



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Climatología, variabilidad, tendencias y eventos
extremos de la temperatura en la Zona
Metropolitana del Valle de México durante el
periodo 1961-2021**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geomático

P R E S E N T A

Fernando Alexis Durango Mendoza

DIRECTORA DE TESIS

M.C.T. María Elena Osorio Tai



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CLIMATOLOGÍA, VARIABILIDAD, TENDENCIAS Y
EVENTOS EXTREMOS DE LA TEMPERATURA EN LA
ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO
DURANTE EL PERIODO 1961-2021.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOMÁTICO

P R E S E N T A :

FERNANDO ALEXIS DURANGO MENDOZA

DIRECTORA DE TESIS

M.C.T. MARÍA ELENA OSORIO TAI

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, 2024



*Para Leti y Leo,
mis amados padres que me dieron todo y más.*

Agradecimientos

A mi madre, mi principal pilar en la vida. Muchas gracias por educarme, apoyarme, procurarme y siempre pensar en mí como yo pienso en ti. Esta tesis es tuya, es el resultado de un esfuerzo que solo una madre como tú podría hacer. Gracias por todo.

A mi padre, mi principal ejemplo de vida. Muchas gracias por enseñarme a trabajar, a amar, a ayudar, a ser una buena persona y por comprarme mi primera bici. Esta tesis también es tuya. Estoy seguro de que te habría encantado y estarías muy orgulloso. Siempre en mi mente y corazón, gracias por todo.

A mi querida hermana Ali, mi principal aliada en esta vida. Muchas gracias por compartir tu sabiduría conmigo, por escuchar, aconsejar y estar siempre a mi lado. Te quiero mucho, hermana. Muchas gracias.

A mi tía Imelda, mi segunda aliada en esta vida. Muchas gracias por brindarme un plato de comida siempre que iba a tu casa mientras me compartías tus vivencias o yo las mías en la CDMX. Gracias por escuchar y entender. A toda tu familia por siempre recibirme y apoyarme, muchas gracias.

A mis abuelos, abuelas, tíos, tías, y en particular a mis tíos Celso y Abel, que han estado de distintas maneras en mi vida, muchas gracias.

A mis queridos amigos que son parte de mi vida, Frankie, Yun, Dulce, Jerry, Rocío, Xochitl, Xime, Erika, Anette y Fausta, mis lugares seguros. Muchas gracias por estar a mi lado en distintos momentos de mi vida. Quisiera dar gracias por todo lo que cada uno de ustedes ha aportado a mi vida, pero posiblemente esta tesis sería el triple de grande. Muchas gracias por todo, queridos amigos, larga vida a ustedes.

En particular a mis estimados Raúl y Emilio, con quienes compartí uno de los momentos más bellos de mi vida estando en Madrid. Por todas las risas que compartimos, las veces que salvaron mi vida (literalmente, Emilio), las clases y proyectos compartidos, todos los karaokes, por rogarme para que les hiciera lentejas, todas las carnitas asadas, las pláticas sobre nuestro futuro y el amor, por escuchar, confiar y estar, muchas gracias. Toledo 77 no se olvida.

A mis profesores y profesoras, Alejandra Aguilar, Elena Tai, Berenice H., Juan Manuel, Francisco Barrera y Arconada Rey, grandes ejemplos de cómo debe ser la docencia. Por ser parte de mi formación como ingeniero y persona, muchas gracias.

En particular a la maestra Tai, que desde que tomé sus materias la consideraré para ser mi asesora. Siempre estaré muy agradecido por todo lo que ha hecho por mí, por hacerme

conocer a personas increíbles en mi vida, darme la oportunidad de experimentar el mundo científico y por escuchar todas mis dudas académicas y personales. Muchas gracias por ser mi amiga.

Al grupo Interacción Océano-Atmósfera IOA, principalmente al Dr. Jorge Zavala Hidalgo y la Dra. Rosario Romero Centeno, dos grandes ejemplos de vida. Por todas las facilidades brindadas para realizar esta tesis, por compartir grandes momentos conmigo y toda su sabiduría, muchas gracias.

A Katy Trujillo, otro ejemplo de vida, quien compartió todo su saber para la realización de esta tesis mientras compartíamos carcajadas o caras de duda. Muchas gracias.

A Miguel Ángel Robles Roldán, que aparte de ser uno de mis sinodales y aventurarse a leer esta tesis, escuchó todas mis inquietudes respecto a la temperatura y la vida, además de escuchar todas mis millones de ideas de filtros espaciales e ideas millonarias en caso de que fracasara esta tesis. Muchas gracias.

A la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) que financió esta tesis a través del proyecto SECTEI/168/2022.

Finalmente, quiero agradecer a la vida, por todas las personas que han pasado por mi vida y los aprendizajes que me han dejado.



Resumen

La Zona Metropolitana del Valle de México es de gran importancia debido a que en ella habitan más de 20 millones de personas, además de sus características económicas, sociales, ambientales, políticas y culturales, las cuales se manifiestan en la rápida y dinámica vida diaria. Las emisiones de gases de efecto invernadero de origen antropogénico han ocasionado cambios en el clima de la región, teniendo consecuencias en la calidad de vida de las personas, la flora y la fauna.

En esta tesis se caracteriza la variabilidad de la temperatura del aire para el periodo 1961-2021 utilizando datos diarios de la temperatura máxima y mínima de distintas redes de observación pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional, Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México y la Universidad Nacional Autónoma de México.

A partir de esos datos se generaron productos diarios de la temperatura máxima, media y mínima del aire que se utilizaron para determinar la climatología anual y mensual, la variación interanual, tendencias e incrementos, variaciones por década, percentiles, variación estacional e interanual del rango diurno y eventos extremos como días cálidos, noches frías y heladas.

Se concluyó que la temperatura del aire ha incrementado principalmente desde la década de los 90. El rango diurno presenta una reducción en el periodo de estudio. Los eventos extremos asociados a la temperatura mínima presentan una reducción de ocurrencias a lo largo del tiempo, mientras que los eventos extremos asociados a la temperatura máxima presentan un incremento de ocurrencias enfatizadas en algunas regiones.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos particulares	2
2. Generalidades del clima y la atmósfera	3
2.1. Clima y tiempo atmosférico	3
2.2. La atmósfera, su definición y composición	4
2.3. Presión atmosférica	7
2.4. Estructura vertical de la atmósfera	8
3. La temperatura	11
3.1. Definición	11
3.2. Variaciones de la temperatura	11
3.2.1. Ciclo diario de la temperatura	11
3.2.2. Ciclo estacional de la temperatura	13
3.3. Factores que determinan la temperatura	14
3.3.1. Altitud	14
3.3.2. Distribución continental	15
3.3.3. Corrientes marinas	15
3.3.4. Dirección del viento	15
3.3.5. Topografía	16
3.3.6. Cobertura nubosa	16
3.4. Eventos extremos de la temperatura	16
3.4.1. Días cálidos	16
3.4.2. Noches frías	16

3.4.3. Heladas	17
3.5. Medición de la temperatura	17
3.5.1. Unidades de Medida	17
3.5.2. Características de la medición	17
3.5.3. Fuentes de error y recomendaciones	18
3.6. Sensores de resistencia eléctrica	19
4. Zonas Metropolitanas en México	21
4.1. Definición de zona metropolitana	21
4.2. La Zona Metropolitana del Valle de México	22
4.2.1. Composición	22
4.2.2. Características geográficas	22
4.2.3. El clima en la ZMVM	23
4.2.4. Coberturas	23
5. Técnicas matemáticas aplicadas espacialmente	25
5.1. Interpolación bilineal	25
5.1.1. Triangulación de Delaunay	25
5.1.2. Esquema de interpolación bilineal	26
5.2. Filtros	27
5.2.1. Filtro pasa bajas y pasa altas	27
5.2.2. Convolución	28
5.3. Regresión lineal	28
5.3.1. Método de mínimos cuadrados	29
5.3.2. Varianza	30
5.3.3. Coeficiente de determinación	30
6. Datos	31
6.1. Redes del Servicio Meteorológico Nacional	31
6.1.1. Red de observatorios meteorológicos	31
6.1.2. Red de Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESMAs) .	31
6.1.3. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs)	34
6.1.4. Red de Estaciones climatológicas convencionales	35
6.2. Red de la Ciudad de México	37
6.2.1. Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)	37
6.3. Red de la Universidad Nacional Autónoma de México	38
6.3.1. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU)	38
7. Metodología	40
7.1. Integración de datos	42
7.2. Reducción de la temperatura ambiente al nivel del mar	43
7.3. Detección de estaciones espacialmente anómalas	43

7.4.	Interpolación bilineal de las temperaturas potenciales	47
7.5.	Suavizado de mallas	47
7.6.	Obtención de la temperatura a 2 m de superficie a partir de la temperatura potencial	47
7.7.	Recorte de la malla al dominio de la ZMVM	47
8.	Resultados y discusión	49
8.1.	Climatología y variación estacional	49
8.1.1.	Climatología por Alcaldía	52
8.2.	Variación interanual	52
8.2.1.	Por tipo de cobertura	55
8.2.2.	Tendencias e incrementos	57
8.3.	Variación decadal	60
8.4.	Percentiles de temperatura	63
8.5.	Variaciones de rango diurno	67
8.5.1.	Variación estacional	67
8.5.2.	Variación interanual	70
8.6.	Eventos extremos	72
8.6.1.	Días cálidos	72
8.6.2.	Noches frías	76
8.6.3.	Heladas	80
9.	CONCLUSIONES	85
	Apéndice A. Mapas de temperatura máxima, media y mínima promedio Anual	88

Índice de figuras

2.1. Clima y tiempo atmosférico	4
2.2. Principales componentes de la atmósfera	5
2.3. Concentración de CO_2 en los últimos tres ciclos glaciales.	6
2.4. Vapor de agua en septiembre del 2020 a nivel mundial.	6
2.5. Tormenta de arena sobre Baja California Sur, México.	7
2.6. Presión atmosférica representada gráficamente y su variación respecto la altitud.	8
2.7. Estructura vertical de la atmósfera	10
3.1. Variación diaria de la radiación solar entrante y la radiación de la Tierra y curva de temperatura resultante	12
3.2. Variación del ángulo de incidencia de la radiación solar y la normal a la superficie terrestre respecto a la latitud.	13
3.3. Orientación de la Tierra durante los equinoccios y solsticios.	14
3.4. Diagrama de la convección atmosférica.	15
3.5. Ejemplo de un abrigo meteorológico ubicado en el ICAyCC, UNAM.	18
3.6. Termómetro de resistencia de platino de alambre embobinado y de película delgada.	20
3.7. Correlación entre la temperatura y la resistencia eléctrica	20
4.1. Zona Metropolitana del Valle de México.	23
4.2. Distribución temporal de las series de Uso del Suelo y Vegetación para su uso en el filtro espacial.	24
5.1. Triangulación de Delaunay	26
5.2. Comparación entre una imagen poca rugosa y muy rugosa.	27
5.3. Comparación entre filtro pasa bajas y pasa altas aplicados a una imagen.	28
5.4. Ejemplo de la convolución espacial.	29
6.1. Red de observatorios Meteorológicos del SMN.	32
6.2. Diagrama de una Estación Sinóptica Meteorológica Automática.	33
6.3. Red de Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESMA) del SMN.	33
6.4. Diagrama de una EMA.	34

6.5.	Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas EMAs del SMN	35
6.6.	Estación climatológica convencional del SMN.	36
6.7.	Red de Estaciones Climatológicas Convencionales del SMN	36
6.8.	Red de estaciones meteorológicas de la REDMET.	37
6.9.	Estación Meteorológica ubicada en Milpa Alta perteneciente a la REDMET.	38
6.10.	Estación meteorológica perteneciente al PEMBU ubicada en el CCH oriente.	39
6.11.	Red de estaciones meteorológicas del PEMBU.	39
7.1.	Dominio de la ZCM y la zona de muestreo	41
7.2.	Distribución de una muestra de temperatura	44
7.3.	Histogramas de la temperatura máxima (potencial equivalente) para las tres primeras categorías	45
7.4.	Mapa de estaciones meteorológicas para el 20 de mayo de 1962	46
7.5.	Comparación de temperatura potencial a nivel del mar obtenida mediante interpolación bilineal con y sin filtro espacial.	46
7.6.	Diagrama de flujo del proceso realizado para la generación de las mallas de temperatura máxima y mínima para un año en particular.	48
8.1.	Temperatura máxima, media y mínima promedio por mes en la ZMVM considerando 61 años de datos.	50
8.2.	De izquierda a derecha, climatología de temperatura máxima, media y mínima anual de la ZCM para el periodo 1961-2021.	50
8.3.	Climatología de temperatura máxima (fila 1), media (fila 2) y mínima (fila 3) por mes de la ZCM para el periodo 1961-2021.	51
8.4.	Climatología de temperatura máxima, media y mínima por alcaldía.	52
8.5.	Serie de tiempo de la temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM 1961-2021.	53
8.6.	Anomalías de temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM referidas a la climatología 1961-2021.	54
8.7.	Series de tiempo de la temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM por cobertura 1961-2021.	56
8.8.	Tendencia anual de la temperatura máxima, media y mínima en la ZCM.	57
8.9.	Tendencia anual de la temperatura máxima, media y mínima por alcaldía.	58
8.10.	Incrementos de la temperatura máxima, media y mínima en la ZMVM.	59
8.11.	Incrementos de la temperatura máxima, media y mínima a nivel alcaldía.	59
8.12.	Anomalías de temperatura máxima, media y mínima por década en la ZCM.	61
8.13.	Anomalías de temperatura máxima, media y mínima por década nivel alcaldías.	62
8.14.	Anomalías y temperaturas promedio por década.	63
8.15.	Percentil 10 y 90 de temperatura máxima, media y mínima en la ZCM.	65
8.16.	Percentiles 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 y 99 promedio de temperatura máxima, media y mínima por mes en la ZMVM.	66
8.17.	Variación estacional de rango diurno en la ZMVM.	68
8.18.	Mapas de variación estacional de rango diurno en la ZCM.	69
8.19.	Variación interanual del rango diurno en la ZMVM.	71
8.20.	Número de días cálidos promedio por mes en la ZMVM 1961-2021.	73

8.21. Número e intensidad de días cálidos promedio anual 1961-2021.	74
8.22. Mapas de días cálidos anuales promedio por década en la ZCM.	75
8.23. Número de noches frías promedio por mes en la ZMVM 1961-2021.	77
8.24. Número de noches frías promedio anual en la ZMVM 1961-2021.	78
8.25. Mapas de noches frías anuales promedio por década en la ZCM.	79
8.26. Número de heladas promedio por estación en la ZMVM 1961-2021.	81
8.27. Número de heladas promedio anual en la ZMVM 1961-2021.	82
8.28. Mapas de heladas anuales promedio por década en la ZCM.	83
8.29. Mapas de heladas por estación promedio por década en la ZCM.	84

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

De acuerdo con el reporte del sexto ciclo de evaluación (AR6 por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC (2023), las actividades humanas, principalmente las emisiones de gases de efecto invernadero¹ (GEI), son responsables del calentamiento global. En el período 2001-2020 se observó un incremento de la temperatura global de la superficie de 0.99°C respecto a la temperatura promedio del periodo 1850-1900.

Es probable que regiones con mayor superficie continental ya hayan experimentado incrementos mayores al promedio global, mientras que las regiones oceánicas experimenten menor calentamiento. Estas diferencias de incrementos respecto al promedio global generan distintos impactos importantes en cada región, por lo que cada vez es más necesario realizar estudios climatológicos regionales.

De acuerdo con Estrada et al. (2023), en México la temperatura media del aire ha aumentado alrededor de 1.69°C con respecto a inicios del siglo XX, 0.46°C más que el incremento promedio global, por lo que para las próximas décadas se espera en México un calentamiento más rápido comparado con el promedio global.

Específicamente en México, el incremento de la temperatura es espacialmente heterogéneo, por ejemplo, se observan regiones al norte y sureste del país con mayor incremento comparado con el promedio del país (Estrada et al. 2023).

El incremento heterogéneo de la temperatura en México resalta la importancia de realizar estudios a una escala geográfica más grande, enfocados en regiones específicas como la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Particularmente, la ZMVM es de gran importancia debido a que en ella habitan más de 20 millones de personas, además de sus características económicas, sociales, ambientales, políticas y culturales, las cuales se ven manifestadas en la rápida y muy dinámica vida diaria.

En las últimas décadas la población se ha incrementado de manera importante, dando como resultado un crecimiento desordenado de las zonas urbanas y ocasionando cambios en el clima de la región.

¹El dióxido de carbono CO_2 , el metano CH_4 y el óxido nitroso N_2O son considerados los principales GEI.

Estos cambios son a costa de modificaciones en la atmósfera, uso de suelo (principalmente las áreas naturales), espacios públicos, transporte, entornos alimentarios y en general, la calidad de vida de los habitantes (incluyendo la flora y la fauna).

Identificar y analizar los cambios y tendencias de la temperatura son los primeros pasos para garantizar un futuro sostenible con base científica, cuando se dedica tiempo y esfuerzos para estudiar la temperatura, se dedica tiempo a salvaguardar todas las formas de vida.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Caracterizar la variabilidad de la temperatura del aire en la ZMVM durante el periodo 1961-2021 utilizando registros de temperatura máxima y mínima de las distintas redes de estaciones meteorológicas generando mallas de temperatura diaria.

