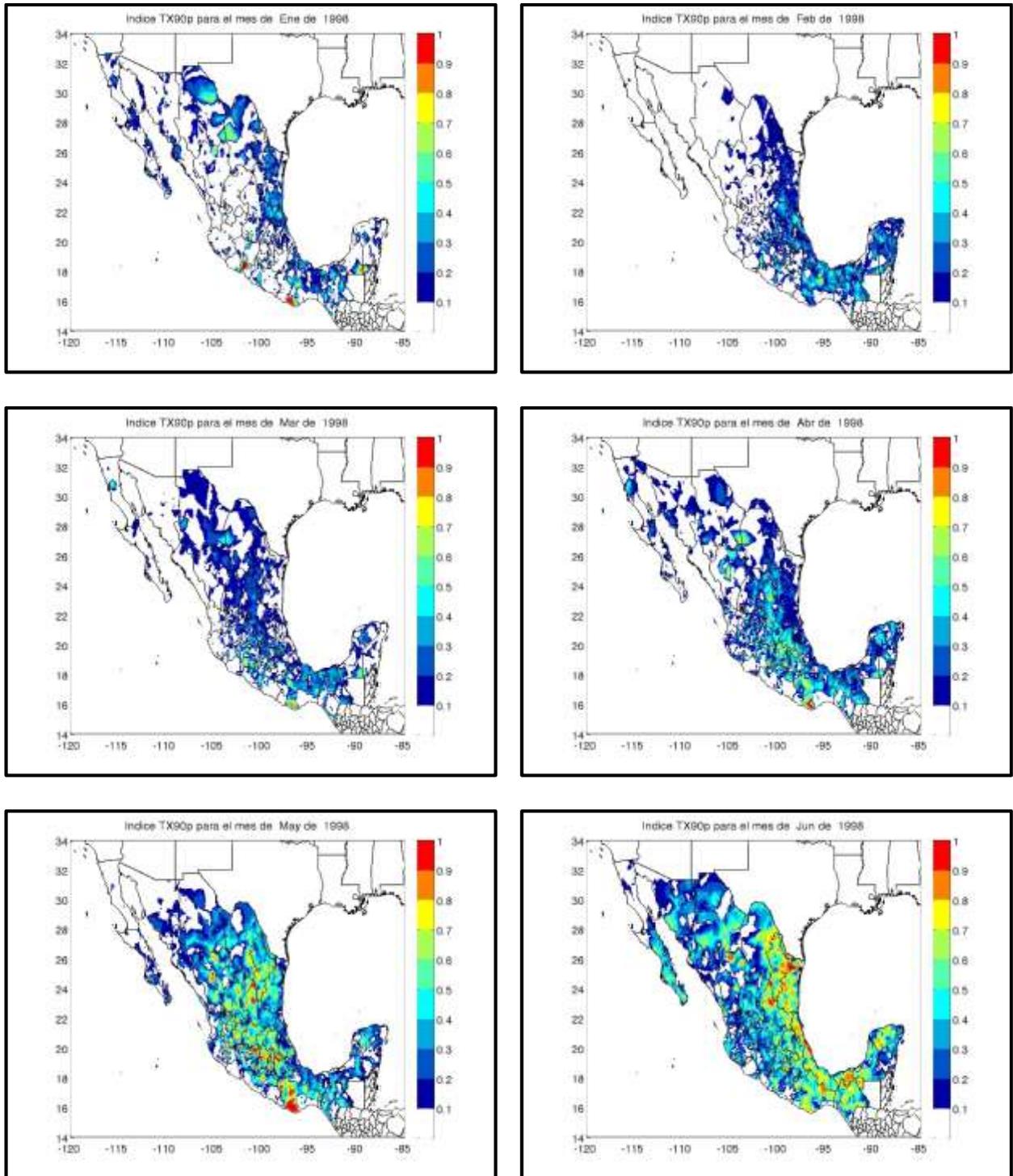


Figura 3.2.15. Índice TX90p para los meses de Enero a Junio de 1998. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

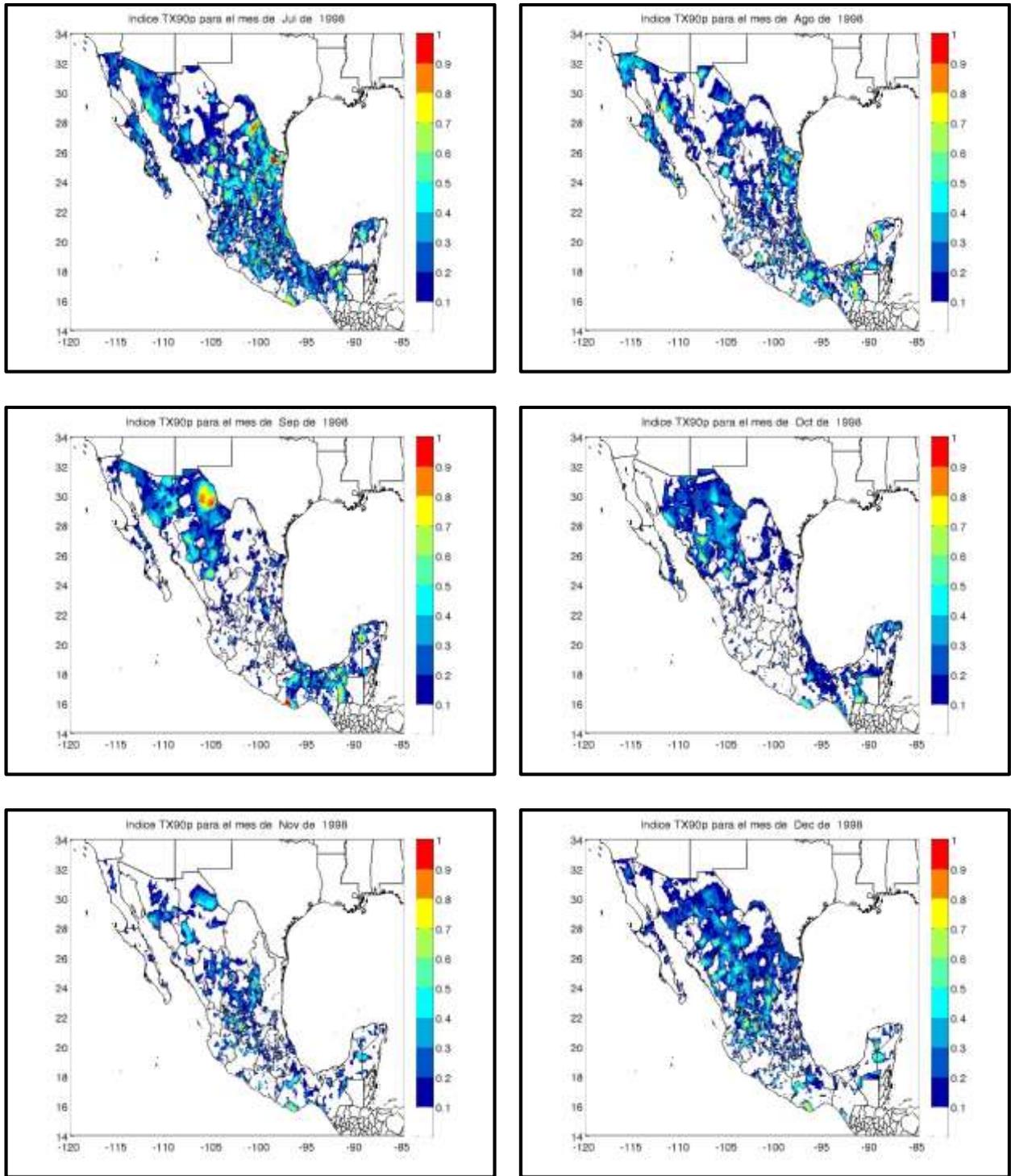


Figura 3.2.16. Índice TX90p para los meses de Julio a Diciembre de 1998. La barra de colores indica el porcentaje de días en los cuales la TMax estuvo por arriba del percentil 90.