1.2.2. Objetivos particulares

1. Implementar una metodología para el desarrollo de mallas diarias.
2. Determinar la climatología anual y mensual de la temperatura máxima, media y mínima para el periodo 1961-2021.
3. Determinar los percentiles 1, 25, 50, 75, 90, 95 y 99 de las distintas temperaturas.
4. Determinar el rango diurno, sus variaciones mensuales y anuales promedio.
5. Determinar y analizar la variabilidad climática interanual, estacional e intraestacional de las distintas temperaturas.
6. Determinar y analizar las tendencias e incrementos anuales y por década de las distintas temperaturas.
7. Determinar los días cálidos, noches frías y heladas (por mes y por tipo de helada), así como su variación en el tiempo.

Capítulo 2

Generalidades del clima y la atmósfera

2.1. Clima y tiempo atmosférico

“Que loco está el clima”, “el pronóstico del clima de hoy es . . .” y “¿Alexa, cuál será el clima de hoy?”, son únicamente algunos ejemplos que demuestran que en México se utiliza de manera cotidiana la palabra clima para referirnos al estado actual de la atmósfera que percibimos, sin embargo, esto es un error, la palabra correcta que debemos emplear es *tiempo atmosférico*.

El tiempo atmosférico¹ se refiere al estado actual de la atmósfera que se puede percibir en un lugar particular en un periodo corto de tiempo, como por ejemplo minutos, horas, días y semanas. El tiempo atmosférico es resultado de la interacción de los eventos que ocurren día con día en la atmósfera, principalmente en la atmósfera baja conocida como tropósfera. A pesar de que se trata de la misma atmósfera en todo el planeta, en un lugar y tiempo dado se pueden percibir distintos tiempos atmosféricos que varían según la posición geográfica (Lutgens, Tarbuck y Herman 2018).

El clima² se refiere al estado de la atmósfera que se puede percibir en un lugar particular en un periodo largo de tiempo como por ejemplo meses hasta millones de años. En otras palabras el clima son las condiciones promedio del tiempo atmosférico de un lugar y periodo de tiempo particular.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) considera al clima como las condiciones promedios del tiempo atmosférico usando un periodo de 30 años, a los promedios de las distintas variables atmosféricas considerando como periodo 30 años, se les conoce como normales climáticas (NCEI 2018).

Conocer el clima de una región permite tener expectativas de las condiciones de una región, es decir, si se esperan altas o bajas temperaturas, si habrá precipitación con determinada intensidad o no, mucha o poca nubosidad, etc. Sin embargo, el clima no brinda detalles de las condiciones atmosféricas que se tendrán en un día en particular.

¹Weather, en inglés.

²Climate, en inglés.

Una frase muy común en la comunidad de las ciencias atmosféricas que sintetiza la diferencia entre clima y tiempo atmosférico es, “*Clima es lo que esperas, pero tiempo atmosférico es lo que obtienes*”.

La figura 2.1 ilustra la diferencia entre el clima y el tiempo atmosférico. El clima es representado mediante la temperatura máxima promedio por mes en la ZMVM considerando 61 años como base y el tiempo atmosférico mediante la temperatura máxima diaria del año 1970.

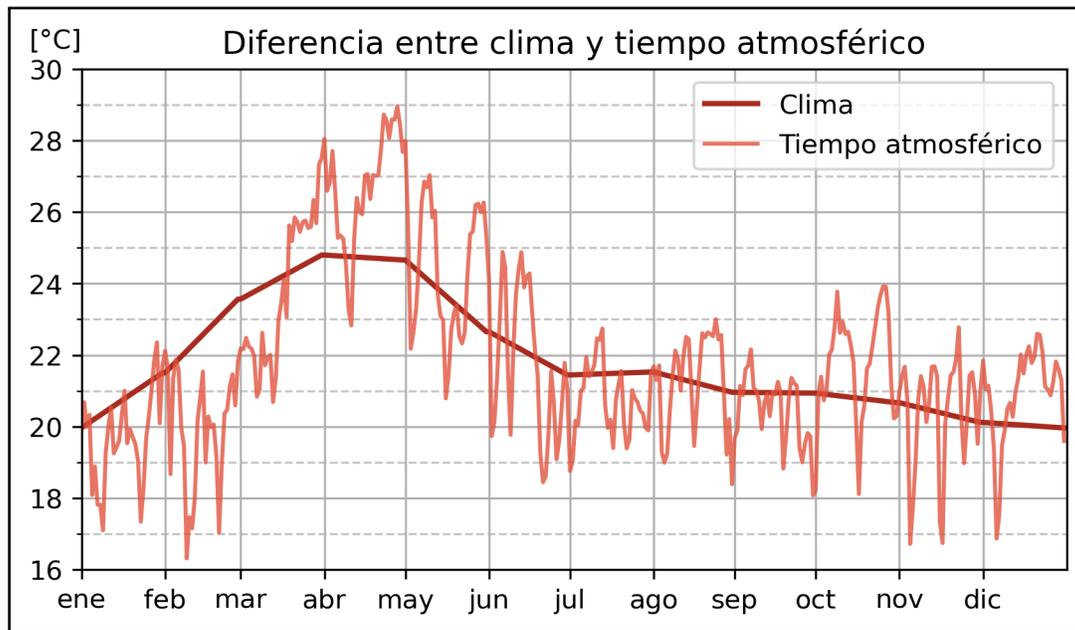


Figura 2.1: Clima y tiempo atmosférico representado gráficamente. El clima se representa por el promedio de la temperatura máxima considerando 61 años y el tiempo atmosférico por la temperatura máxima diaria de 1970.

2.2. La atmósfera, su definición y composición

La atmósfera es una capa de gases bien mezclados y sólidos suspendidos (en algunas de sus partes), relativamente delgada,³ que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta varios kilómetros de altura. Su composición suele presentarse distinguiendo entre aquellos componentes variables y no variables.

Los dos principales componentes no variables son el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2), juntos representan poco más del 99% del volumen de gases que componen la atmósfera, aportando el 78.084% y el 20.946% respectivamente. El resto de los componentes no variables representan en conjunto menos del 1% del volumen de los gases, la figura 2.2 muestra los componentes variables y no variables.

Existen varios gases y partículas que varían espacial y temporalmente. A pesar de que representan un porcentaje muy bajo en la atmósfera, estos pueden generar cambios de ma-

³Comparada con el radio de la Tierra

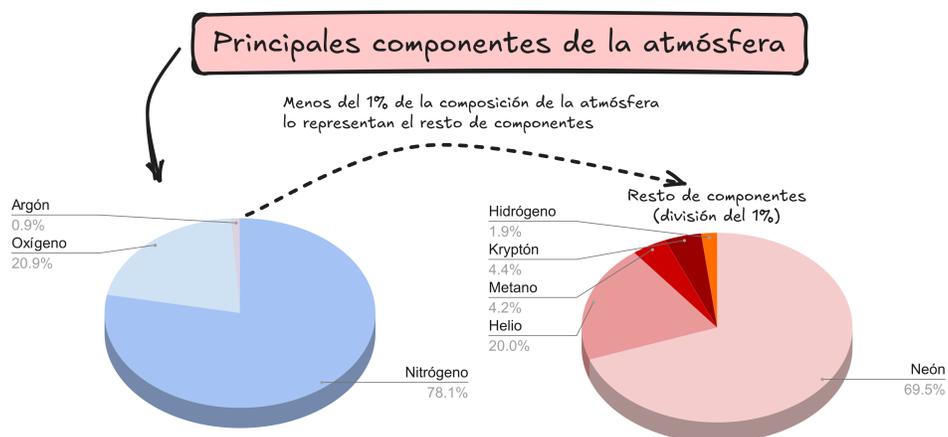


Figura 2.2: Principales componentes de la atmósfera. Reconstruida de Lutgens, Tarbuck y Herman (2018).

nera significativa en el clima y el tiempo atmosférico, a continuación se describen algunos componentes variables destacables.

■ Dióxido de carbono (CO_2)

Considerado como un gas de efecto invernadero debido a que absorbe la energía de onda larga radiante de la superficie terrestre y la reemite principalmente a la misma. A pesar de que el porcentaje de volumen presente en la atmósfera es muy pequeño (0.04 %) y de que se distribuye de manera uniforme tanto vertical como horizontalmente, el estudio de su concentración es muy importante debido a que, desde el comienzo de la era industrial, las actividades humanas han aumentado el CO_2 en un 50 %. La figura 2.3 generada por la NASA (2023a) muestra la concentración de CO_2 durante los últimos tres ciclos glaciales de la Tierra donde se observa el incremento de CO_2 de manera desproporcionada respecto a los miles de años anteriores.

■ Vapor de agua

También considerado un gas de efecto invernadero, con la diferencia de que también puede enfriar la atmósfera cuando ocurren procesos de condensación y formación de nubes. El vapor de agua suele representarse a través de la humedad relativa, que es la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. El vapor de agua es la segunda fuente de calor de la superficie terrestre (después de la energía del Sol) y participa en procesos importantes como el transporte vertical de energía.

La figura 2.4 generada por el observatorio de la Tierra de la NASA (2023b) muestra el vapor de agua en septiembre del 2020 a nivel mundial, su distribución espacial forma una franja horizontal alrededor del ecuador conocida como la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ por sus siglas en inglés).

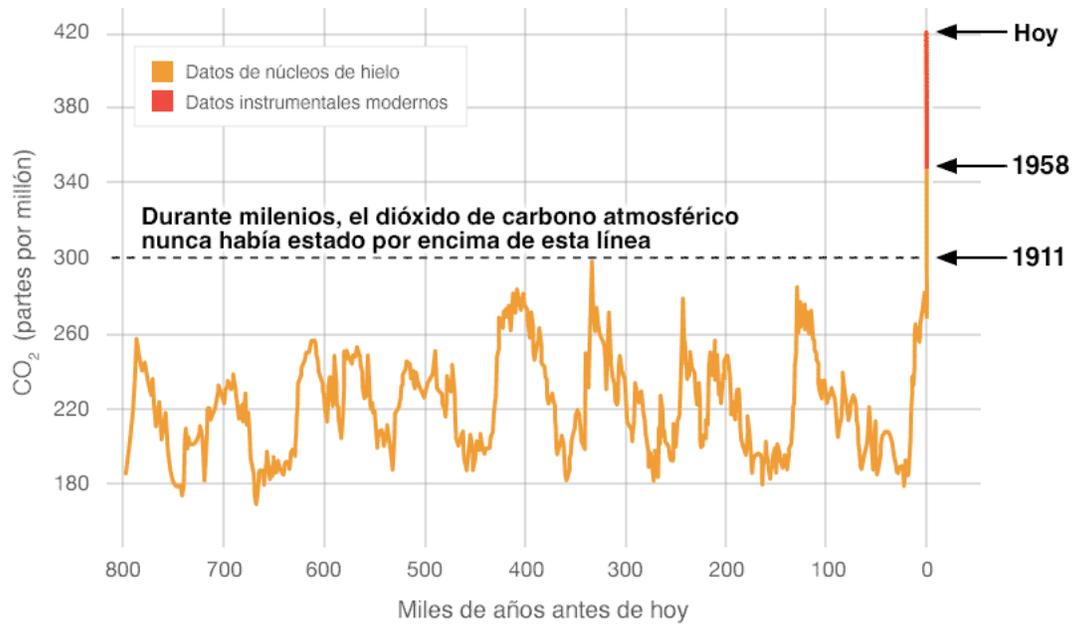


Figura 2.3: Concentración de CO_2 en los últimos tres ciclos glaciales.

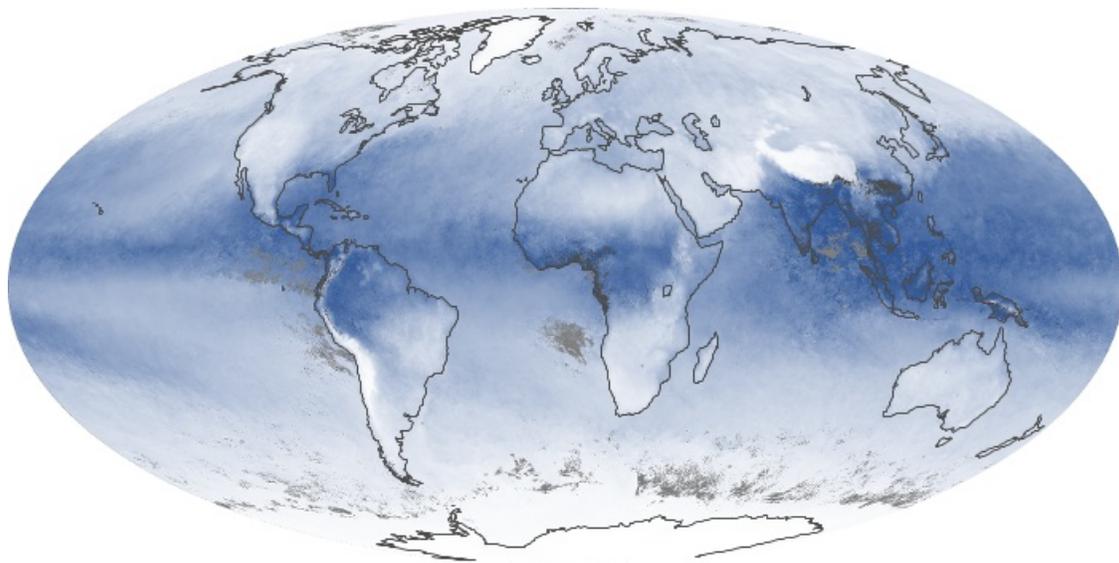


Figura 2.4: Vapor de agua en septiembre del 2020 a nivel mundial.

■ Aerosoles

Los aerosoles son partículas muy pequeñas suspendidas en la atmósfera, su tamaño va desde unas decenas de nanómetros (menos que la anchura de los virus más pequeños), hasta varias decenas de micrómetros (aproximadamente el diámetro de un cabello humano). El tiempo que se encuentran suspendidos en la atmósfera depende principalmente del tamaño de las partículas y la altura a la cual fueron emitidas a la atmósfera, normalmente para aerosoles finos emitidos cerca de la superficie, el tiempo de vida es de varios días, cuando son emitidos arriba de la tropósfera el tiempo de vida

incrementa a semanas o meses, pueden llegar a permanecer años cuando son emitidos en la estratósfera (por ejemplo el sulfato volcánico).

Algunos ejemplos de aerosoles son el polvo del desierto del Sahara que atraviesa el Océano Atlántico y fertiliza el suelo amazónico, el rocío del mar compuesto principalmente por sal marina y materia orgánica, la biomasa quemada (smoke) producto de incendios forestales naturales o antropogénicos y aerosoles de origen industrial como los sulfatos, nitratos y carbón negro (Chen, Howl y Sidel 2015).

La figura 2.5 muestra una tormenta de arena sobre Baja California Sur que se desplazada hacia el Océano Pacífico. La imagen fue capturada desde el satélite MODIS Aqua.

MODIS Aqua, 27 Nov 2011 20:50 UTC

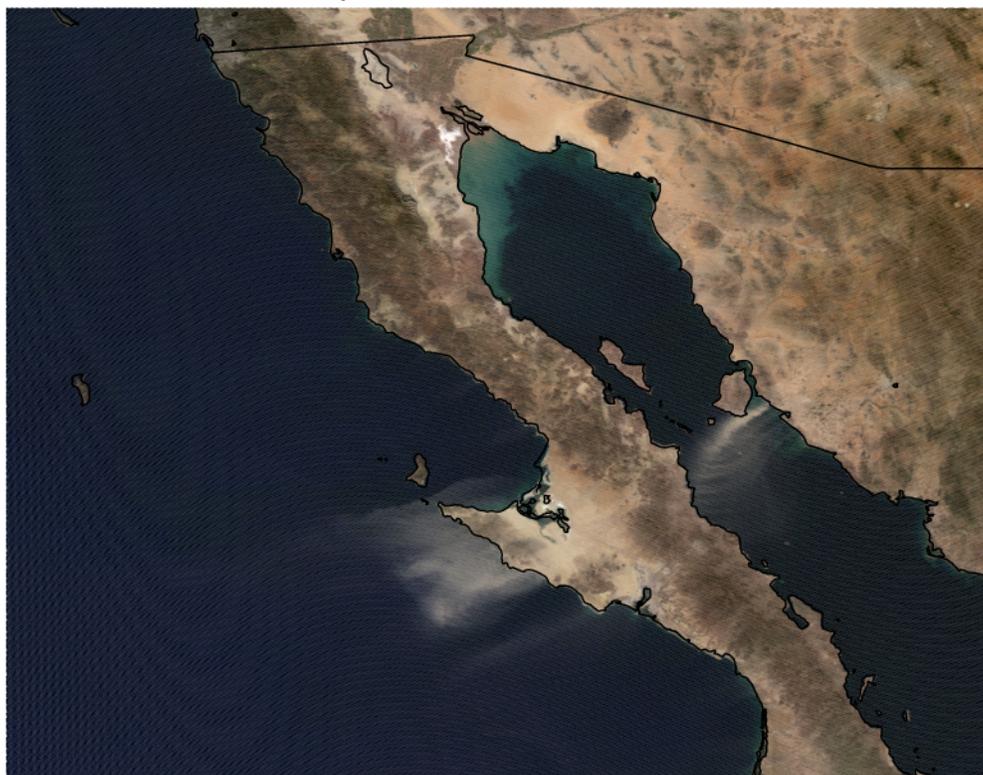


Figura 2.5: Tormenta de arena sobre Baja California Sur, México. Origen:(Chen, Howl y Sidel 2015) .

2.3. Presión atmosférica

Una de las variables termodinámicas fundamentales de la atmósfera es la presión. La presión atmosférica se define como la fuerza por unidad de área sobre una superficie ejercida por el peso de las moléculas del aire situadas encima de la superficie, a mayor número de

moléculas, mayor presión, menor número de moléculas, menor presión (Wallace y Hobbs 2006).

El instrumento que mide la presión atmosférica se denomina barómetro y en meteorología se suele utilizar la unidad de milibares, sin embargo existen otras unidades como las pulgadas de mercurio (Hg), atmósfera (atm) y kilopascales (kPa).

Una atmósfera equivale a la fuerza en promedio ejercida sobre una superficie a nivel del mar.

$$29.92''Hg = 1.0 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa} = 1013.25 \text{ mb} \quad (2.1)$$

La figura 2.6 obtenida de Lutgens, Tarbuck y Herman (2018) muestra que los cambios de la presión respecto a la altura no es constante, decrementa rápidamente cerca de la superficie y de manera gradual a mayor altitud.

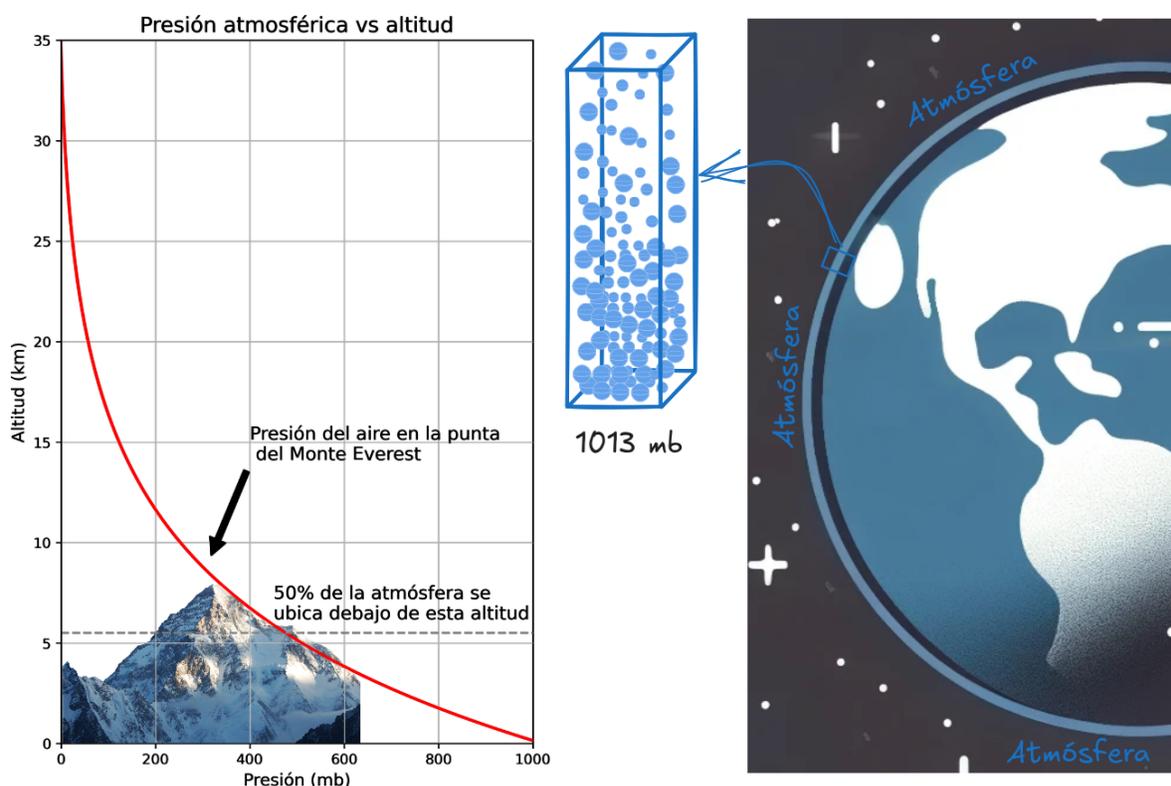


Figura 2.6: Presión atmosférica representada gráficamente y su variación respecto la altitud. El prisma rectangular representa la distribución de los gases en una sección de la atmósfera. La mayor cantidad de gases se concentran en la parte baja de la atmósfera.

2.4. Estructura vertical de la atmósfera

Tradicionalmente la atmósfera suele dividirse en 4 capas horizontales utilizando como límite los cambios verticales de temperatura. A continuación se describe brevemente cada

una de ellas.

1. Tropósfera

Es la capa inferior de la atmósfera donde suelen ocurrir la mayoría de los fenómenos meteorológicos debido a que contiene el 75 % de la masa atmosférica y prácticamente la totalidad del vapor de agua, CO_2 y aerosoles. Su altura no es constante, varía en el espacio y tiempo, en general, en el ecuador es de 16 km y 8 km en los polos.

Gracias a los datos de las radiosondas⁴ lanzadas a la atmósfera, se sabe que en general la tasa de cambio (lapse rate) de la temperatura respecto a la altura es de $6.5\text{ }^\circ\text{C km}^{-1}$, a esta tasa de cambio se le conoce como **environmental lapse rate**. Es importante destacar que al igual que la altura de la tropósfera, la tasa de cambio no es constante y varía en espacio y tiempo, sin embargo, sí es representativa de los cambios de temperatura en la tropósfera.

2. Estratósfera

En la estratósfera ocurre la primera inversión térmica de la atmósfera, es decir, la temperatura incrementa con la altura, contrario a lo que ocurre en la tropósfera. Esta se extiende desde la tropopausa y continúa hasta la estratopausa (a aproximadamente 50 km de la superficie terrestre). En esta capa se concentra el ozono atmosférico responsable de absorber el componente ultravioleta de la radiación solar.

3. Mesósfera

En la mesósfera se presenta la temperatura más baja de la atmósfera, aproximadamente $-90\text{ }^\circ\text{C}$ a los 90 km de la superficie terrestre. Esta se extiende desde la estratopausa hasta la mesopausa disminuyendo la temperatura provocando mezcla vertical.

4. Termósfera

Comienza desde la mesopausa sin tener bien definido su límite superior. A pesar de que la termósfera contiene solo una pequeña fracción de la masa de la atmósfera, se estiman temperaturas mayores a $1000\text{ }^\circ\text{C}$ debido a que los gases de la termósfera se mueven a velocidades muy altas⁵. Si bien la temperatura es muy alta, esta tiene una cantidad insignificante de energía térmica, por lo que la temperatura en superficie no es equiparable con la temperatura en la termósfera.

Las temperaturas altas se deben a la absorción de radiación solar en asociación con la disociación de moléculas diatómicas de nitrógeno y oxígeno y la extracción de electrones de átomos. A estos procesos se les denomina fotodisociación y fotoionización.

⁴Instrumentos capaces de medir perfiles verticales de variables atmosféricas como la temperatura a alta frecuencia temporal.

⁵La temperatura estimada en la termósfera es obtenida a partir de la velocidad promedio a la que se mueven las moléculas.

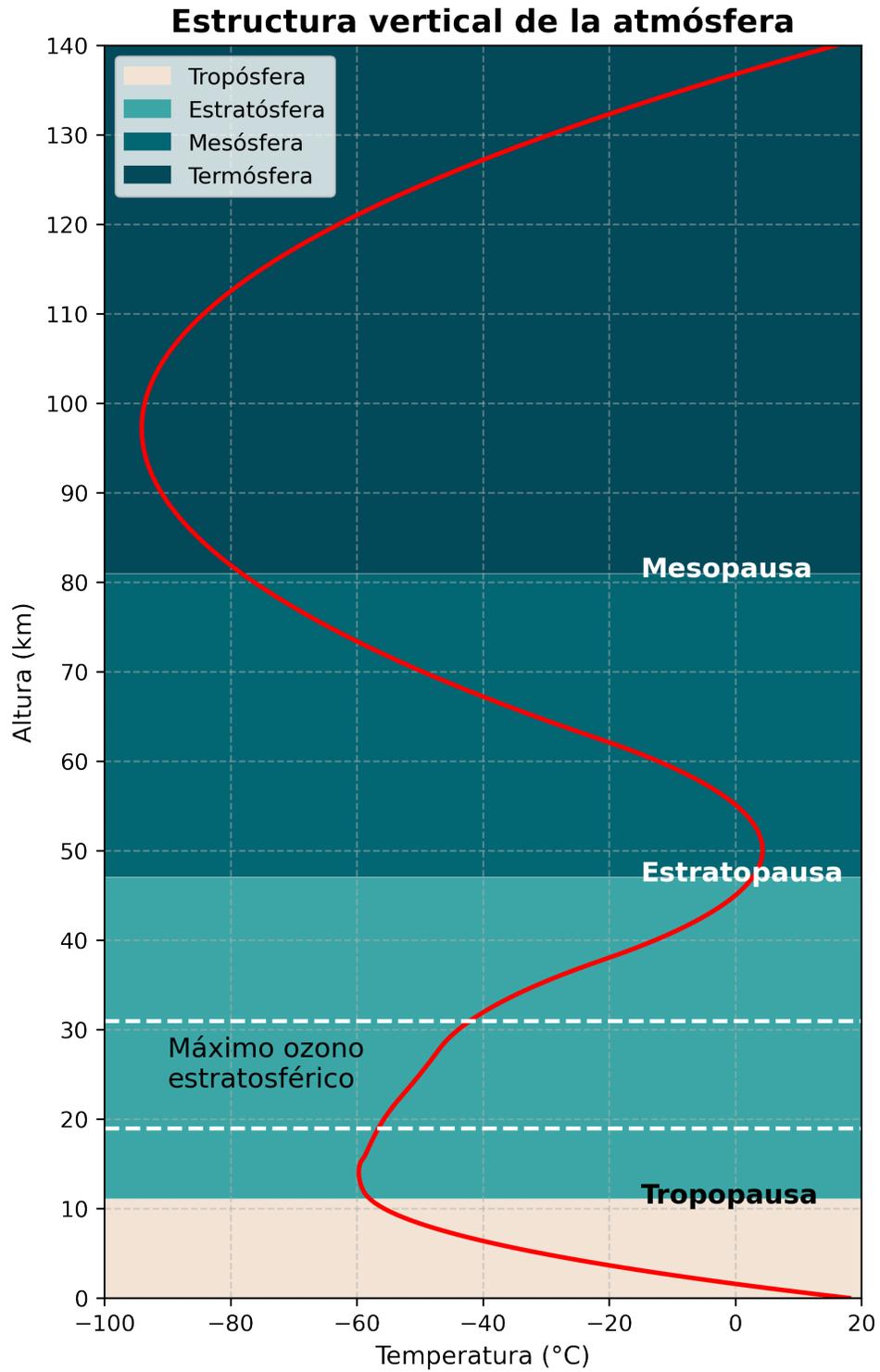


Figura 2.7: Estructura vertical de la atmósfera. La línea roja representa la temperatura en las distintas capas de la atmósfera. Reconstruida de Lutgens, Tarbuck y Herman (2018).

Capítulo 3

La temperatura

3.1. Definición

La temperatura es una de las variables termodinámicas fundamentales de la atmósfera. En la vida cotidiana nos referimos a ella para indicar que tan caliente o frío es un objeto respecto a una unidad de medida, formalmente la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos o moléculas en una sustancia. Cuando una sustancia es calentada, sus moléculas y átomos se mueven más rápido, por lo tanto su temperatura se incrementa, en contraste, cuando una sustancia es enfriada, los átomos y moléculas se mueven más lento y su temperatura disminuye (Lutgens, Tarbuck y Herman 2018).

En meteorología se suele medir principalmente la temperatura del aire (a diversas alturas), la temperatura de las distintas superficies terrestres y la temperatura del agua dulce y del mar. La OMM (2018a) define la temperatura del aire como la temperatura leída en un termómetro expuesto al aire, protegido de la radiación solar directa. Esta definición es aceptada y resulta práctica para fines meteorológicos.

3.2. Variaciones de la temperatura

Todo ser vivo ha experimentado las variaciones de la temperatura que se presentan diariamente, estacionalmente e incluso horariamente, además de la variación espacial determinada por varios factores que serán descritos más adelante. A continuación se describen las principales variaciones temporales de la temperatura.

3.2.1. Ciclo diario de la temperatura

El principal determinante de la temperatura a lo largo de un día es la rotación de la Tierra, conforme el ángulo solar respecto a la superficie incrementa a lo largo de la mañana, la intensidad de la radiación solar incrementa hasta alcanzar su valor máximo para posteriormente disminuir gradualmente hasta el atardecer. El resultado de este ciclo es el día y la noche.

Por lo tanto, cada 24 horas se presenta una **temperatura máxima**, **mínima** y una temperatura **media** que se calcula promediando la máxima y la mínima diaria.

La ocurrencia temporal de la temperatura máxima y mínima está determinada por la advección horizontal ($\vec{u} \cdot \nabla T$), la intensidad de radiación solar entrante (Q_s), la energía asociada a la evaporación (Q_e), la convección (Q_c), la radiación de la Tierra (Q_T), la densidad (ρ) y el calor específico del aire a presión constante (C_p).

La ecuación 3.1 muestra la variación de la temperatura respecto al tiempo. Esta ecuación es una forma de la ecuación de balance de energía.

$$\frac{dT}{dt} = -\vec{u} \cdot \nabla T + \frac{Q_s + Q_e + Q_c + Q_r}{\rho C_p} \quad (3.1)$$

La figura 3.1 muestra la curva de intensidad de la radiación solar entrante y la radiación de la Tierra y la curva de la temperatura resultante. La máxima intensidad de radiación solar entrante y de radiación de la Tierra no coincide temporalmente, por lo que existen momentos donde la radiación recibida es mayor a la pérdida y por lo tanto la temperatura continúa incrementando hasta que ocurre lo contrario, cuando la radiación recibida es menor a la pérdida la temperatura empieza a disminuir.

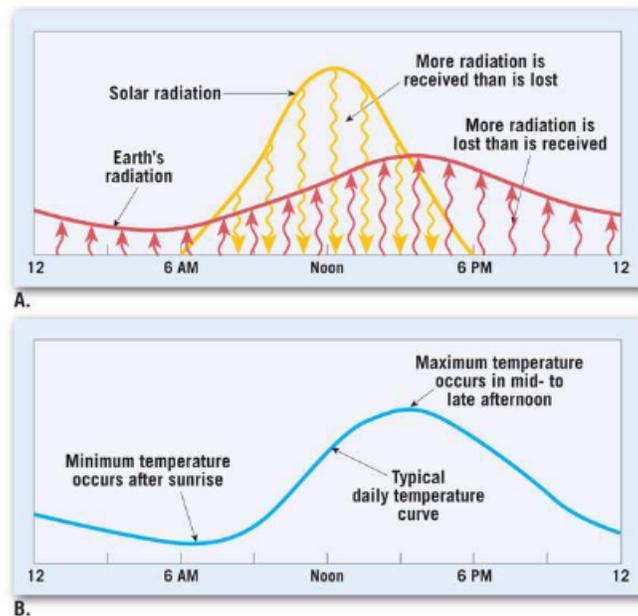


Figura 3.1: Variación diaria de la radiación solar entrante y la radiación de la Tierra para un sitio ubicado en latitud media en un equinoccio (A). Curva típica resultante (B).

Origen:(Lutgens, Tarbuck y Herman 2018).

A partir de la temperatura máxima y mínima diaria se puede determinar el **rango diurno** de un lugar en particular. El rango diurno es la diferencia entre la temperatura máxima y mínima, representa la magnitud de la variación de la temperatura o en otras palabras, el número de grados que varía la temperatura en un lugar. Por ejemplo, regiones como el norte de México donde se presentan temperaturas muy bajas durante el amanecer y muy altas durante el día tienen un rango diurno grande.

3.2.2. Ciclo estacional de la temperatura

Sin importar la ubicación geográfica y demás factores, todos los años se experimentan temperaturas altas y bajas (relativas a cada lugar) en periodos determinados de tiempo denominados estaciones. Cada estación se caracteriza por presentar ciertas magnitudes esperadas de temperatura, altas en verano, bajas en invierno y un poco de ambas en las estaciones de transición (primavera y otoño).

El principal determinante de la temperatura a lo largo de un año es el número de horas de radiación al día, así como el ángulo que se forma entre la radiación solar incidente y la normal a la superficie terrestre. Este ángulo está determinado a su vez por la latitud, la rotación de la Tierra respecto a su propio eje y la traslación de la Tierra respecto al Sol.

Por una parte, la distancia entre el Sol y la Tierra es tan grande que la radiación solar llega de manera paralela a la eclíptica¹ y debido a la forma casi redonda de la Tierra, la radiación solar forma distintos ángulos para llegar a la superficie terrestre.