3.2.4. Índice WSDI

El índice WSDI (ver Secc. 2.3.2) se utilizó para analizar la ocurrencia anual de eventos cálidos, es decir, aquellos en los que la TMax rebasó el percentil 90 durante al menos 6 días consecutivos para cada año en el periodo 1979-2009. Los mapas obtenidos muestran que la variación interanual y espacial de este índice es muy grande, haciendo difícil delimitar zonas que tengan predisposición a la ocurrencia de estos eventos. En general, año con año los valores más comunes del índice WSDI están en el rango de 0 a 8; sin embargo, hay años que muestran claramente un mayor número de eventos cálidos, como se describe a continuación.

Con el objetivo de mostrar las variaciones en la ocurrencia de eventos cálidos, se presentan como ejemplo los mapas del índice WSDI para el periodo de 1981 a 1984 (Fig. 3.2.17). En particular, los años de 1981 y 1984 presentaron los valores más bajos del periodo, con casi todo el territorio mostrando entre 0 y 5 ocurrencias, con excepción de zonas relativamente pequeñas en los estados de Chihuahua, Coahuila y Zacatecas principalmente. En cambio, en el año de 1982 hubo amplias zonas del país con más de 8 eventos cálidos, llegando a registrarse más de 20 eventos en algunas regiones. Los estados más afectados fueron: Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa e Hidalgo y algunas zonas de Chihuahua, Oaxaca y Michoacán. Dicho año coincide con el inicio de un fenómeno de “El Niño” *muy intenso*. En 1983 disminuyó la ocurrencia de eventos cálidos con respecto a 1982, pero también se observan regiones pequeñas al norte de Zacatecas y al oeste de Coahuila con valores superiores a 20 y amplias regiones hacia el centro y oriente del país con más de 8 eventos cálidos.

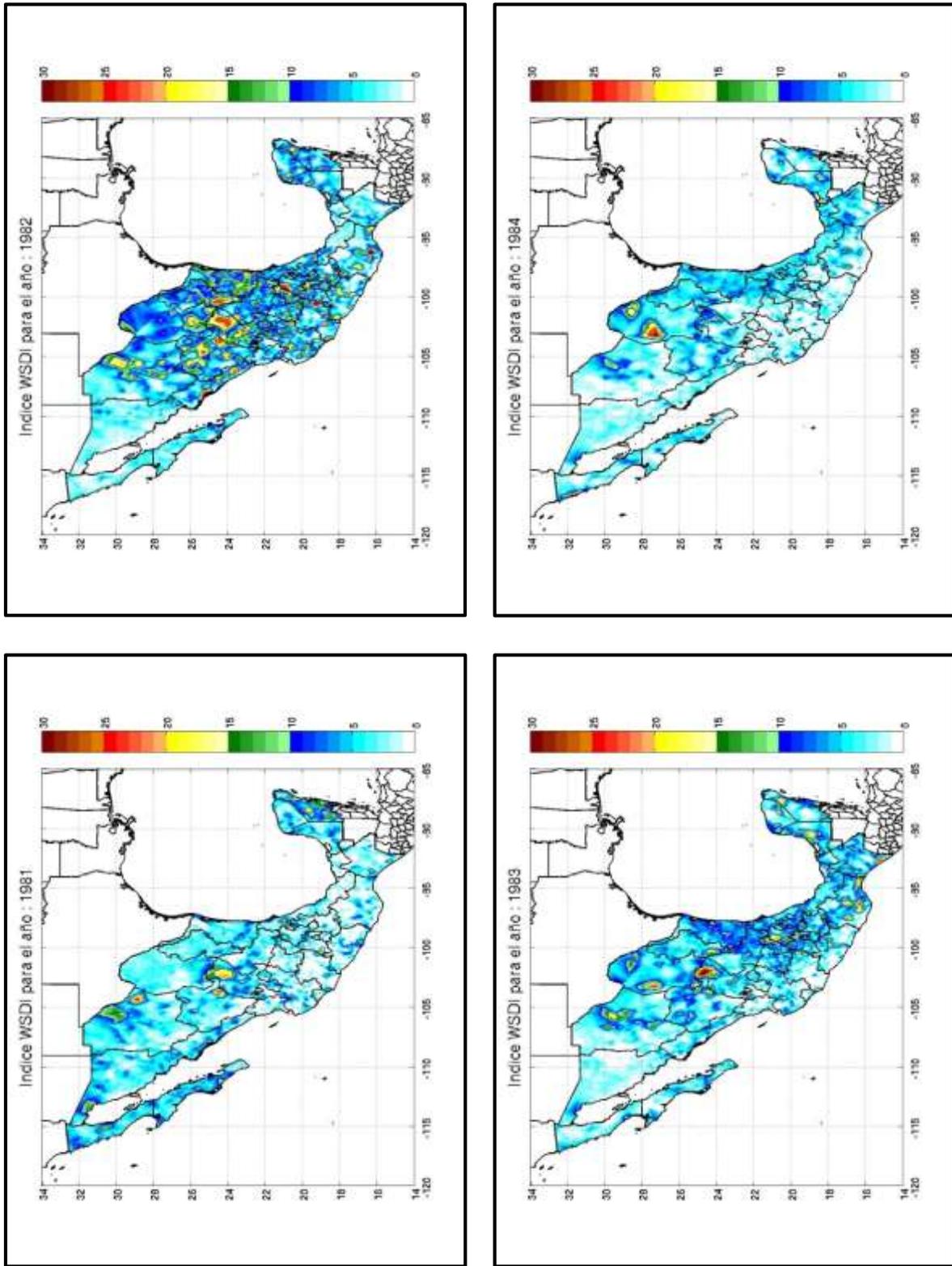


Figura 3.2.17. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 1981 a 1984. La barra de colores indica el número de eventos cálidos ocurridos por año.