Asumiendo que la Tierra se encuentra en una posición tal que la superficie terrestre en el ecuador es perpendicular a la radiación solar, conforme aumentamos en latitud, el ángulo formado entre los rayos solares y la superficie terrestre es menor. Esto implica que la misma cantidad de radiación solar se distribuye sobre un área mayor a medida que aumentamos en latitud. Debido a que la intensidad de la radiación solar incidente por unidad de área es proporcional al coseno del ángulo de incidencia θ , es decir:

$$I = I_0 \cos \theta \quad (3.2)$$

Donde I_0 es la intensidad de la radiación solar incidente en la atmósfera y θ es el ángulo entre la radiación solar y la normal a la superficie terrestre. A mayores latitudes, el valor de θ aumenta, lo que hace que $\cos \theta$ disminuya y, por ende, la intensidad de la radiación solar por unidad de área en la superficie terrestre sea menor. La figura 3.2 muestra la diferencia de ángulos de acuerdo a la latitud.

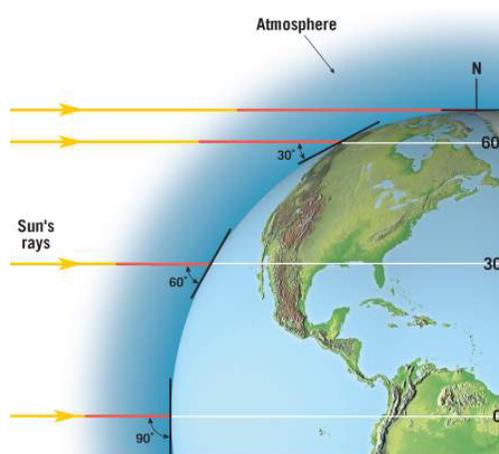


Figura 3.2: Variación del ángulo de incidencia de la radiación solar y la normal a la superficie terrestre respecto a la latitud. Origen:(Lutgens, Tarbuck y Herman 2018).

¹Eclíptica: Plano aparente de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, desde la perspectiva de un observador en la Tierra.

Por otra parte, la suposición antes mencionada no siempre es así, aquí es donde entra la rotación y traslación de la Tierra. La Tierra rota sobre su propio eje con un ángulo aproximado de 23.5° conservando su momento angular, lo que significa que el eje sobre el cual gira mantiene su posición durante el proceso de traslación, provocando que la superficie terrestre, cuya radiación solar es perpendicular, se desplace latitudinalmente y por lo tanto ciertas regiones de la Tierra tienen mayor intensidad de radiación solar en un determinado tiempo del año, marcando el inicio y fin de las estaciones.

A lo largo del año, existen dos momentos donde la radiación solar es perpendicular al ecuador, a estos momentos se les conoce como equinoccios, al momento cuando la radiación solar es perpendicular en el Trópico de Cáncer se le conoce solsticio de verano y al momento cuando la radiación solar es perpendicular en el Trópico de Capricornio se le conoce solsticio de invierno.

Los solsticios marcan el inicio del verano y el invierno, sin embargo, esto es válido solo en el hemisferio norte, en el hemisferio sur los solsticios se invierten. La figura 3.3 muestra la orientación de la Tierra respecto al Sol en los cuatro momentos antes descritos.

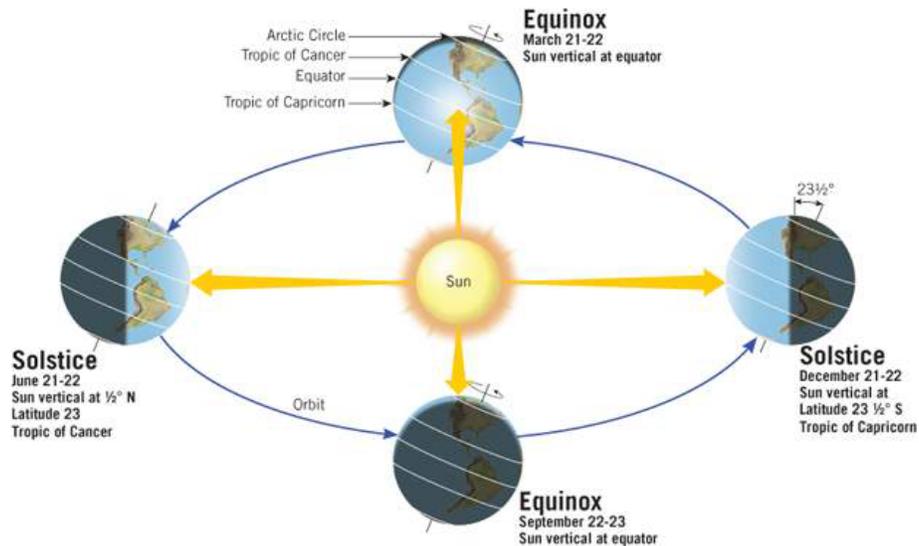


Figura 3.3: Orientación de la Tierra durante los equinoccios y solsticios. Origen:(Lutgens, Tarbuck y Herman 2018).

3.3. Factores que determinan la temperatura

Como se describió en la sección anterior, el principal determinante de la temperatura es la latitud, sin embargo, existen otros factores importantes para la determinación de la temperatura que a continuación se describen brevemente.

3.3.1. Altitud

La altitud es el segundo factor más importante para determinar la temperatura, incluso los cambios de temperatura son utilizados para determinar los límites en la estructura vertical

de la atmósfera (ver sección. 2.4). En la tropósfera baja la temperatura desciende de manera constante.

3.3.2. Distribución continental

La superficie terrestre, sin importar si se trata de cuerpos de agua, vegetación o zonas urbanas, determina en gran medida la temperatura del aire. Esta calienta el aire más cercano provocando el ascenso del aire caliente y el descenso del aire frío, a este proceso se le conoce como convección atmosférica (ver figura 3.4). La presencia de mares modifica la humedad de la atmósfera y por lo tanto su temperatura.



Figura 3.4: Diagrama de la convección atmosférica. El ascenso de aire ocurre mediante canales de baja presión mientras que el descenso en canales de alta presión. Origen: propio

3.3.3. Corrientes marinas

La circulación termohalina² tiene un efecto importante en el clima de algunas regiones. Un ejemplo de esto es la conocida contribución de la corriente del Atlántico Norte a la temperatura en el Reino Unido. La corriente del Atlántico Norte es una extensión de la cálida corriente del Golfo de México que mantiene las temperaturas en invierno más cálidas de lo que se esperaría para sus latitudes.

3.3.4. Dirección del viento

El efecto de las corrientes marinas puede ser desplazado por los vientos predominantes hacia el interior de las costas. Si los vientos predominantes soplan desde el océano hacia la

²Circulación oceánica global generada por diferencias en la densidad del agua en los océanos, debido a variaciones de temperatura o salinidad.

costa (costa de barlovento), se experimentan veranos más frescos e inviernos más suaves. Cuando los vientos predominantes soplan desde la costa hacia el océano (costa de sotavento), se experimenta un rango de temperatura anual más amplio.

3.3.5. Topografía

Las cadenas montañosas funcionan como barreras a los efectos de los vientos, además, el lado barlovento (desde arriba) de una montaña tiende a ser más fresco, mientras que el lado sotavento (ladera abajo) tiende a ser más cálido.

3.3.6. Cobertura nubosa

La dispersión de la radiación solar por parte de las nubes afecta por su puesto a la radiación solar incidente en la superficie y por lo tanto al calentamiento de la atmósfera. En las noches las nubes realizan el efecto opuesto, absorben la radiación que emite la Tierra y reflejan parte de esta a la superficie, por lo que la temperatura en la noche no decrece tan rápido como en un cielo despejado.

3.4. Eventos extremos de la temperatura

En la literatura existen distintas definiciones de lo que se considera un evento extremo, como por ejemplo se considera a un evento extremo cuando este no tiene precedentes o cuando un evento es raro en un lugar y tiempo del año en particular.

Para la determinación de los eventos extremos se suelen usar umbrales relativos o absolutos. Los umbrales relativos tienen la ventaja de no ser afectados por las diferencias de magnitudes que puede tener una región respecto a otra, haciendo que los eventos sean equiparables. Los umbrales absolutos suelen ser utilizados cuando se conoce la importancia (ambiental, económica, social, etc.) que tiene rebasar un valor determinado de temperatura. Por ejemplo, Jáuregui (2010) utilizó la magnitud de 30°C para la determinación de ondas de calor en la Ciudad de México porque es cuando la población sufre por el estrés causado por la temperatura.

En esta tesis se consideran umbrales relativos (excepto para las heladas) para la determinación de los eventos extremos de la temperatura tal y como lo hacen en el sexto reporte del IPCC descrito por Douville et al. (2023).

3.4.1. Días cálidos

Se considera un día cálido cuando la temperatura máxima de ese día es mayor al percentil 90 por día calendario de la temperatura máxima.

3.4.2. Noches frías

Se considera una noche fría cuando la temperatura mínima de un día en particular es menor al percentil 10 por día calendario de la temperatura mínima.

3.4.3. Heladas

Se considera que se presentó una helada cuando la temperatura mínima de un día en particular es menor a 0°C.

Las heladas pueden ser clasificadas según el periodo de ocurrencia. Cuando ocurren antes del invierno (otoño), se consideran tempranas, cuando ocurren después del invierno (primavera) se consideran tardías.

3.5. Medición de la temperatura

3.5.1. Unidades de Medida

En termodinámica, la temperatura se expresa como diferencias respecto al cero absoluto (0 K), que es la temperatura a la cual las moléculas de cualquier sustancia carecen de energía térmica. Un Kelvin equivale a 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua, que por definición, el punto triple del agua se produce a 0.01 °C a una presión parcial de vapor de agua de 611.657 Pa exactamente.

Para fines meteorológicos la temperatura suele reportarse en grados Celsius (o centígrados). Para convertir grados Kelvin a Celsius se utiliza la siguiente ecuación

$$T [^{\circ}C] = T [K] - 273.15[K] \quad (3.3)$$

Los termómetros meteorológicos deben calibrarse con respecto a un patrón de laboratorio, y aplicarse las correcciones necesarias a las lecturas obtenidas.

3.5.2. Características de la medición

La temperatura del aire es particularmente sensible a la exposición, variando hasta uno o dos grados en pocos segundos, estas variaciones son debido por el estado del entorno, la vegetación, la presencia de edificios u otros objetos que reflejan o emiten radiación, la cobertura del suelo y las condiciones físicas del abrigo meteorológico que protege al sensor.

Un abrigo meteorológico (figura 3.5) protege al sensor de la precipitación y radiación solar, al mismo tiempo que permite la libre circulación de aire a su alrededor y evita daños accidentales a este. Su objetivo es lograr (idealmente mediante equilibrio térmico³) que la temperatura dentro de este sea prácticamente igual a la temperatura del aire.

Con el objetivo de obtener resultados representativos cuando se comparan las lecturas termométricas de lugares y momentos diferentes, la OMM (2018a) sugiere normalizar las condiciones de exposición del sensor de temperatura. Para lograr que la temperatura del aire observada sea representativa del estado del aire libre que rodea la estación en una zona lo más extensa posible, las condiciones que debe tener el abrigo meteorológico que contiene al sensor de temperatura deben ser las siguientes:

1. Ubicado a una altura de 1.25 a 2 m por encima del nivel del suelo.

³Cuando un termómetro se coloca en contacto físico con un objeto, alcanza la misma temperatura que el objeto, por lo que puede inferirse la temperatura del objeto a partir de la temperatura del propio termómetro.

2. El terreno donde se sitúe debe ser natural, preferiblemente sobre césped.
3. Ubicado en un suelo nivelado, con exposición directa al Sol y el viento, libre de la sombra de árboles, edificios u otros objetos.
4. Deberá estar diseñado para que rodee completamente el sensor.



Figura 3.5: Ejemplo de un abrigo meteorológico ubicado en el ICAyCC, UNAM.

3.5.3. Fuentes de error y recomendaciones

Algunos factores que generan errores en las mediciones de la temperatura son los siguientes:

- Radiación directa o indirecta de distintas fuentes como por ejemplo el Sol, las nubes, el suelo, etc.
- Incertidumbre del sensor.
- Ventilación insuficiente del abrigo meteorológico (velocidad del viento por debajo de 1 m s^{-1}), especialmente en condiciones de elevada radiación solar.
- Humedad en el abrigo meteorológico o sensor.
- Contaminación del sensor por polvo o brisa marina.

La tendencia a presentar errores debidos a las causas anteriores, así como su magnitud, depende del tipo de sensor de temperatura. Algunas recomendaciones generales para evitar errores son las siguientes:

- Los sensores y los lugares donde se almacenan deberán mantenerse limpios.
- Si se ventila de manera artificial un abrigo meteorológico, el estado del ventilador debe comprobarse periódicamente.
- Los sensores de temperatura y sus respectivas interfaces eléctricas deben calibrarse periódicamente.
- Se debe tener registro no solo de la temperatura, sino también de las condiciones físicas del sitio de posición (como marca del equipo, fecha de instalación, mantenimiento, etc.), incluso si es posible, un registro fotográfico.
- Si se utilizan convertidores de señales analógicas a digitales, deben someterse periódicamente a una prueba de resistencia óhmica para determinar si siguen cumpliendo con los requisitos.

3.6. Sensores de resistencia eléctrica

A nivel mundial los sensores de resistencia eléctrica son los más comunes para realizar mediciones de la temperatura del aire debido a su capacidad de proporcionar mediciones continuas que pueden ser transmitidas a distancia sin la necesidad de un operador en el sitio de la medición. Los sensores eléctricos empleados con mayor frecuencia son los termómetros de resistencia de platino debido a su gran resistencia a la corrosión, linealidad y estabilidad.

El platino ultrapuro y libre de tensiones se utiliza en los denominados termómetros patrón de resistencia de platino, utilizados para realizar calibraciones de acuerdo a determinadas normas en laboratorios metrológicos. Debido a la delicadeza de estos termómetros, los termómetros utilizados para las mediciones en campo son los denominados Pt100, sensores que usan platino ligeramente menos puro y más robusto, están diseñados para que su resistencia (R_0) a 0°C sea cercana a $100\ \Omega$.

Existen dos modelos comunes de sensores de platino Pt100, uno donde el sensor consta de alambres de platino enrollados alrededor de un núcleo cerámico y protegidos dentro de una cubierta cerámica, de vidrio o acero inoxidable. En el otro modelo se colocan películas delgadas de platino sobre un sustrato cerámico, dispuestas en forma de meandros encapsulados en acero inoxidable. La figura 3.6 muestra las dos distribuciones comunes de sensores de temperatura Pt100.

En el rango de la temperatura de interés meteorológico (-80°C a 60°C) existe una relación prácticamente lineal entre la resistencia eléctrica de la mayoría de los metales puros y la temperatura. La resistencia eléctrica puede expresarse mediante la ecuación de Callendar-van Dusen.

$$R = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3) \quad (3.4)$$

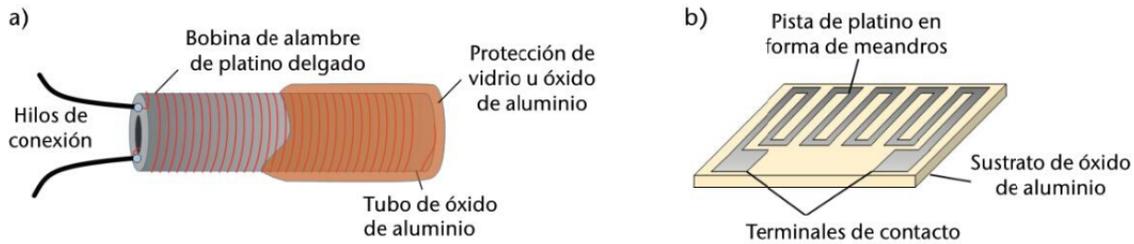


Figura 3.6: Termómetro de resistencia de platino de alambre embobinado (a) y de película delgada (b). Origen: (OMM 2018a)

Las constantes A, B y C dependen de la tolerancia con la cual se ajustan a distintas normas. La norma más común a la que se ajustan es la norma internacional IEC 60751⁴ de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés). Los coeficientes de Callendar-Van Dusen siguiendo la norma IEC 60751 son los siguientes:

- $R_0 = 100\Omega$
- $A = 3.908 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $B = -5.80 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
- Si la temperatura es menor a 0°C , $C = 4.27 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$, si la temperatura es mayor a 0°C , C es 0.

La figura 3.7 muestra la relación entre la resistencia y la temperatura.

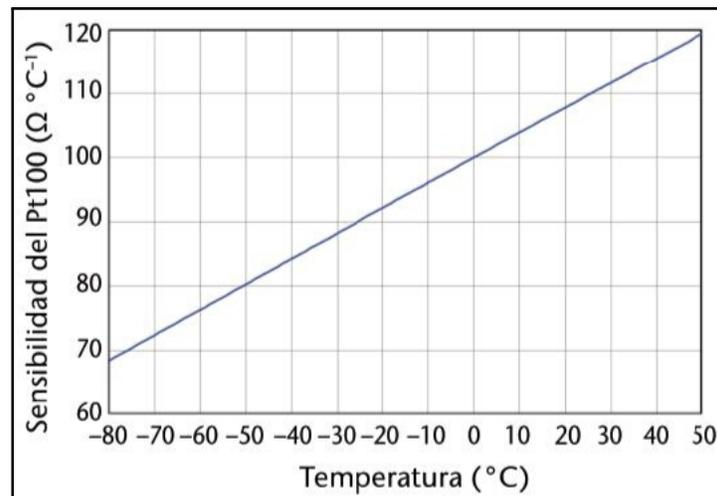


Figura 3.7: Correlación entre la temperatura y la resistencia eléctrica. Origen: (OMM 2018a).

⁴La norma IEC 60751 garantiza que los termómetros tengan una calidad constante y trazable cumpliendo siempre con los mismos valores de resistencia base y una curva de tolerancia definida.

Capítulo 4

Zonas Metropolitanas en México

De acuerdo con Jiménez et al. (2023), México es un país altamente urbanizado, en 2020 82.5 millones de personas (65.5 % del total de la población) habitaban en una metrópolis, de las 92 metrópolis del país, en tan solo 48 zonas metropolitanas se concentraban 67.6 millones de personas, siendo la Zona Metropolitana del Valle de México (desde ya varias décadas) la zona metropolitana con mayor población.¹

Las definiciones aquí presentadas son obtenidas del último estudio integral sobre zonas metropolitanas en México disponible a la fecha de la realización de esta tesis (2023), es posible que posterior a esta se modifiquen algunos de ellos. Es importante mencionar que este último estudio menciona que se debe sustituir el nombre de la Zona Metropolitana del Valle de México por Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCDMX) debido a que geográficamente no es un valle, sino una cuenca y además el origen de esta zona metropolitana se encuentra en la CDMX, nombre con el que se le alude en el artículo 122 de la constitución política mexicana.

Por cuestiones de factibilidad, en esta tesis se hace referencia a la ZMCDMX como ZMVM.

En este capítulo se define primero qué es una zona metropolitana y luego se describe la ZMVM.

4.1. Definición de zona metropolitana

De acuerdo con Jiménez et al. (2023) una metrópoli es el conjunto de municipios cuya extensión urbana puede rebasar sus límites político-administrativos, concentra 50 mil o más habitantes y tiene un alto grado de integración física o funcional. Las metrópolis se clasifican en tres categorías:

1. Zona Metropolitana

Conjunto de municipios cuya relación se basa en un alto grado de integración física o funcional intermunicipal o interestatal y la población total de los municipios que la

¹21.4 millones de habitantes.

conforman es de 200 mil habitantes o más. La localidad urbana o conurbación que da origen a la zona metropolitana cuenta con 100 mil habitantes o más.

2. **Metrópoli municipal**

Municipio que no forma parte de una zona metropolitana, sin embargo, cuenta con una población total de 300 mil habitantes o más y es económica o políticamente relevante para el estado. La localidad urbana que da origen a la metrópoli municipal cuenta con 200 mil habitantes o más.

3. **Zona conurbada**

Conjunto de municipios cuya relación se basa en un alto grado de integración física o funcional intermunicipal o interestatal. La localidad urbana o conurbación que da origen a la zona conurbada tiene entre 50 mil y 100 mil habitantes.

Los municipios que componen las metrópolis se clasifican en dos tipos:

■ **Municipios Centrales**

Son aquellos donde se ubica la localidad urbana o conurbación principal que da origen a una metrópoli.

■ **Municipios exteriores**

Son municipios contiguos a los centrales, cuyas localidades urbanas no están conurbadas a la centralidad de una metrópoli y mantienen un alto grado de integración física y laboral con los municipios centrales.

4.2. **La Zona Metropolitana del Valle de México**

4.2.1. **Composición**

La ZMVM está compuesta por las 16 alcaldías de la CDMX, 59 municipios del Estado de México (EDOMEX) y 1 municipio de Hidalgo. Es importante mencionar que en octubre del 2023 la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) realizó una reducción del número de municipios a la ZMVM, pasando de 76 municipios a 63 municipios. En esta tesis se consideraron los 76 municipios para determinar la ZMVM debido a que los resultados ya habían sido generados antes de ser publicada esta nueva composición de la ZMVM.

4.2.2. **Características geográficas**

La ZMVM (figura 4.1) se ubica en el eje neovolcánico, delimitada por las longitudes $99^{\circ}43'31''$ y $98^{\circ}32'52.8''$ Oeste; por las latitudes $18^{\circ}53'06''$ y $20^{\circ}08'32.63''$ Norte. Tiene una elevación promedio² de 2,542 msnm y una superficie³ de 18,236.8 km^2 .

²Elevación calculada con datos del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), resolución 30m.

³Superficie calculada con datos espaciales del Sistema Urbano Nacional (SUN) 2018.

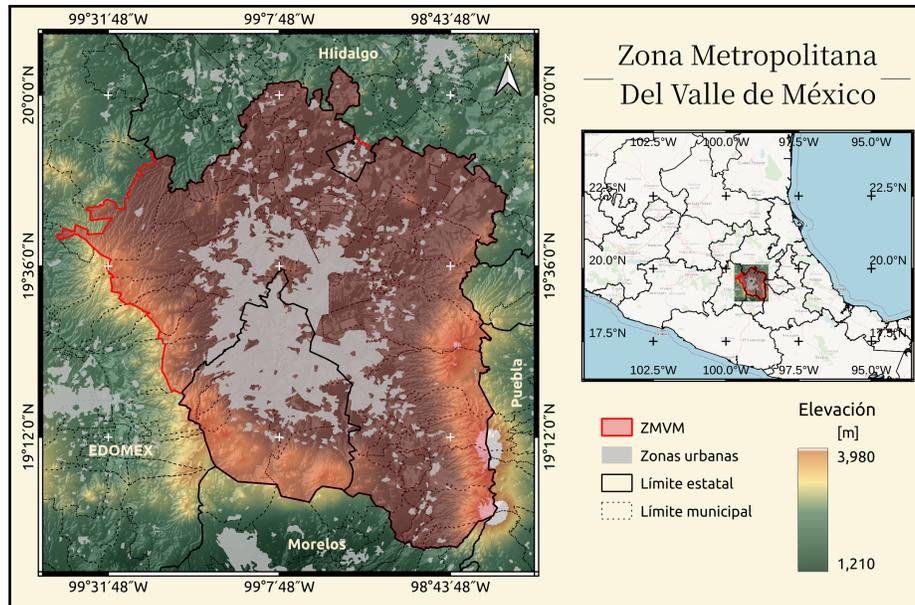


Figura 4.1: Zona Metropolitana del Valle de México.

4.2.3. El clima en la ZMVM

De acuerdo con Jáuregui (1973), en la temporada seca del año (octubre a abril) prevalecen los tipos de climas anticiclónicos asociados a condiciones secas y vientos ligeros. En invierno, las principales fluctuaciones de temperatura son producidas por las irrupciones frías polares. El paso frontal a veces es una discontinuidad de temperatura bastante aguda debido a la advección de aire frío.

Hill (1966) concluyó a partir de observaciones del periodo de noviembre de 1953 a abril de 1957, que el 75% de los frentes fríos duraron solo 12 horas y durante todo este tiempo ocurrió el 96% de todas las caídas de temperatura asociadas con el frente.

Durante la temporada de lluvias, la nubosidad y la precipitación están asociadas con la corriente de los Vientos Alisios del Este. La mayoría de la lluvia cae durante tormentas eléctricas asociadas con perturbaciones ondulatorias o con la presencia de una onda tropical u otra depresión tropical en las cercanías del océano Pacífico o del Golfo (o ambas). A mediados de la temporada de lluvias, la ITCZ puede desplazarse hacia el norte hasta Acapulco, produciendo tiempo ventoso en la CDMX. En otros momentos la lluvia es el resultado de convección y del relieve.

4.2.4. Coberturas

Desde 1978 el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) ha caracterizado las cubiertas vegetales y el uso del suelo a nivel nacional a distintas escalas temporales y espaciales, poniendo la información a la disposición del público a través de las Series de Uso del Suelo y Vegetación. La información de Uso del Suelo y Vegetación cuenta con siete series que son referencia del estado del suelo en diferentes periodos del tiempo.

De acuerdo con INEGI (2023), la serie I fue elaborada entre 1979 y 1991, la serie II entre

1993 y 1999, la serie III entre 2002 y 2005, la serie IV entre 2006 y 2010, la serie V entre 2011 y 2013, la serie VI entre 2014 y 2016 y la serie VII entre 2017 y 2021.

Las Series de Uso del Suelo y Vegetación son realizadas mediante el análisis de imágenes satelitales y su verificación en campo, en particular, la serie VII se realizó mediante interpretación analógica por medios digitales de imágenes Geomedianas del satélite LandSat TM8.

Las siete Series de Uso del Suelo y Vegetación son utilizadas en esta tesis como insumo para el filtro espacial que descarta estaciones espacialmente anómalas. La figura 4.2 muestra el periodo en el cual cada serie fue utilizada como referencia del estado de las cubiertas en la ZMVM.

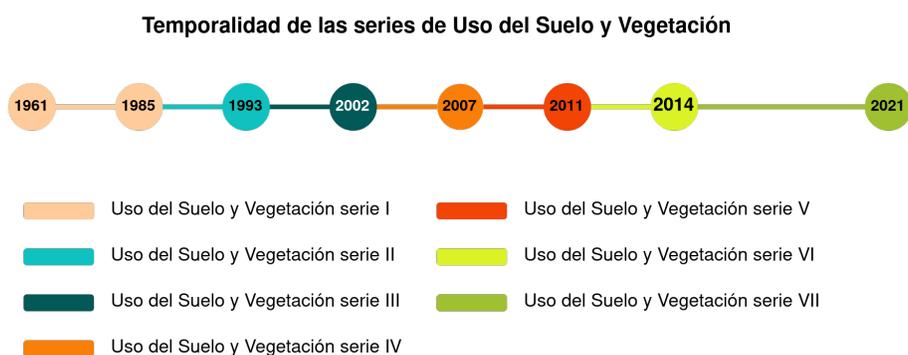


Figura 4.2: Distribución temporal de las series de Uso del Suelo y Vegetación para su uso en el filtro espacial.

El filtro espacial agrupa las estaciones meteorológicas según el tipo de cobertura (mayor detalle en la sección 7.3), sin embargo, no en todas las cubiertas existe una cantidad suficiente de estaciones, por lo que debido a la amplia variedad de usos de suelo y vegetación en la ZMVM, estas se agrupan en tres cubiertas representativas de la ZMVM. Estas cubiertas son vegetación, agricultura y zonas urbanas.

La tabla 4.1 muestra el criterio utilizado para el agrupamiento de las cubiertas de las series de Uso del Suelo y Vegetación, algunas cubiertas como las que representan los cuerpos de agua fueron descartadas debido a que no hay estaciones meteorológicas que se encuentren en este tipo de coberturas.

Clase	Criterio
Urbano	Todas aquellas coberturas cuyo nombre contenga la palabra “urbano” o “asentamiento”.
Vegetación	Todas aquellas coberturas cuyo nombre contenga la palabra “vegetación”, “matorral”, “pastizal”, “mezquital”, “bosque”.
Agricultura	Todas aquellas coberturas cuyo nombre contenga la palabra “agricultura”, “desprovisto”, “sin vegetación”.

Tabla 4.1: Criterios para el agrupamiento de las coberturas.

Capítulo 5

Técnicas matemáticas aplicadas espacialmente

5.1. Interpolación bilineal

En muchas áreas existe la necesidad de generar interpolaciones entre datos puntuales, en la meteorología es una técnica ampliamente utilizada para estimar las variaciones espaciales de una región representada por una malla regular.

De acuerdo con Amidror (2002), los métodos de interpolación de datos puntuales pueden ser clasificados en dos grandes grupos, métodos globales y locales. Los métodos globales consideran cada uno de los valores de un dataset para la interpolación, suelen ser limitado por datasets pequeños debido al esfuerzo computacional requerido, la modificación, eliminación o adición de un valor discreto modificará los valores interpolados en la malla completa.

Los métodos locales son capaces de manejar conjunto de datos grandes y son menos sensibles a las modificaciones de los datos pues el valor interpolado es determinado por los valores más cercanos del conjunto de datos.

La interpolación bilineal es un método de tipo local basado en la triangulación. El procedimiento utilizado en esta tesis se divide básicamente en dos pasos:

1. Creación de una triangulación de Delaunay.
2. Interpolación lineal en cada uno de los ejes en una malla regular utilizando la triangulación generada anteriormente.

5.1.1. Triangulación de Delaunay

Una triangulación es el resultado de unir con líneas (aristas) un conjunto de puntos, creando una figura convexa formada por triángulos adyacentes con vértices en los puntos del conjunto dado. Es posible generar diferentes triangulaciones con un mismo conjunto de puntos, la diferencia entre las triangulaciones serán sus propiedades como la cubierta convexa, el número de aristas, ángulo interno mínimo y máximo, etc.

De acuerdo con Heras (2020), una triangulación de Delaunay es aquella cuya circunferencia circunscrita de cada triángulo no contiene ningún vértice de la triangulación, esto hace que la figura resultante sea lo más simétrica posible. La figura 5.1 muestra una triangulación de un conjunto de puntos, destacando un triángulo que cumple y no la condición de Delaunay.

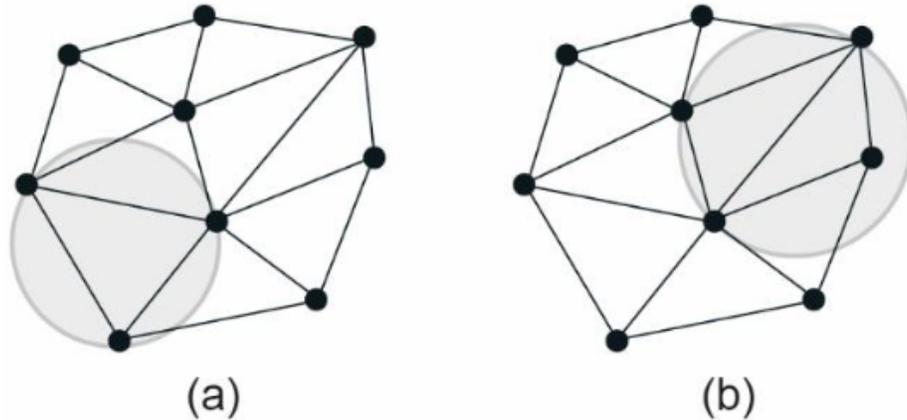


Figura 5.1: Triángulo que cumple y no cumple (a y b respectivamente) con la condición de Delaunay. Origen:(N. Romero y Barrón-Fernández 2016).

5.1.2. Esquema de interpolación bilineal

Para representar el esquema de interpolación que se aplica a la malla regular, se explicará el caso particular de un punto P dentro de uno de los triángulos de la triangulación de Delaunay.

Sean los puntos P_1 , P_2 y P_3 localizados en $P_1 = (x_1, y_1)$, $P_2 = (x_2, y_2)$ y $P_3 = (x_3, y_3)$ los vértices del triángulo localizado el plano x, y , y sean sus valores z_1 , z_2 y z_3 . El valor z de cualquier punto P localizado en $x = (x, y)$ dentro del triángulo puede ser estimado de la siguiente manera.

Supongamos que el plano definido por los tres puntos $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$ y $P_3(x_3, y_3, z_3)$ está dado por

$$z = ax + by + c \quad (5.1)$$

Insertando los valores x, y, z de cada uno de los tres puntos conocidos en la ecuación 5.1 obtenemos un sistema de ecuaciones lineales

$$\begin{aligned} z_1 &= ax_1 + by_1 + c \\ z_2 &= ax_2 + by_2 + c \\ z_3 &= ax_3 + by_3 + c \end{aligned} \quad (5.2)$$

Los coeficientes de la ecuación 5.1 pueden ser encontrados resolviendo el sistema de ecuaciones y por lo tanto el valor z para cualquier punto P localizado en $x = (x, y)$ dentro de este triángulo.

Los algoritmos de interpolación disponibles en los lenguajes de programación realizan interpolaciones de esta manera o mediante el esquema de coordenadas baricéntricas de un punto (otro esquema de resolución que en teoría da el mismo resultado que el sistema de ecuaciones) con la diferencia que se encuentran altamente optimizados para ser resueltos por una computadora, introduciendo conceptos más complejos que se salen del tema de esta tesis, se recomienda consultar De Berg (2000) y Kirkland (2010) si se requiere mayor información de estos algoritmos.

5.2. Filtros

Aislar o destacar determinadas magnitudes es una tarea frecuente en el procesamiento digital de imágenes. De acuerdo con Lillesand, Kiefer y Chipman (2015), los filtros espaciales, a diferencia de los filtros espectrales que permiten (o no) el paso de energía de un determinado rango espectral, estos enfatizan o atenúan los valores de una imagen de varias frecuencias espaciales. La frecuencia espacial se refiere al grado de rugosidad en una imagen, una imagen con mucha frecuencia espacial es totalmente rugosa, es decir, presenta cambios abruptos de magnitudes en áreas pequeñas de la imagen, al contrario, una imagen con poca frecuencia espacial presenta cambios graduales de magnitudes en áreas pequeñas de la imagen.

La figura 5.2 muestra una imagen del cráter de volcán Popocatepetl con diferente rugosidad.