Los mapas correspondientes a los años de 1995 a 1998 (Fig. 3.2.18) muestran que éste fue un periodo relativamente cálido en México. Por ejemplo, en 1995 se tienen valores del índice WSDI superiores a 5 prácticamente en todo el territorio, y algunas zonas de Baja California Sur, Chihuahua, Sinaloa, Chiapas y Yucatán muestran una ocurrencia anual de eventos cálidos por arriba de 15. En 1996 se observa un aumento en la ocurrencia de eventos cálidos con respecto a 1995 en la parte norte del país, en los estados de Sonora, Chihuahua, Nuevo León y Tamaulipas; mientras que en 1997 se observa una disminución en el norte del país y un aumento en estados del centro y sur, con valores altos del índice WSDI en algunas zonas de Jalisco, Michoacán, Colima, Guanajuato, Estado de México, Morelos, Oaxaca y Chiapas. En 1998, la mayor parte del país presentó un aumento considerable en el número de eventos cálidos, siendo excepciones la península de Baja California y buena parte de los estados costeros del Pacífico. En este año varios estados presentaron ocurrencias superiores a 15 y algunas regiones con valores por arriba de 25, incremento que puede estar relacionado con el fenómeno de “El Niño”. Habría que hacer notar la diferencia con el fenómeno de “El Niño” de 1982-1983, ya que en ese caso la mayor ocurrencia de eventos cálidos se observó en 1982, año de inicio del fenómeno, mientras que en el de 1997-1998 el incremento se observó en 1998, año de terminación del fenómeno.

Aunque la variabilidad interanual es bastante notoria, es interesante observar el comportamiento durante los últimos años analizados. Los años de 2007 y 2008 (Fig. 3.2.19) muestran varias regiones de los estados costeros del Pacífico, como Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, con valores del índice WSDI bastante altos (>25), así como algunas zonas de Chihuahua y Coahuila con valores superiores a 20. Asimismo, durante el año 2009 (Fig. 3.2.19) se observó un incremento en la ocurrencia de eventos cálidos en buena parte del territorio nacional con respecto a lo observado en los dos años previos, sobre todo en la parte central, en los estados de la vertiente del Golfo de México y hacia el noroeste del país.

Esto nos muestra una posible tendencia hacia un incremento en la ocurrencia anual de eventos cálidos en México a lo largo del periodo analizado, de 1979 a 2009. Un análisis más detallado sobre las tendencias se presenta en la sección 3.3.

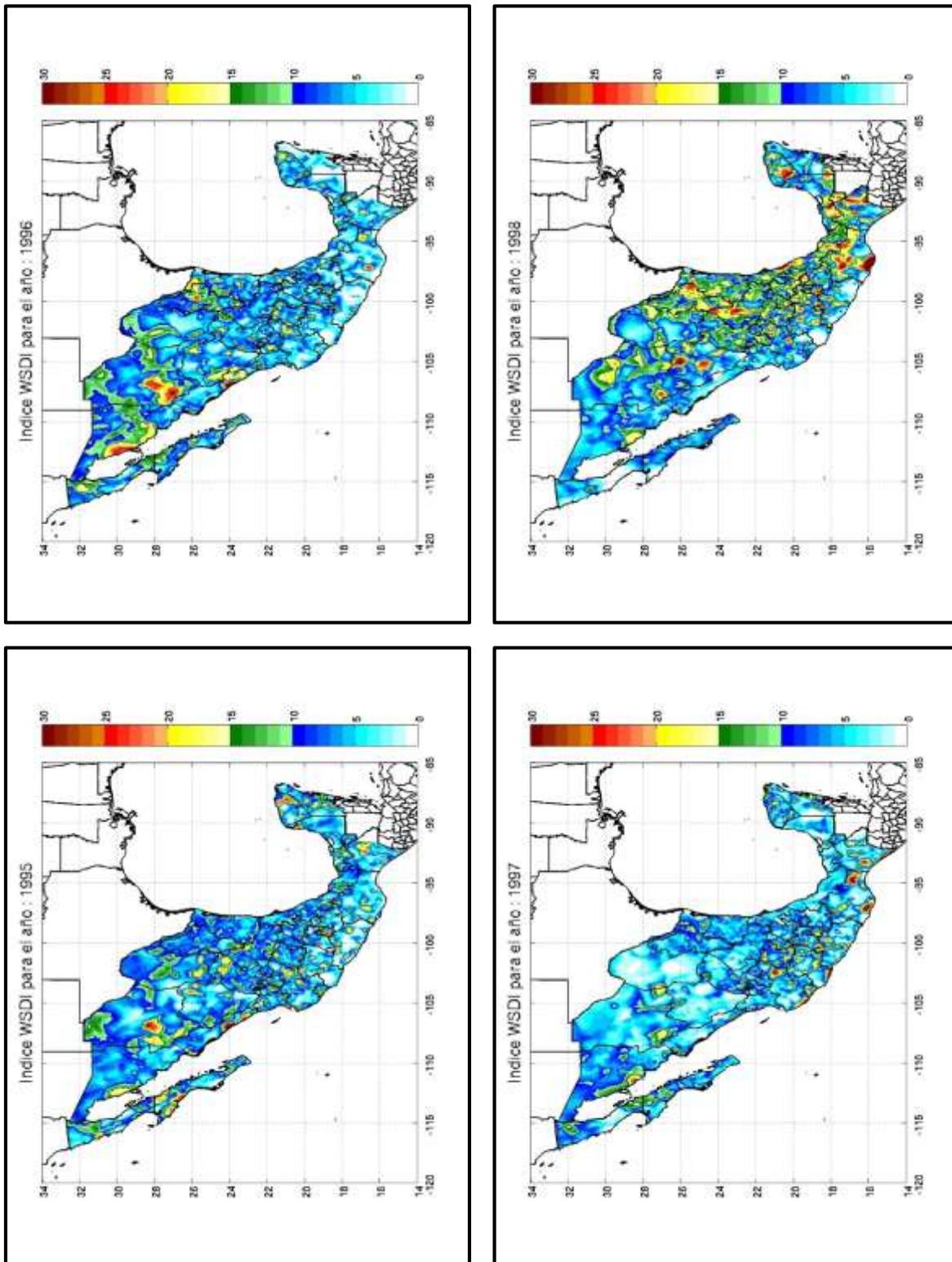


Figura 3.2.18. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 1995 a 1998. La barra de colores indica el número de eventos cálidos ocurridos por año.