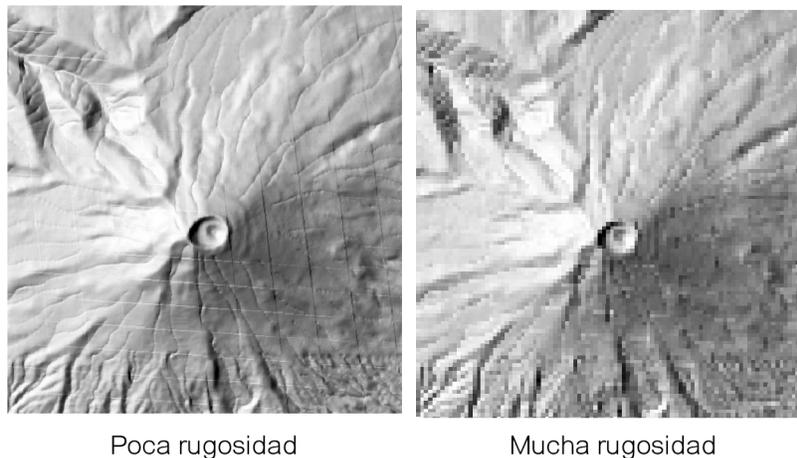


Figura 5.2: Comparación entre una imagen poca rugosa y muy rugosa.

5.2.1. Filtro pasa bajas y pasa altas

El filtro pasa bajas está diseñado para destacar las bajas frecuencias espaciales (crea un suavizado) y atenuar las altas frecuencias espaciales, al contrario, un filtro pasa altas destaca las altas frecuencias espaciales (crea mayor rugosidad) y atenúa las bajas frecuencias espaciales.

Los filtros pasa bajas y pasa altas espacialmente son aplicados mediante una operación matemática denominada convolución. La figura 5.3 muestra la diferencia entre aplicar un filtro pasa bajas y pasa altas a una imagen.



Figura 5.3: Comparación entre filtro pasa bajas y pasa altas aplicados a una imagen.

5.2.2. Convolución

El proceso de convolución se resume en los dos siguientes pasos:

1. Determinación de una matriz cuadrada de coeficientes o pesos. A esta matriz se le suele denominar kernel y por lo general su tamaño es de números nones, por ejemplo 3x3, 5x5 y 7x7.
2. Se ubica el kernel sobre la imagen original generando un nuevo valor de la celda central del kernel sumando el producto del coeficiente asignado en el kernel y el valor de la celda coincidente en la imagen original. Este proceso es realizado para cada pixel en la imagen original excepto en las celdas que conforman el borde de la imagen original debido a que estas celdas no cuentan con celdas completas a su alrededor para la aplicación del kernel. Existen algunas técnicas para trabajar las celdas de los bordes, pero debido a que el dominio de interés no se encuentra en los bordes, estos no resultan un problema. La figura 5.4 muestra el kernel utilizado en esta tesis y un ejemplo de la convolución.

5.3. Regresión lineal

De acuerdo con Canavos (1988), la regresión lineal es una técnica de inferencia estadística, es decir, permite determinar la existencia de una relación en un conjunto de n mediciones de una variable de respuesta Y , asociadas a una variable de predicción X , mediante la determinación de una ecuación (recta) que describa de manera razonable el comportamiento de la variable de respuesta dado los valores de la variable de predicción.

Kernel aplicado	Celda central 1	Celda central 2																																																
<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0.125</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.125</td><td>0.5</td><td>0.125</td></tr> <tr><td>0</td><td>0.125</td><td>0</td></tr> </table>	0	0.125	0	0.125	0.5	0.125	0	0.125	0	<table border="1"> <tr><td>19</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>50</td><td>36</td><td>10</td></tr> <tr><td>19</td><td>36</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>20</td><td>24</td><td>24</td><td>18</td></tr> </table>	19	15	16	10	15	50	36	10	19	36	20	15	20	24	24	18	<table border="1"> <tr><td>19</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>50</td><td>36</td><td>10</td></tr> <tr><td>19</td><td>36</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>20</td><td>24</td><td>24</td><td>18</td></tr> </table>	19	15	16	10	15	50	36	10	19	36	20	15	20	24	24	18							
0	0.125	0																																																
0.125	0.5	0.125																																																
0	0.125	0																																																
19	15	16	10																																															
15	50	36	10																																															
19	36	20	15																																															
20	24	24	18																																															
19	15	16	10																																															
15	50	36	10																																															
19	36	20	15																																															
20	24	24	18																																															
Celda central 3	Celda central 4	Matriz resultante																																																
<table border="1"> <tr><td>19</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>50</td><td>36</td><td>10</td></tr> <tr><td>19</td><td>36</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>20</td><td>24</td><td>24</td><td>18</td></tr> </table>	19	15	16	10	15	50	36	10	19	36	20	15	20	24	24	18	<table border="1"> <tr><td>19</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>50</td><td>36</td><td>10</td></tr> <tr><td>19</td><td>36</td><td>20</td><td>15</td></tr> <tr><td>20</td><td>24</td><td>24</td><td>18</td></tr> </table>	19	15	16	10	15	50	36	10	19	36	20	15	20	24	24	18	<table border="1"> <tr><td>19</td><td>15</td><td>16</td><td>10</td></tr> <tr><td>15</td><td>37.75</td><td>30</td><td>10</td></tr> <tr><td>19</td><td>32.12</td><td>23.87</td><td>15</td></tr> <tr><td>20</td><td>24</td><td>24</td><td>18</td></tr> </table>	19	15	16	10	15	37.75	30	10	19	32.12	23.87	15	20	24	24	18
19	15	16	10																																															
15	50	36	10																																															
19	36	20	15																																															
20	24	24	18																																															
19	15	16	10																																															
15	50	36	10																																															
19	36	20	15																																															
20	24	24	18																																															
19	15	16	10																																															
15	37.75	30	10																																															
19	32.12	23.87	15																																															
20	24	24	18																																															

Figura 5.4: Ejemplo de la convolución espacial. Los colores resaltados en cada matriz indican las celdas de influencia para el cálculo del valor central de este que es almacenado en la matriz resultante.

La regresión lineal solo demuestra si existe o no una relación entre la variable de respuesta y la de predicción, no establece una relación causa-efecto, la causalidad implica que un cambio en las x causará uno correspondiente en la variable de respuesta. Determinar una relación causa-efecto requiere un estudio rigurosamente controlado.

Un primer paso para analizar un conjunto de datos es su graficación, si este revela una tendencia lineal, se podrá suponer un modelo de regresión lineal. El segundo paso será obtener los valores β_0 y β_1 que determinan la recta. En esta tesis se utilizó el método de mínimos cuadrados para la determinación de estos parámetros.

5.3.1. Método de mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados determina los parámetros de la ecuación 5.4 mediante la minimización de la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados de la variable de respuesta y de aquellos proporcionados por la ecuación de predicción. Estos valores se conocen como estimadores por mínimos cuadrados de los parámetros (EMC). Las ecuaciones en 5.3 obtienen los valores que minimizan la suma de los cuadrados de los errores.

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.3)$$

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x}$$

Donde x_i , y_i son la i -ésima variable de predicción y de respuesta respectivamente y \bar{x} , \bar{y} son el valor promedio de las variables de predicción y de respuesta respectivamente. El desarrollo matemático para la obtención de la ecuación 5.3 puede ser consultado en Canavos (1988) y Absalón (2007).

Conociendo los factores β_0 y β_1 , si se requiere conocer la respuesta de un valor de predicción i bastará con evaluar i en la ecuación 5.4

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (5.4)$$

5.3.2. Varianza

La diferencia entre un valor observado y uno estimado se le conoce como residuo, visualmente es la distancia vertical que existe entre la observación y el punto sobre la recta estimada de regresión.

Un residuo representa la cantidad en la que un valor estimado falla para predecir la media de la correspondiente observación aleatoria. La suma de los residuos dividida entre una constante apropiada es la forma en la que se determina la varianza.

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - 2} \quad (5.5)$$

La constante apropiada es $n - 2$ ya que se pierden dos grados de libertad al tener que estimar β_0 y β_1 antes de obtener \hat{y}_i .

s^2 recibe el nombre de varianza residual y la raíz cuadrada positiva se le conoce como la desviación estándar residual. s^2 es una medida absoluta de qué tan bien se ajusta la recta estimada de regresión a las medias de las observaciones de la variable de respuesta, entre más pequeño sea el valor s^2 , mejor se ajustará el modelo.

5.3.3. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación r^2 es una cantidad que mide la proporción de la variación total de las observaciones con respecto a su media la cual es atribuida a la recta estimada de regresión. Su valor va de 1 a 0 e idealmente se espera un valor cercano a uno

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.6)$$

Capítulo 6

Datos

A continuación se describen las distintas redes de observación utilizadas para la generación de las mallas diarias de temperatura máxima, media y mínima.

La información aquí descrita fue obtenida en el año 2023, por lo que es posible que existan modificaciones en la instrumentación de las redes de observación o en el número de estaciones que las conforman posteriormente.

6.1. Redes del Servicio Meteorológico Nacional

6.1.1. Red de observatorios meteorológicos

El Servicio Meteorológico Nacional cuenta con 77 observatorios meteorológicos distribuidos en todos el país con el objetivo de realizar mediciones a alta frecuencia temporal¹, realizando mediciones cada hora y transmitiéndolas en tiempo real (20 minutos después de la hora nominal de la observación).

Cada 3 horas los observatorios envían un mensaje sinóptico con las mediciones codificadas a través del Sistema Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas a la Ciudad de México, donde se concentran todas las mediciones y también se transmiten al Centro Meteorológico Mundial de Washington, además a otros subcentros del SMN y a los usuarios que lo soliciten. Estas mediciones frecuentemente son utilizadas para la generación de los pronósticos a corto, mediano y largo plazo (J. Romero 1990).

6.1.2. Red de Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESMAs)

La red de ESMAs está compuesta por 97 estaciones, de las cuales una se encuentra suspendida y no es posible consultar la información en el Sistema de Información y Visualización de Estaciones Automáticas (SIVEA) del SMN.

¹Desde cada 3 horas hasta cada minuto

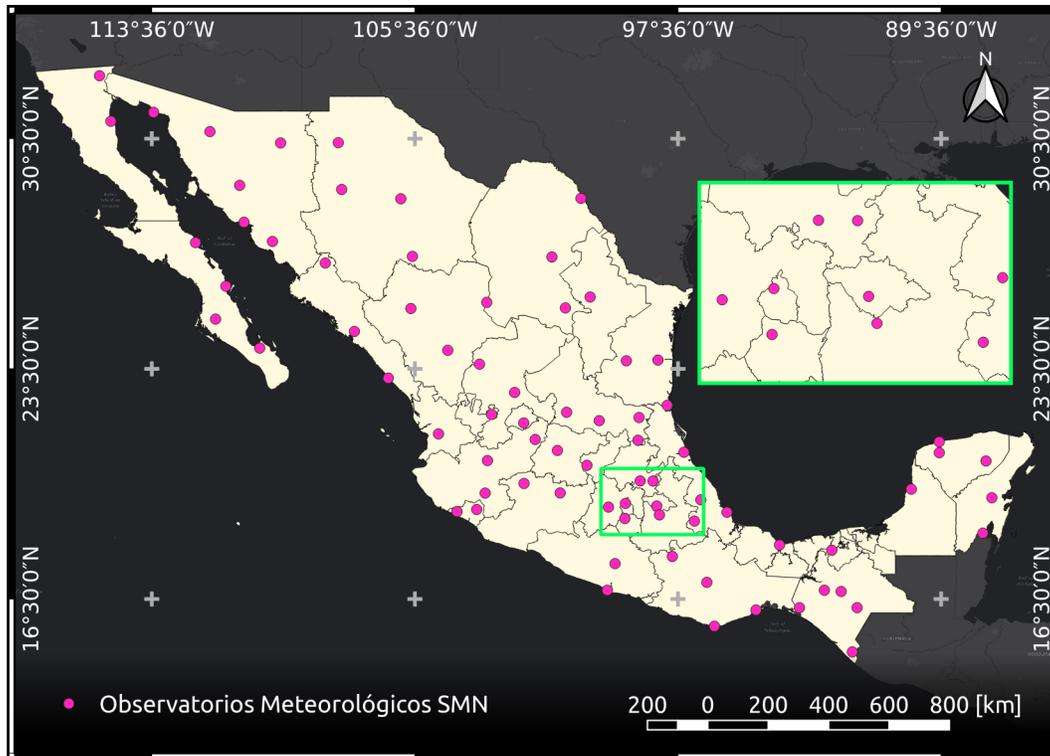


Figura 6.1: Red de observatorios Meteorológicos del SMN.

De acuerdo con el SMN (2021), una ESMA es un conjunto de sensores de medición, dispositivos eléctricos, electrónicos y mecánicos, montados sobre una estructura de soporte, en donde son distribuidos, orientados y conectados al Sistema de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos (SAPAD) de la estación, con el objetivo de realizar la medición y el registro de distintas variables meteorológicas, y transmitir los datos obtenidos a la oficina central.

En la actualidad, existe por lo menos una ESMA en cada observatorio meteorológico y son estas las encargadas de generar y transmitir el mensaje sinóptico a la Ciudad de México. El resto de las estaciones se ubican en lugares que se consideran estratégicos para la determinación del tiempo y el clima del país.

Una ESMA cuenta con un conjunto de sensores capaces de medir la velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y precipitación. La figura 6.2 muestra la configuración y distribución de los sensores básicos que integran una ESMA, mientras que la figura 6.3 muestra la distribución de estaciones en México.

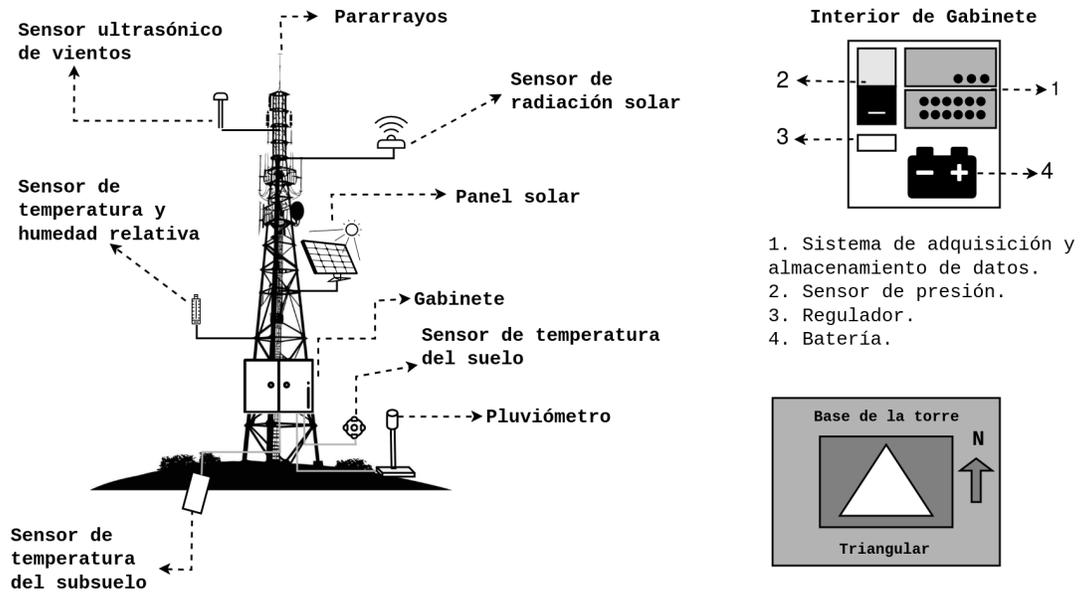


Figura 6.2: Diagrama de una Estación Sinóptica Meteorológica Automática.



Figura 6.3: Red de Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas (ESMA) del SMN.

6.1.3. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs)

La red de EMAs está compuesta por 190 estaciones distribuidas en todo el país. Al igual que las ESMA, una EMA es un conjunto de sensores, dispositivos electrónicos, eléctricos y mecánicos, montados sobre una estructura de soporte, en donde son distribuidos, orientados y conectados al sistema SAPAD de la estación, con el objetivo de realizar la medición y el registro de las mismas variables meteorológicas que las estaciones ESMA.

A diferencia de estas últimas, una EMA solo envía la información a la oficina central y no envía mensajes sinópticos. La figura 6.4 muestra la configuración de una EMA y la figura 6.5 la distribución de las EMAs en México.

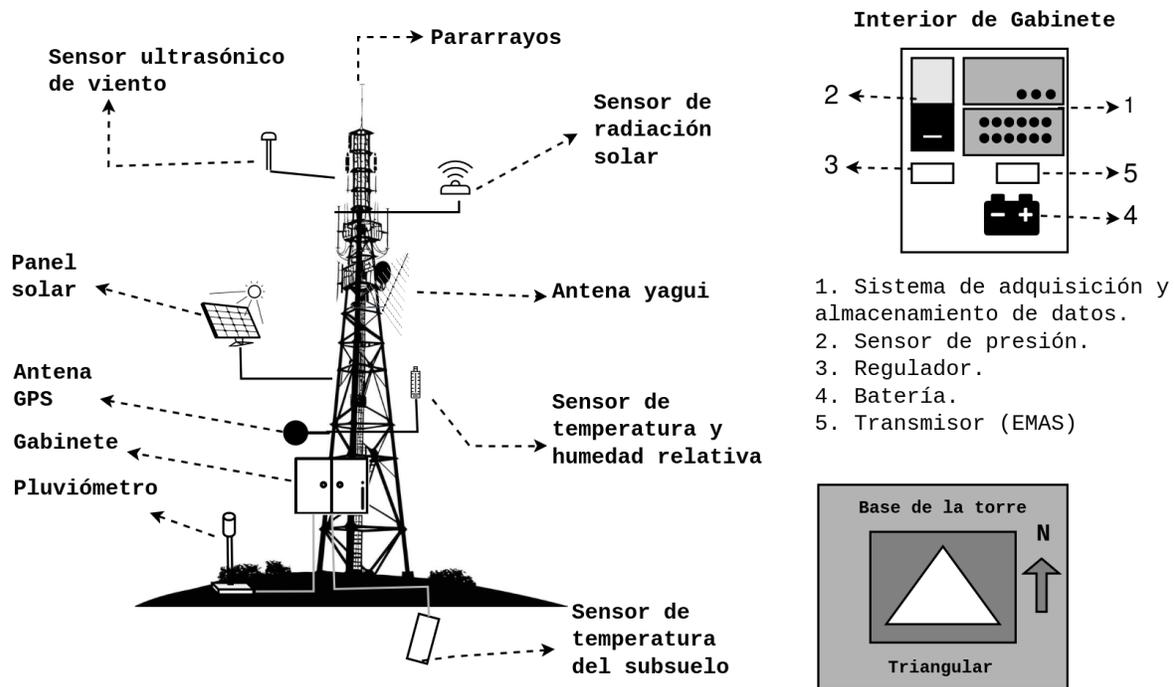


Figura 6.4: Diagrama de una EMA.

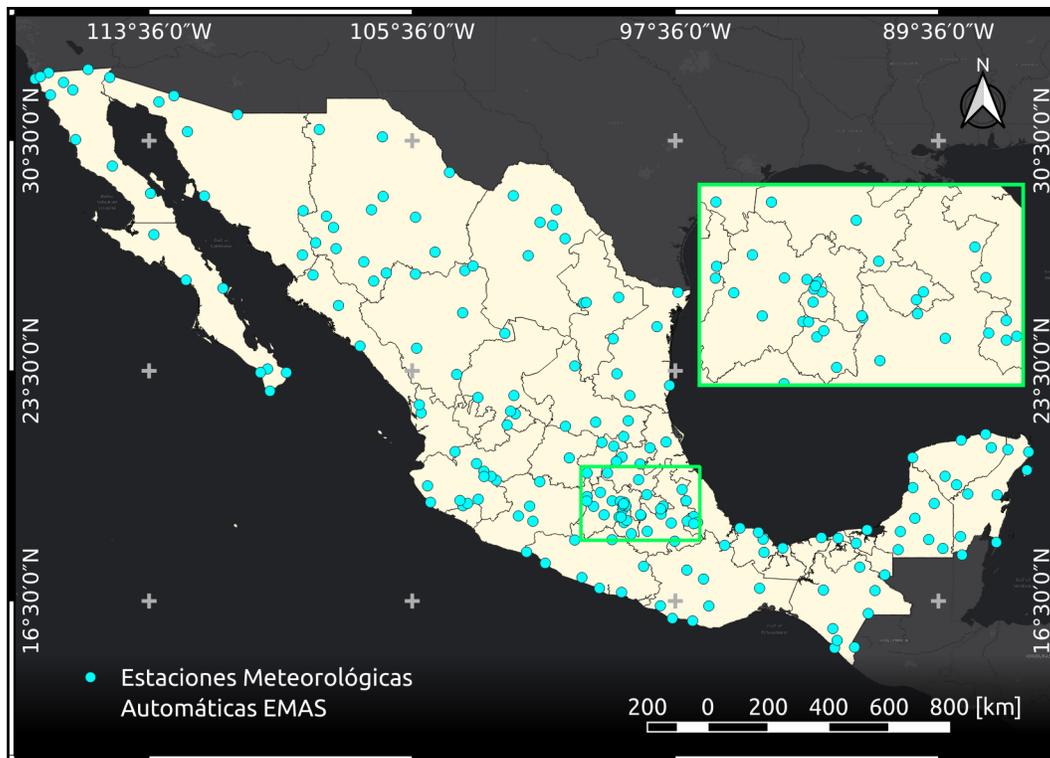


Figura 6.5: Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas EMAS del SMN

6.1.4. Red de Estaciones climatológicas convencionales

La red de estaciones climatológicas convencionales está conformada por poco más de 5,400 estaciones, de las cuales aproximadamente 2,800 siguen reportando datos al día de hoy y el resto de estaciones se encuentran temporal o permanentemente fuera de servicio, sin embargo, son un acervo de información importante (SMN 2010).

Las principales variables climáticas que pueden ser consultadas a través de la herramienta digital que brinda el SMN son la temperatura máxima y mínima, precipitación acumulada en 24 horas, fenómenos como la tormenta eléctrica, niebla, granizo, la cobertura de cielo, evaporación y las normales climatológicas.

La figura 6.6 es un ejemplo de una estación climatológica convencional obtenida de la página oficial de la CONAGUA (2013). Se puede observar que las estaciones convencionales cuentan con instrumentación básica como termómetro, veleta o anemoscopio, tanque evaporímetro y pluviómetro. La figura 6.7 muestra la distribución de las estaciones convencionales en México.

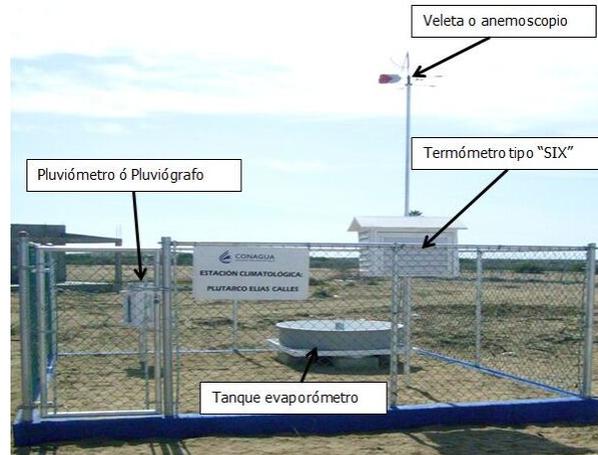


Figura 6.6: Estación climatológica convencional del SMN.

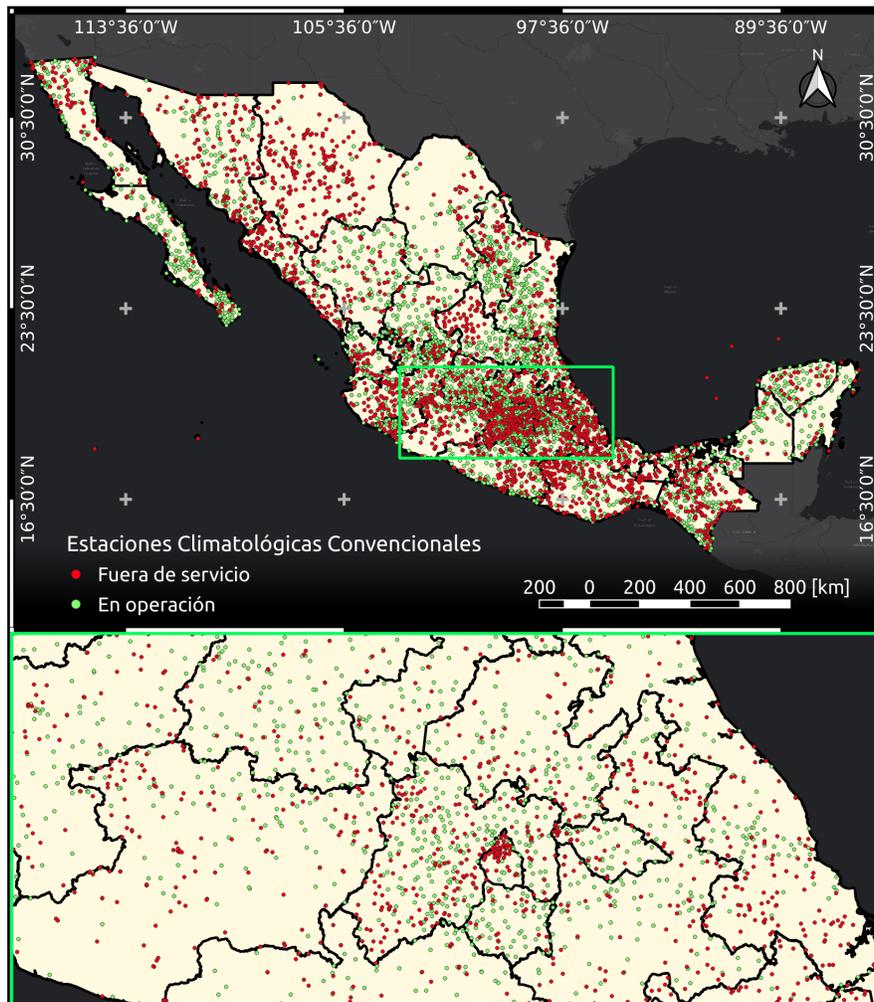


Figura 6.7: Red de Estaciones Climatológicas Convencionales del SMN

6.2. Red de la Ciudad de México

6.2.1. Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

La Red de Meteorología y Radiación Solar, perteneciente al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Dirección General del Aire de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) de la CDMX, está compuesta por 28 estaciones meteorológicas que miden de manera continua y permanente (desde 1986) variables meteorológicas importantes como la humedad relativa, temperatura ambiente, presión barométrica, dirección e intensidad del viento.

También miden la radiación solar UV-A y UV-B, generando el Índice de Radiación Ultravioleta (IUV) que se reporta cada 15 minutos en su página oficial (SEDEMA 2021).

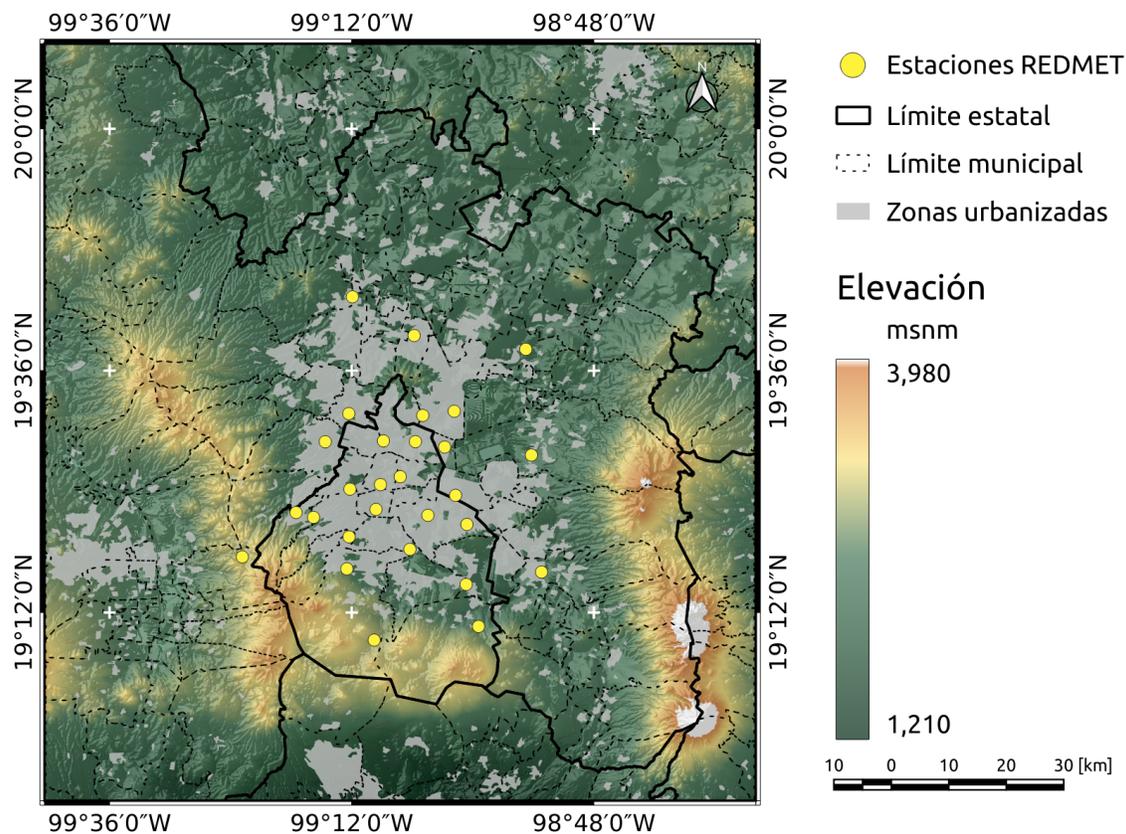


Figura 6.8: Red de estaciones meteorológicas de la REDMET.



Figura 6.9: Estación Meteorológica ubicada en Milpa Alta perteneciente a la REDMET.

6.3. Red de la Universidad Nacional Autónoma de México

6.3.1. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU)

El Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario (PEMBU), que coordina el Instituto de Ciencias de Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC) de la UNAM, consiste en una red de estaciones meteorológicas ubicadas en cada plantel de las Escuelas Nacionales Preparatorias (ENPs) y Centros de Ciencias y Humanidades (CCHs) de la UNAM, además de estaciones anexas en otras instituciones educativas (como el ICAYCC).

Su objetivo es promover el desarrollo de proyectos multidisciplinarios que hagan uso de la información meteorológica de las estaciones, así como disponer a la comunidad universitaria y al público en general una base de datos meteorológicos con fines de divulgación y docencia (PEMBU 2023b).

La red está compuesta por 15 estaciones meteorológicas capaces de medir la temperatura, humedad, dirección y rapidez del viento, radiación solar, presión barométrica, la precipitación acumulada en 24 horas, entre otras. La figura 6.10 muestra una estación meteorológica de la red PEMBU obtenida de la página oficial de PEMBU (2023a) de donde es posible descargar los datos.



Figura 6.10: Estación meteorológica perteneciente al PEMBU ubicada en el CCH oriente.

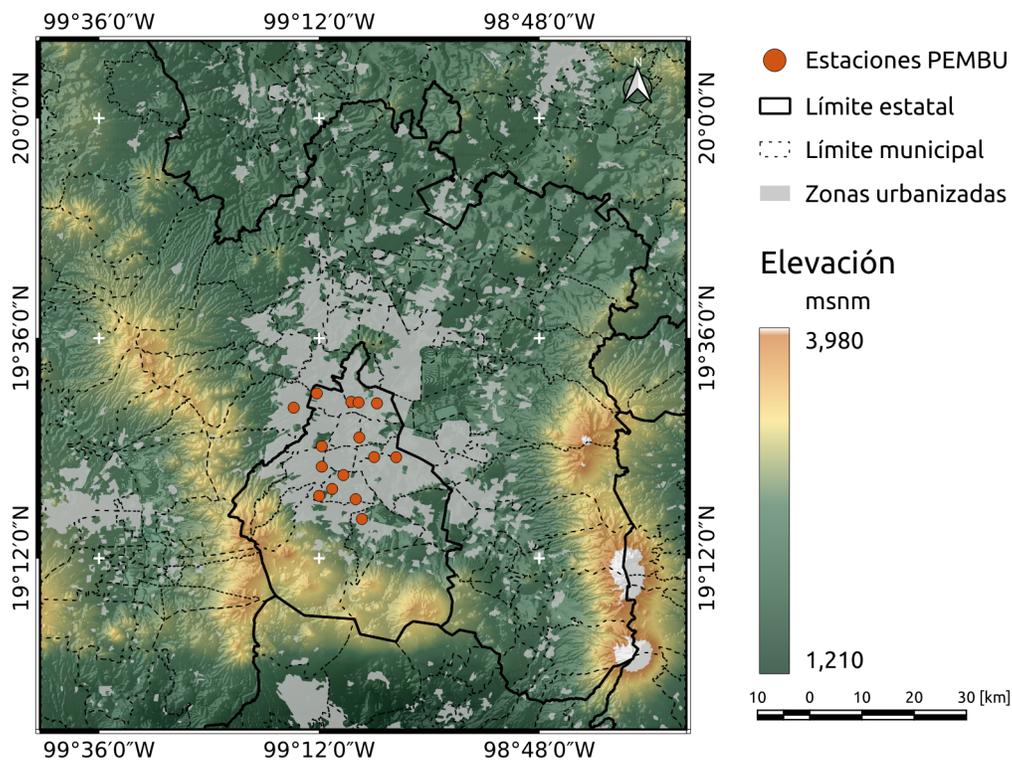


Figura 6.11: Red de estaciones meteorológicas del PEMBU.

Capítulo 7

Metodología

La metodología empleada en esta tesis para generar mallas diarias de temperatura se basa en las metodologías descritas en Carrasco (2013) y Chacón y Olguín (2016) con la diferencia principal de la sustitución del filtro espacial por un nuevo filtro espacial que considera el uso de suelo como término de segundo orden y su segregación espacial para la eliminación de estaciones espacialmente anómalas.

El filtro espacial se considera de segundo orden debido a que toma en cuenta el tipo de cobertura en el cual se encuentra situada la estación meteorológica, de tal manera que los valores de temperatura deben ser consistentes respecto a las estaciones de cada cobertura en particular.