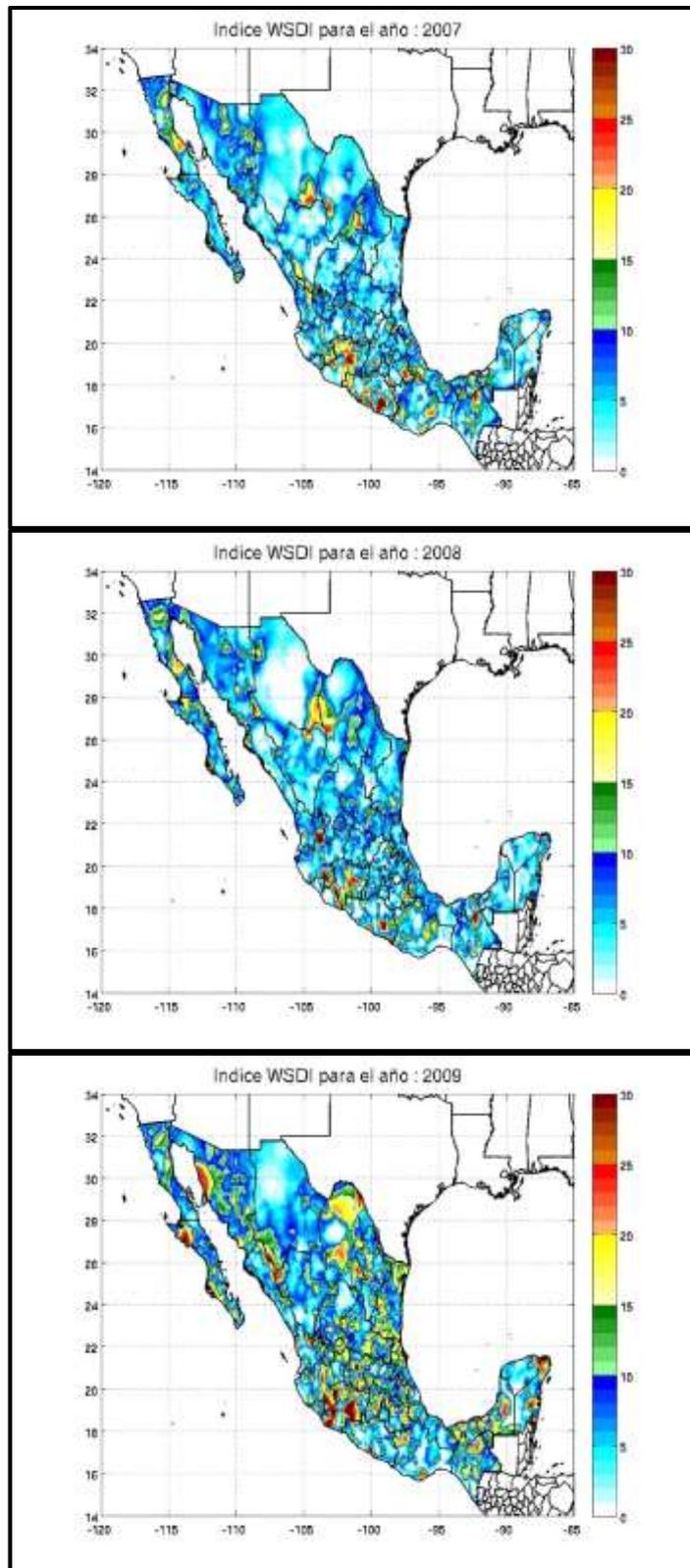


Figura 3.2.19. Variación interanual del índice WSDI para el periodo de 2007 a 2009. La barra de colores indica el número de eventos cálidos ocurridos por año.

3.3 TENDENCIAS DE LA TEMPERATURA

En esta sección se presentan los mapas de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas, del rango diurno de la temperatura, de las heladas y de la ocurrencia de eventos cálidos considerando el periodo 1979-2009. Las tendencias se calcularon mediante el ajuste de una recta, ya sea a la serie de promedios mensuales o a los conteos anuales, usando el criterio de mínimos cuadrados para cada punto de la malla.

3.3.1 Tendencias de la temperatura máxima y mínima

En el mapa de las tendencias de la temperatura máxima para el periodo 1979-2009 (Figura 3.3.1), se puede observar que gran parte del país presentó una tendencia positiva, es decir, un incremento de las temperaturas máximas, lo cual estaría indicando un calentamiento. Las tendencias de la temperatura máxima fueron positivas en el 77% del territorio, mientras que en el 23% restante hubo una tendencia negativa. Particularmente, en amplias regiones de la península de Baja California, Sonora y Chihuahua el aumento fue muy grande, de más de 0.08°C/año e inclusive hubo regiones con tendencias superiores a los 0.12°C/año , la cual es una tasa de incremento muy superior a las observadas a nivel continental y global⁴³. En estados como Morelos, México, Tlaxcala y el Distrito Federal se observa una ligera tendencia positiva de alrededor de 0.02°C/año . Por el contrario, algunas regiones del norte de Chihuahua, centro y sur de Coahuila, centro y norte de Durango y Zacatecas, centro y sur de Oaxaca, así como la península de Yucatán y pequeñas áreas en otros estados de la República presentaron una disminución en las temperaturas máximas, con valores negativos en la tendencia que van desde los $-0.01^{\circ}\text{C/año}$ hasta aproximadamente los $-0.10^{\circ}\text{C/año}$ en zonas muy localizadas.

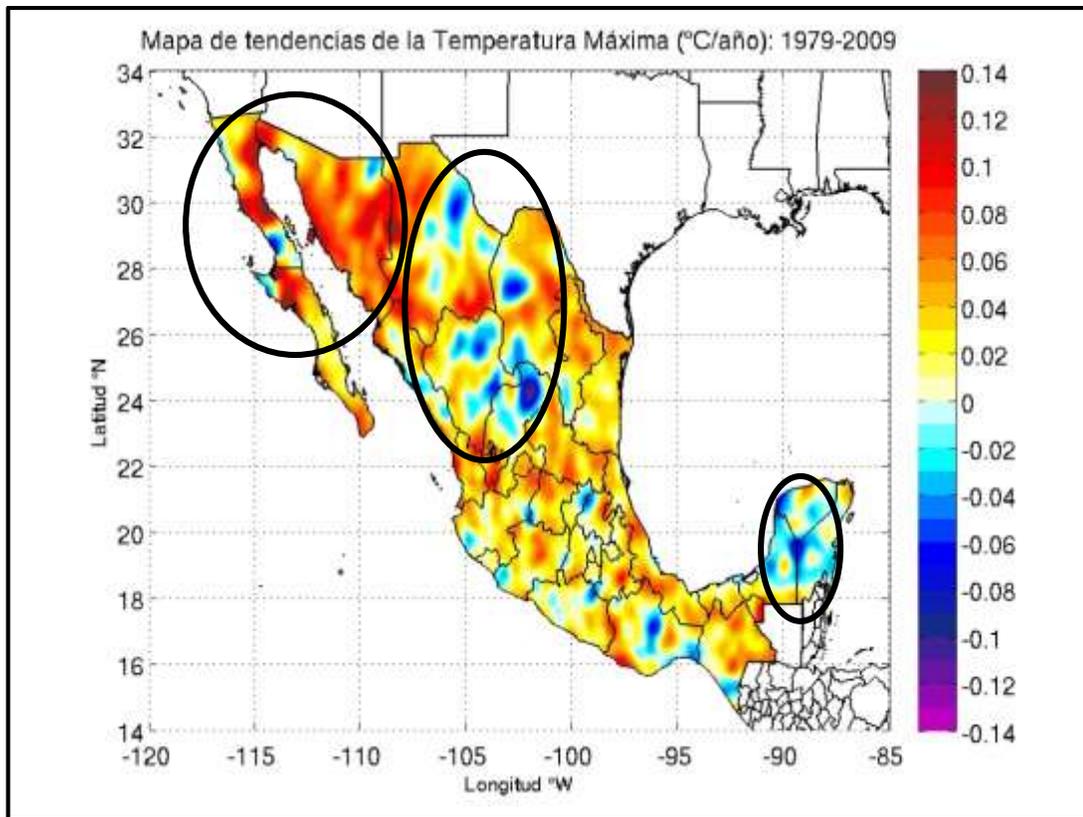


Figura 3.3.1. Mapa de tendencias de la temperatura máxima durante 1979-2009. La barra de colores indica los valores de la tendencia en °C/año.

En la figura 3.3.2, el mapa de tendencias de la temperatura mínima muestra valores positivos en muy diversas regiones del país, pero sobre todo en el norte donde sobresale el estado de Chihuahua, con zonas que alcanzan los 0.14°C/año. Sin embargo, la región sur-occidental de ese estado presenta tendencias negativas de hasta -0.08°C/año. En general, el 58% de la República Mexicana presentó tendencias positivas en la temperatura mínima, mientras que el 42% restante presentó una tendencia negativa. Muchos estados muestran tendencias negativas en ciertas áreas y positivas en otras. Además de Chihuahua, entre los estados que sobresalen por presentar tendencias negativas marcadas en algunas zonas (de hasta -0.08°C/año), están: Baja California Norte y Sur, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Michoacán, Puebla y Oaxaca.

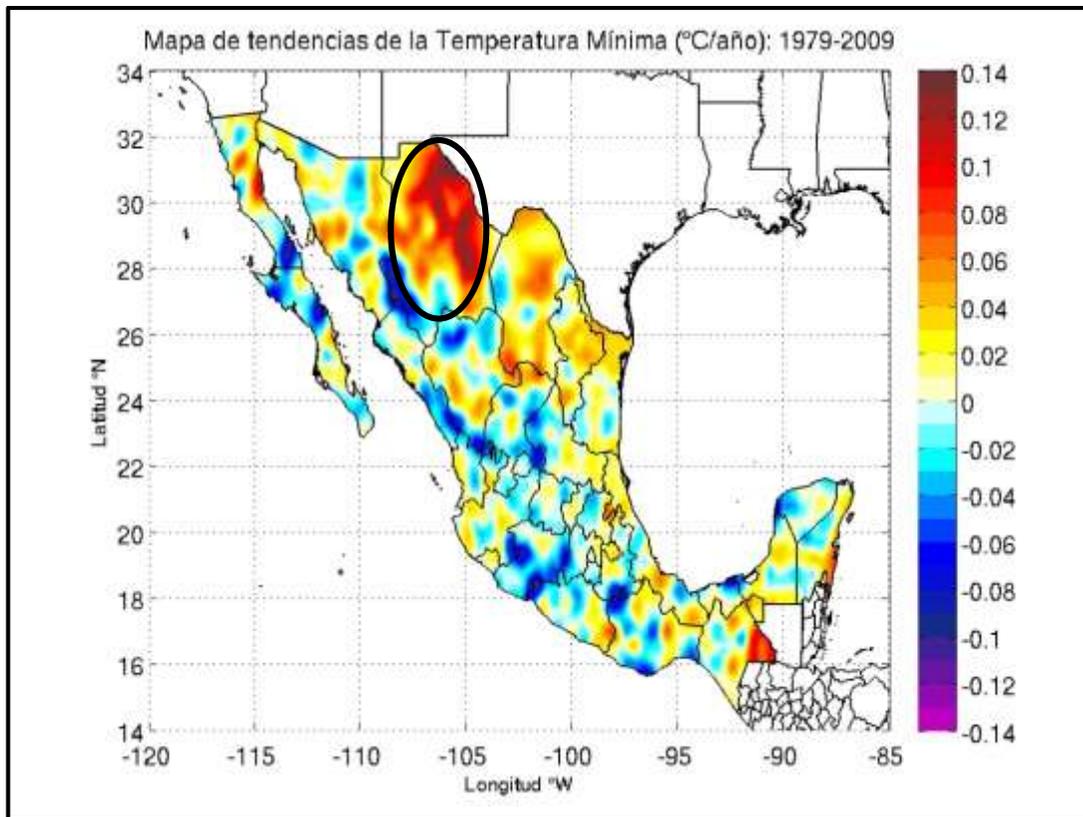


Figura 3.3.2. Mapa de tendencias de la temperatura mínima durante 1979-2009. La barra de colores indica los valores de la tendencia en °C/año.

Los resultados obtenidos en cuanto a las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas concuerdan con los estudios de Pavía et al. (2009) y Englehart y Douglas (2003 y 2005).

3.3.2 Tendencias del rango diurno de temperatura

Cuando se hace la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, se obtiene el rango diurno de temperatura (DTR). Los cambios en el DTR son consecuencia de las variaciones en el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas; así, por ejemplo, un incremento en el DTR puede deberse a un aumento en la temperatura máxima y una disminución en la temperatura mínima o bien a un incremento en ambas pero con una tasa de incremento mayor en la temperatura máxima. En el mapa de tendencias del DTR (Fig. 3.3.3), se pueden observar valores negativos grandes (e.d.,

una tendencia a su disminución) en el norte de Chihuahua debido a que en esa región la temperatura mínima presentó una fuerte tendencia positiva (ver la Fig. 3.3.2) mientras que la máxima presentó una tasa de incremento menor en algunas zonas y en otras un descenso (ver la Fig. 3.3.2). En el caso de la península de Yucatán la disminución en el DTR se debe al descenso en las temperaturas máximas y a un ligero incremento en las mínimas (ver Figuras 3.3.1 y 3.3.2). Otro caso es el de Zacatecas, en donde se observa una clara disminución en el DTR en zonas del centro y norte del estado, que se debe a un descenso en las temperaturas máximas y un incremento en las mínimas, mientras que en el sur se observa una tendencia positiva del DTR, debido a un incremento en la temperatura máxima y una disminución en la temperatura mínima. Este resultado coincide con un estudio realizado en el estado de Zacatecas por Brito-Castillo et al (2009).

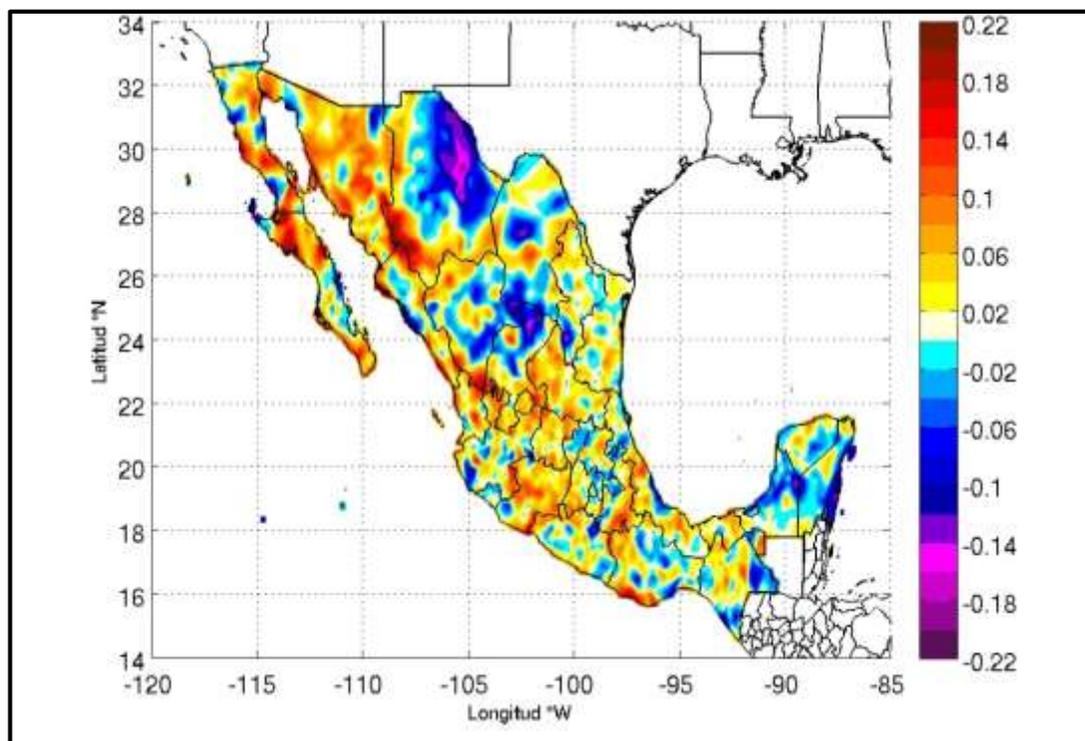


Figura 3.3.3. Mapa de tendencias del rango diurno de temperaturas durante 1979-2009. La barra de colores indica los valores de la tendencia en °C/año.

3.3.3 Tendencias de las heladas en México

En cuanto a las tendencias del número total anual de heladas en el periodo 1979-2009 (Fig. 3.3.4), se obtuvo que el 31% de la República Mexicana presentó una tendencia positiva, es decir, hubo un aumento en el número de heladas durante el periodo analizado, mientras que en el 38% del territorio se observó una tendencia negativa y en el 31% restante no se presentó una tendencia significativa. Se puede observar que buena parte del estado de Zacatecas (con excepción de la región más al norte) y la región occidental del estado de SLP muestran una tendencia positiva, con una tasa de incremento que alcanza los 2 días con helada por año en ciertas zonas, lo cual concuerda con la tendencia negativa observada en la temperatura mínima (ver la Fig. 3.3.2). También se aprecia una tendencia positiva en la ocurrencia de heladas en algunas regiones del norte de Sonora, y en las regiones de Chihuahua y Durango donde se sitúa la Sierra Madre Occidental. Sin embargo, hacia el sur de Durango, también sobre la Sierra Madre Occidental, se observan tendencias negativas de hasta -2 días con helada por año. Asimismo, las regiones centro y norte del estado de Chihuahua presentaron una tendencia negativa en el número de días con heladas, con tasas de disminución que llegan a ser de -2 días al año, lo cual se ve reflejado en la marcada tendencia positiva de las temperaturas mínimas en esa región (ver Fig. 3.3.2). Hacia la parte central del país, se observan algunas regiones de montaña con tendencias positivas, mientras que el estado de Tlaxcala y algunas regiones del estado de México e Hidalgo presentan tendencias negativas.

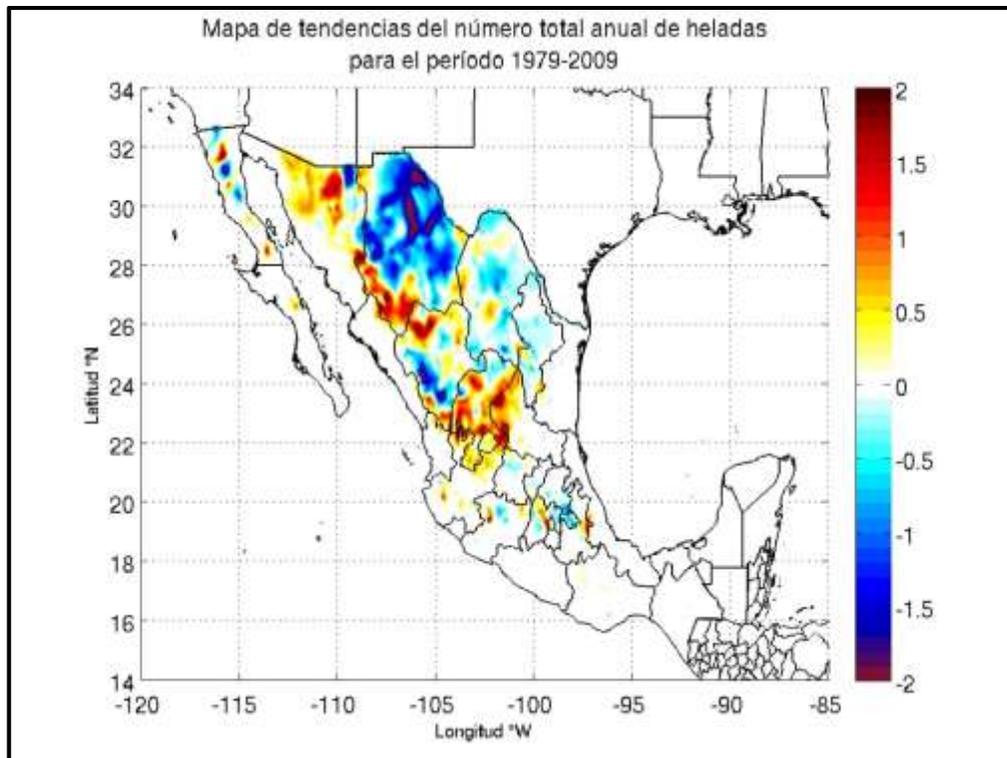


Figura 3.3.4. Mapa de tendencias del índice FD durante 1979-2009. La barra de colores indica los valores de la tendencia como número de heladas por año.

3.3.4 Tendencias de días cálidos en México

El mapa de tendencias de la ocurrencia anual de eventos cálidos para el periodo 1979-2009 (Figura 3.3.5) muestra tendencias positivas en gran parte del territorio. Los cálculos indican que en el 75% del país se observó una tendencia positiva y una tendencia negativa en el 25% restante. Dentro de ese 25% resaltan dos regiones, al norte de Chihuahua y al norte de Zacatecas, con una notable tendencia negativa en la ocurrencia de eventos cálidos. Por otra parte, las regiones más afectadas por el aumento de estos eventos son el noroeste, el centro y sur de la República Mexicana, con incrementos de hasta 0.5 eventos cálidos por año en algunas zonas.

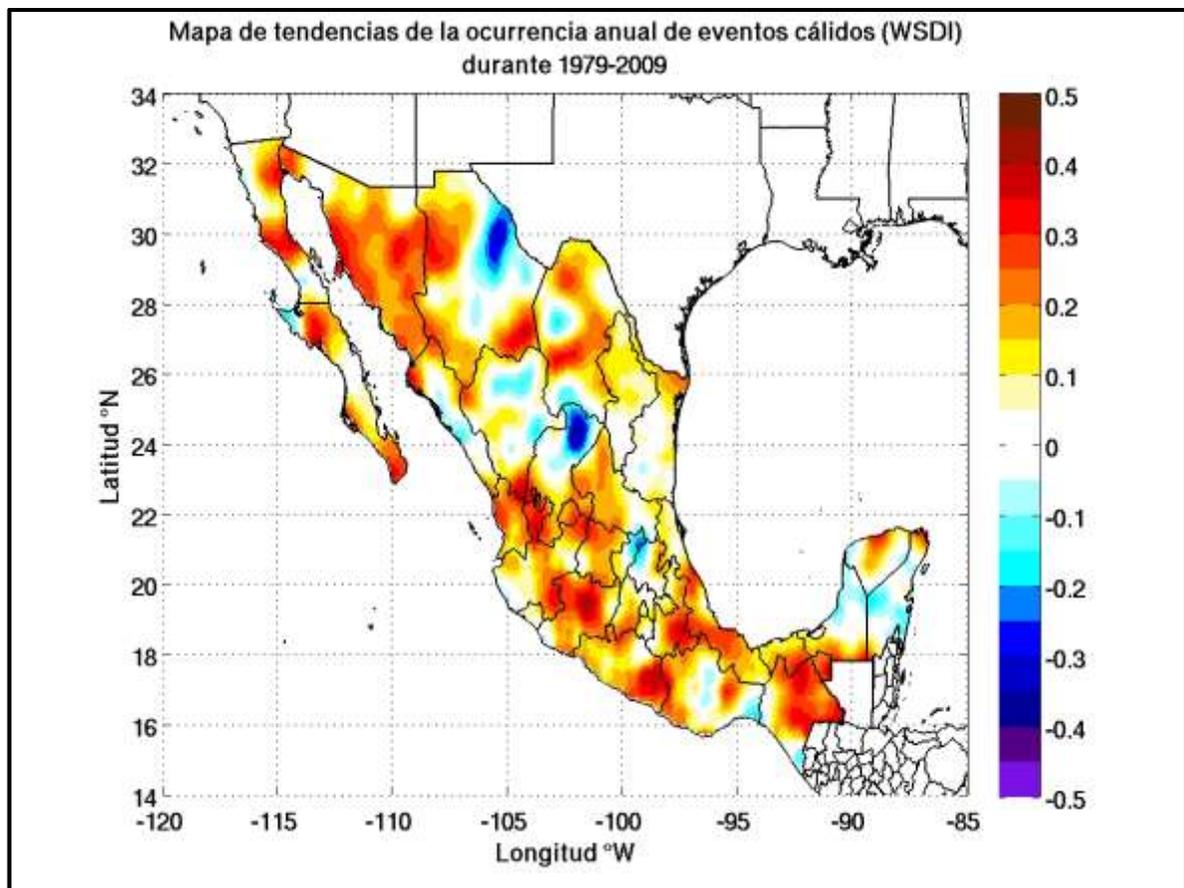


Figura 3.3.5. Mapa de tendencias del índice WSDI durante 1979-2009. La barra de colores indica los valores de la tendencia como ocurrencia de eventos cálidos por año.

CONCLUSIONES

Los mapas diarios de las temperaturas máximas y mínimas muestran una variabilidad espacial y temporal muy grandes, lo cual se ve reflejado en los mapas de los distintos índices calculados. En particular, el índice FD, que representa el conteo anual de días con helada, muestra que las zonas más afectadas son las partes altas de las cordilleras montañosas de la Sierra Madre Occidental y del Eje Neovolcánico, siendo los estados de Chihuahua y Durango los que se ven mayormente afectados. También en las zonas altas de BC, Sonora, Coahuila y Zacatecas se llegan a presentar valores relativamente altos del índice FD, y en algunos años se presentaron heladas en estados como Veracruz y Chiapas donde es poco común que ocurran.

Analizando los periodos invernales (Octubre-Marzo), se observó un incremento en el número de heladas durante el invierno de 1997-98 con respecto a los de 1995-96, 1996-97 y 1998-99, que podría estar relacionado con la ocurrencia del fenómeno de El Niño. También se observó un incremento en el índice FD durante el invierno de 1982-83, cuando ocurrió otro evento de El Niño muy intenso, aunque el área afectada fue algo menor que en el de 1997-98. Esto concuerda con los resultados obtenidos para el índice TN10p, representativo del porcentaje de ocurrencia de noches frías, que muestra valores altos (> 50%) en Febrero de 1998 en buena parte del territorio, al igual que en Febrero de 1983, aunque en un área más reducida hacia el centro y sur del país.

El índice WSDI, utilizado para estimar la ocurrencia anual de eventos cálidos, muestra una importante variación interanual y espacial, lo que dificulta delimitar áreas con predisposición a la ocurrencia de estos eventos. En general, los valores más comunes del índice WSDI se encuentran entre 0 y 8, pero hay años que muestran claramente un mayor número de eventos cálidos. En particular, durante 1982 hubo amplias zonas del país con más de 8 eventos cálidos, mostrando ocurrencias superiores a 20 en algunas regiones y siendo Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa e Hidalgo los estados más afectados. Asimismo, comparado con los

años de 1995 a 1997, durante 1998 se registró un aumento en el índice WSDI en buena parte del territorio, sobre todo hacia la mitad oriental del país.

En general, los análisis comparativos que se realizaron para determinar los impactos del fenómeno de El Niño sobre los patrones de temperatura en México y la ocurrencia de heladas y días cálidos, mostraron que la intensidad de los impactos varía de un evento a otro y que también varían de una región a otra del país.

En cuanto al comportamiento de las tendencias de la temperatura mínima durante el periodo analizado, el mapa correspondiente muestra una gran variabilidad espacial, con valores positivos en un 58% del territorio y negativos en el 42% restante. La parte norte del país muestra, en general, tendencias positivas, distinguiéndose gran parte del estado de Chihuahua, con excepción de la región sur-occidental que presenta una marcada tendencia negativa. Otros estados que presentan marcadas tendencias negativas de la temperatura mínima en algunas regiones son: Baja California Norte y Sur, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Michoacán, Puebla y Oaxaca. Por su parte, los resultados para el índice FD muestran que el 38% del territorio presentó una tendencia negativa, es decir, una tendencia a la disminución del número de heladas por año, principalmente hacia el sur de Durango, el centro y norte de Chihuahua, y algunas regiones de Tlaxcala, el estado de México e Hidalgo. Por otra parte, el 31% del territorio presentó una tendencia de incremento en la ocurrencia de heladas por año, principalmente hacia el centro y sur de Zacatecas, el occidente de SLP y en algunas zonas altas de Sonora, Chihuahua y Durango, mientras que el 31% restante no mostró una tendencia significativa.

Con relación a las temperaturas máximas, se presentaron tendencias positivas en el 77% del territorio, particularmente elevadas en amplias zonas de la península de Baja California, Sonora y Chihuahua, y menores en estados como Morelos, México, Tlaxcala y el Distrito Federal. El 23% restante del territorio presentó tendencias negativas, abarcando algunas regiones de Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Oaxaca y la península de Yucatán.

Las tendencias del rango diurno de temperatura van de la mano con los resultados obtenidos para las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas. Por ejemplo, en

el norte de Chihuahua se observa una marcada tendencia negativa en el DTR debido a que en esa región se registró una fuerte tendencia positiva en la temperatura mínima mientras que la máxima presentó una tasa de incremento menor. Otro caso con tendencia negativa en el DTR es el de la parte norte de Zacatecas, en donde se observó una disminución de las temperaturas máximas y un incremento de las mínimas. Hay varios estados con claras tendencias positivas del DTR, como Sonora, BC (norte y sur), SLP, Aguascalientes, Michoacán, Puebla y Tabasco, además del suroccidente de Chihuahua.

Con relación a las tendencias del índice WSDI, se obtuvo que el 75% del país presentó una tendencia positiva, siendo el noroeste, centro y sur de México las regiones más afectadas por el aumento de eventos cálidos. Dentro del 25% del país que presenta una tendencia negativa en la ocurrencia de eventos cálidos sobresalen el noreste de Chihuahua y el norte de Zacatecas.

Las tendencias de calentamiento observadas muestran una variabilidad espacial importante y sería muy difícil atribuir las a un sólo factor, como al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera como resultado de las actividades humanas. La variabilidad climática natural puede ser muy grande a nivel local, lo cual dificulta estimar la posible influencia antropogénica sobre el clima local. A escala regional y local puede haber factores como: la expansión urbana, cambios en el uso y la cobertura del suelo, erupciones volcánicas, quema de biomasa, tala inmoderada de bosques, uso irracional del agua, pérdida de la biodiversidad, etc., que influyen de manera importante sobre el clima.

RECOMENDACIONES

A continuación se hacen una serie de recomendaciones que podrían complementar y mejorar el análisis de eventos y temperaturas extremas.

- Realizar pruebas de significancia para la pendiente de las tendencias.
- Hacer un análisis por estaciones del año.
- Hacer un análisis más detallado sobre la influencia del ENSO.
- Llevar a cabo análisis regionales y locales.
- Analizar la ocurrencia de ondas de calor en México incluyendo variables climáticas como la humedad y la precipitación.
- Analizar la ocurrencia de heladas y ondas de calor incluyendo factores como: la urbanización, el cambio de uso de suelo y otros patrones atmosféricos globales distintos del ENSO.

REFERENCIAS

- Ayllón, M. T. (2013): *Elementos de Meteorología y Climatología*. Ed. Trillas, México, 3ª ed., 211 p.
- Brito-Castillo, L., Castro, S. C. & Ulloa, R. (2009): Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *International Journal of Climatology*, 29: 211-221.
- Brito, L. & Pedrozo, A. (2015): *Inundaciones, heladas e incendios forestales*. En: Conviviendo con la naturaleza. El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México. Ed. T. Cavazos. REDESClim, CONACYT, CICESE, INECC, CENAPRED. México, 164 p.
- Carrasco, N.I. (2013): *Reconstrucción y análisis de la variación de la temperatura en México*. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. 142 p.
- Castro, Z. R., Arteaga, R., Vázquez, M. & Jiménez, J. L. (2002): *Introducción a la Meteorología*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 247 p.
- CENAPRED (2001): *Heladas*. Serie Fascículos. 1ª Ed. Secretaría de Gobernación. México. 35 p.
- Englehart, J. & Douglas A. V. (2003): Urbanization and seasonal temperatura trends: observational evidence from a data-sparse part of North America. *International Journal of Climatology*, 23: 1253-1263.
- Englehart, J. & Douglas A. V. (2005): Changing behavior in the diurnal range of surface air temperaturas over Mexico. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L01701.
- García, R.O., Tejeda, A., Jáuregui, E. (2009): Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*, 54(4): 335-345.

IPCC (2007): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. ISBN 978 0521 188009-1.

Ize, Irina (2002): El cambio climático y la salud humana. *Gaceta Ecológica* núm. 65, oct-dic 2002, pp. 43-52, SEMARNAT, México.

Jáuregui, E. (2009): The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 70, pp. 71-76.

Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., & Tasa, D. (2007): *The Atmosphere: An introduction to meteorology*. Upper Saddle River, N.J., Pearson Prentice Hall.

Magaña, V., Pérez, J.L., Vázquez, J.L., Carrisoza, E., & Pérez, J. (2004): *El Niño y el clima*. En: Los impactos de El Niño en México. Ed. V. Magaña. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Secretaría de Gobernación. México, 229 p.

Magaña, V., Méndez, J. M., Morales, R. & Millán, C. (2004): *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México*. En: *Cambio climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 1a Ed. 525 p.

Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., y Coautores (2006): North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 343-360.

Pavia, E.G., Graef, F. & Reyes J. (2009): Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29, 1324-1329.

Ruza, F. (2002): *Tratado de cuidados intensivos pediátricos*. 3ª Ed. Madrid: Norma-Capitol.

Robinson, Peter J. (2001): On the Definition of a Heat Wave. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 40, No. 4.

U.S. Climate Change Science Program (2008): Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific

Islands. Synthesis and Assessment Product 3.3. Editores: T. R. Karl, G. A. Meehl, Ch. D. Miller, S. J. Hassol, A. M. Waple, & W. L. Murray.

World Meteorological Organization (2009): *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Climate Data and Monitoring. WCDMP-No. 72. WMO-TD No. 1500.

INTERNET

- 1) <http://www.atlalnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-hidrometeorologicos/heladas-y-nevadas>
- 2) Imagen tomada de: <http://fjfferrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/Imagen1.png>
- 3) www.meted.ucar.edu/mesoprim/mesodefn_es/
- 4) <http://meteolab.fis.ucm.es/clima/circulacion-extratropical-ondas-de-rossby>
- 5) www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/glossary.htm
- 6) Figura elaborada por Anders Persson
- 7) Imagen tomada de: <http://meteo.maicas.net/articulos/circula.html>
- 8) http://tallex.at.fcen.uba.ar/index_archivos/page0029.htm
- 9) https://climate.ncsu.edu/edu/k12/.atmosphere_circulation
- 10) Ídem
- 11) http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/Introduccion_a_la_dinamica_de_la_atmosfera/Teorico_I_D_A/IDA_Tema7.pdf
- 12) <http://weatherfaqs.org.uk/node/145>
- 13) Ídem referencia 11
- 14) <http://www.rinconsolidario.org/meteorologia/webs/dincircho.htm>
- 15) Ídem
- 16) <http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/pdf/heladas.pdf>
- 17) <http://www.ecologiahoy.com/humedad-absoluta-especifica-y-relativa>
- 18) http://es.wikipedia.org/wiki/Radiación_solar
- 19) es.wikipedia.org/wiki/Nubosidad
- 20) Imagen tomada de:
http://sp1.fotolog.com/photo/17/58/72/chusma1979/1231406470493_f.jpg
- 21) Imagen tomada de: http://leonsurdigital.com/not/963/heladas_primaverales
- 22) El Economista, 9 de enero de 2014.
- 23) <http://www.atlalnacionalderiesgos.gob.mx>
- 24) El Heraldo de Chihuahua, 4 de febrero de 2011.
- 25) w1.weather.gov/glossary/
- 26) http://issuu.com/miledrevista/docs/revista_22_junio2014is__nxpowerlite
- 27) Imagen tomada de: <http://www2.ucar.edu/atmosnews/news/10508/long-term-forecasts-heat-waves>

- 28) Imagen tomada de: https://twitter.com/conagua_clima/
- 29) http://www.rinamed.net/es/es_ris_clim_calor.htm
- 30) http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/recursos/geologia.jsp
- 31) http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-71512012000300012&script=sci_arttext
- 32) https://es.wikipedia.org/wiki/Sierra_Madre_Occidental
- 33) http://www.durangoturistico.com/destinos/125_sierra_madre.html
- 34) http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADDEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf
- 35) https://es.wikipedia.org/wiki/Eje_Neovolc%C3%A1nico#Principales_volcanes_en_el_Eje_Neovolc.C3.A1nico
- 36) Ídem
- 37) http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADDEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf
- 38) Ídem
- 39) http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=270&Itemid=166
- 40) Imagen tomada de: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- 41) <http://www.gebco.net>
- 42) http://en.wikipedia.org/wiki/Meteorological_reanalysis
- 43) <https://www2.ucar.edu/climate/faq/how-much-has-global-temperature-risen-last-100-years>