Aplicar el filtro segregado espacialmente implica que el número de estaciones que es considerado en cada paso del filtrado es menor y por lo tanto el filtro espacial es más robusto al detectar las estaciones anómalas.

La modificación del filtro espacial es una propuesta para su mejoramiento, pues al comparar estaciones relativamente cercanas y con coberturas similares, se espera que su relación sea mayor, como lo describe la primera ley de la geografía dicha por el icónico geógrafo Waldo R. Tobler: *Todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las cosas distantes.*

Las mallas de temperatura se generaron sobre un dominio que contiene la ZMVM (denominado dominio de muestreo) con el único objetivo de garantizar la continuidad y congruencia de la temperatura en los límites del dominio de la zona centro de México (ZCM) después de aplicar el suavizado a las mallas (más detalles ver sec. 5.2.2). La figura 7.1 muestra el dominio de la zona de muestreo, de la ZCM y la ZMVM.

Es importante mencionar que las series de tiempo cuentan con un control de calidad estadístico realizado previamente, donde se descartan valores fuera del rango de variabilidad aceptable.

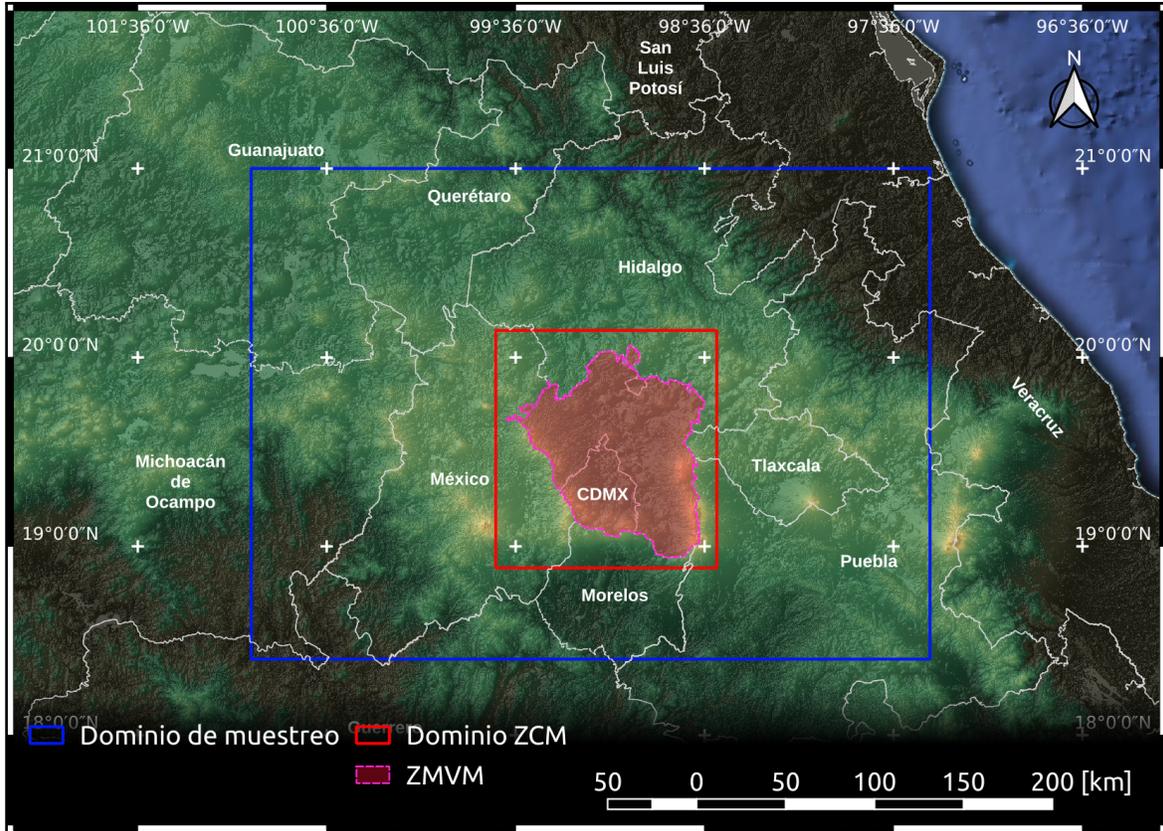


Figura 7.1: Dominio de la ZCM (contorno rojo) y la zona de muestreo (contorno azul) definidos en esta tesis.

El límite inferior (R_1) y superior (R_2) del rango de variabilidad aceptable está determinado (ecuación 7.1) considerando la variabilidad de las series de tiempo y que la cantidad de datos descartados no sea mayor al 0.1% del total de muestras.

$$\begin{aligned} R_1 &= Q_1 - f \cdot IQR \\ R_2 &= Q_3 + f \cdot IQR \end{aligned} \quad (7.1)$$

Donde Q_1 y Q_3 representa el primer y tercer cuartil respectivamente, IQR el rango intercuartil ($Q_3 - Q_1$) y f es un factor determinado por la desviación estándar de las series de tiempo. La tabla 7.1 muestra los valores según la variación estándar.

Además del filtro anterior, se les aplicó filtros que consideran su relación con otras variables meteorológicas como la temperatura de punto de rocío.

Por lo tanto, estadísticamente las mediciones son congruentes en el tiempo, sin embargo, esto no significa que sean congruentes espacialmente. El filtro estadístico que se describe en los párrafos siguientes se centra en asegurar la consistencia espacial para cada día en particular.

A continuación se describe detalladamente la metodología implementada para la generación de las mallas diarias de temperatura máxima y mínima, la temperatura media es resultado del promedio de la temperatura máxima y mínima.

Valor de σ	Valor de f
$\sigma \geq 10$	1.2
$9 \leq \sigma < 10$	1.4
$8 \leq \sigma < 9$	1.6
$7 \leq \sigma < 8$	1.8
$6 \leq \sigma < 7$	2
$5 \leq \sigma < 6$	2.2
$4 \leq \sigma < 5$	2.4
$3 \leq \sigma < 4$	2.6
$\sigma < 3$	2.8

Tabla 7.1: Valor de f según la desviación estándar de la serie de tiempo de temperatura.

7.1. Integración de datos

Para cada una de las redes de observación, se revisa la existencia de estaciones con registros de temperatura máxima y mínima del día en particular, así como para los campos de longitud, latitud y altura. Cuando alguna estación carece de algún dato de posición (longitud, latitud o altura), se descarta por completo para los siguientes pasos. Los registros de temperatura máxima y mínima se almacenan por separado para evitar descartar una estación por completo en caso de que sí exista registro ya sea para temperatura máxima o mínima.

El resultado de la integración es una matriz de n filas y 5 columnas. El número de filas n es determinado por el número de estaciones encontradas con información para ese día en particular, la primera columna contiene un ID que permite identificar a qué administrador pertenece dicha estación, la segunda, tercera y cuarta contiene la longitud, latitud y altura de la estación respectivamente, finalmente la última columna contiene el registro de temperatura correspondiente. La tabla 7.2 muestra el ID asignado a cada uno de los administradores de las distintas redes.

ID	Administradores de las redes
1	Redes pertenecientes al SMN
2	Red perteneciente a la SEDEMA
3	Red perteneciente al ICAyCC UNAM

Tabla 7.2: ID según administrador utilizados en la integración de datos.

7.2. Reducción de la temperatura ambiente al nivel del mar

Considerando que las estaciones se encuentran a distintas elevaciones y la relación inversa¹ entre la temperatura y la altura (ver sección 2.4), se realiza la reducción de la temperatura ambiente al nivel del mar considerando un lapserate² de $6.52 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ asumiendo un proceso pseudo-adiabático en una atmósfera húmeda con el objetivo de hacer equiparables las temperaturas de las estaciones.

La ecuación 7.2 muestra la forma en la que fue aplicado el lapserate para realizar la reducción en cada estación.

$${}_eT_i = T_i + \gamma \cdot Z_i \quad (7.2)$$

Donde ${}_eT_i$ representa la temperatura estimada a nivel del mar de la estación i , T_i la temperatura ambiente, γ el lapserate y Z_i la altura de la estación (Willmott y Matsuura 1995).

A la temperatura ambiente reducida al nivel del mar también se le conoce como temperatura potencial.

7.3. Detección de estaciones espacialmente anómalas

En general, la temperatura presenta una distribución normal, sin embargo, cuando se considera una muestra como por ejemplo las temperaturas registradas por un conjunto de estaciones meteorológicas de un día en particular, se observa una distribución asimétrica debida a eventos estocásticos.

Para ejemplificar esto, la figura 7.2 muestra el histograma de la temperatura máxima (potencial equivalente) registrada por las estaciones meteorológicas ubicadas en el dominio de la ZMVM. La línea negra representa una distribución de valores extremos (ev) ajustada a los datos.

Considerando la distribución que presenta una muestra de temperatura, se agruparon las estaciones de acuerdo a la distancia entre ellas y el uso de suelo, dando como resultado seis grupos que se muestran en la tabla 7.3.

Para cada uno de los grupos se calculó el percentil 10 y 90 que representa el límite inferior y superior respectivamente, de lo que se denominó como rango de variabilidad. El resultado son seis rangos de variabilidad.

Posteriormente, para cada estación se determinó si la temperatura registrada se encuentra dentro o fuera del rango de variabilidad que le corresponde de acuerdo al grupo que pertenece la estación, si la temperatura se encuentra fuera del rango, se considera espacialmente anómala.

Para ejemplificar la aplicación del filtro espacial, considerando datos del 20 de mayo de 1962, la figura 7.3 muestra el histograma para los primeros tres grupos de la tabla 7.3 con una distribución ev ajustada y el percentil 10 y 90, se puede observar el número de estaciones descartadas en cada grupo.

¹Haciendo referencia a la relación inversa que ocurre específicamente en la tropósfera.

²Lapserate definido en la sección 2.4

Temperatura máxima potencial con distribución ev ajustada

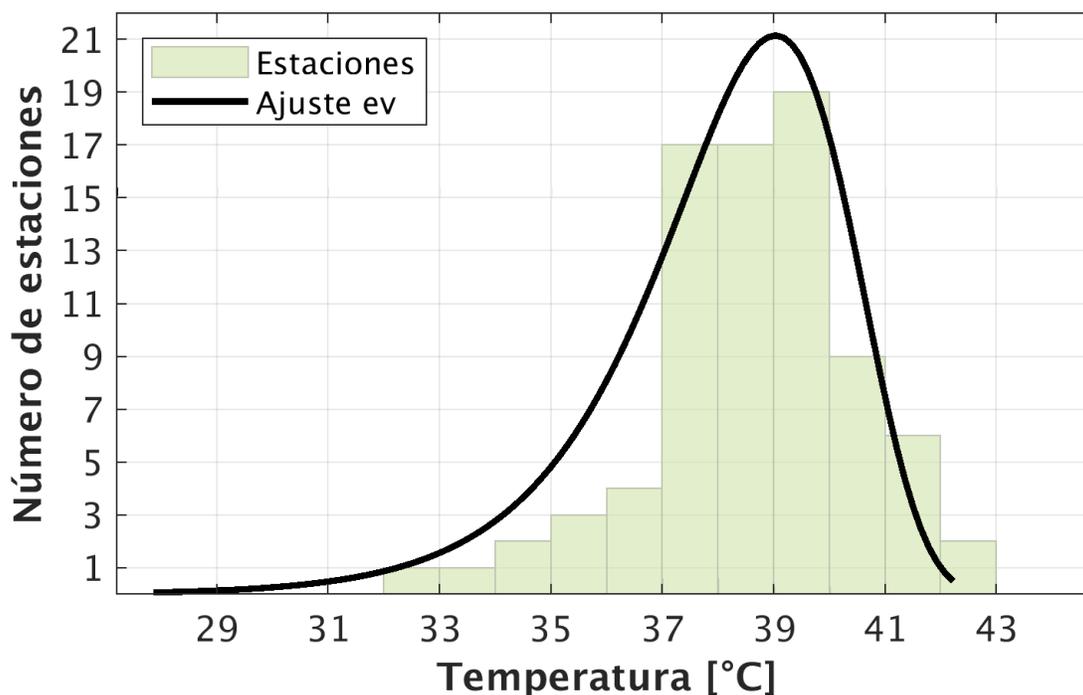


Figura 7.2: Histograma de la temperatura máxima (potencial equivalente) registradas por estaciones el 20 de mayo de 1962.

Grupo	Descripción
1	Estaciones dentro del dominio de la ZMVM y con uso de suelo tipo urbano
2	Estaciones dentro del dominio de la ZMVM y con uso de suelo tipo vegetación
3	Estaciones dentro del dominio de la ZMVM y con uso de suelo tipo agricultura
4	Estaciones dentro del dominio de muestreo y con uso de suelo tipo urbano
5	Estaciones dentro del dominio de muestreo y con uso de suelo tipo vegetación
6	Estaciones dentro del dominio de muestreo y con uso de suelo tipo agricultura

Tabla 7.3: Grupos generados de acuerdo a la distancia y uso de suelo.

Temperatura máxima potencial con distribución ev ajustada por grupo

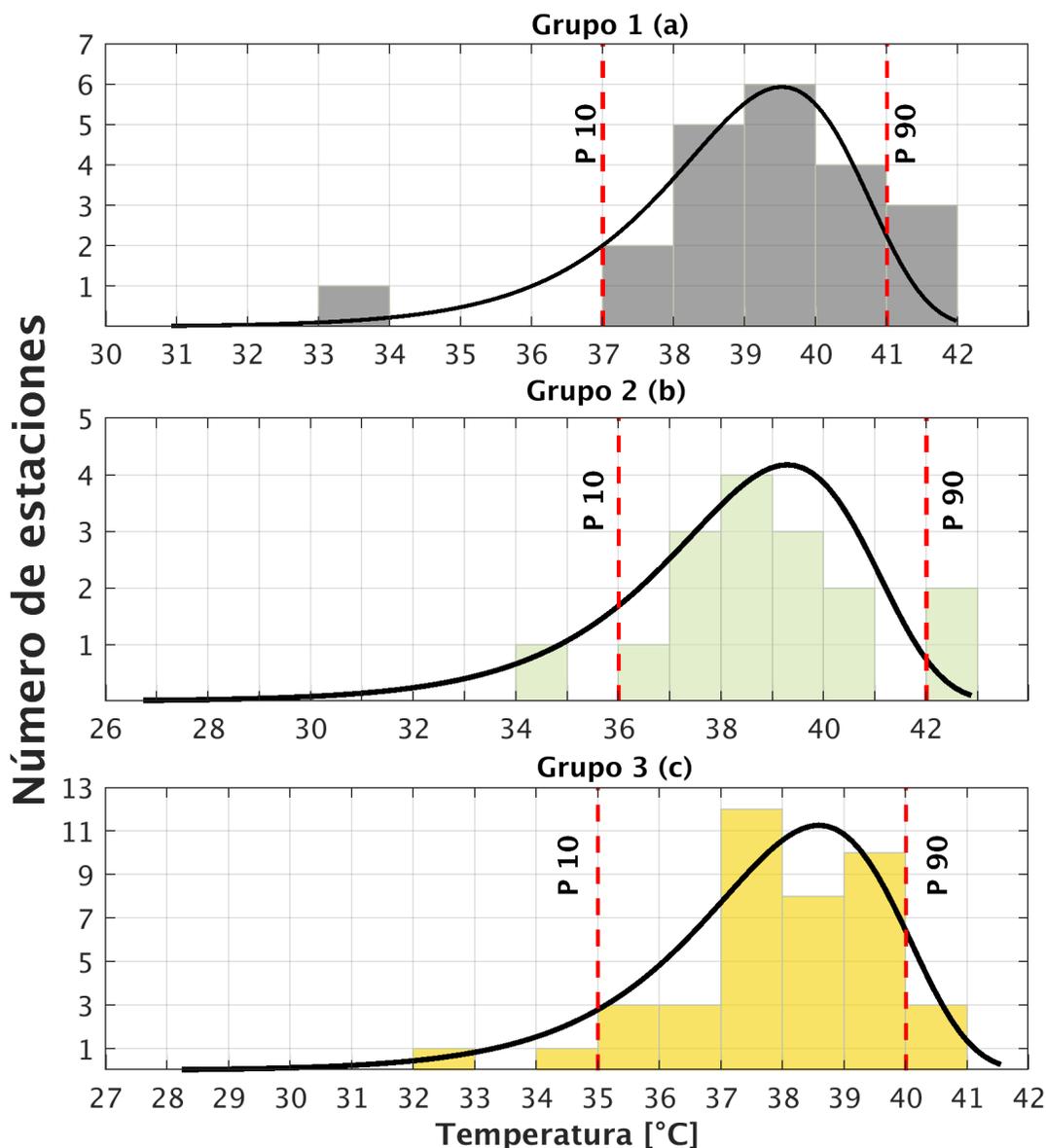


Figura 7.3: Histogramas de la temperatura máxima (potencial equivalente) registradas por estaciones dentro de la ZMVM con uso de suelo tipo urbano (a), vegetación (b) y agricultura (c) el 20 de mayo de 1962.

La figura 7.4 muestra la ubicación espacial de las estaciones descartadas en el dominio de la ZMVM, mientras que la figura 7.5 muestra la interpolación bilineal de la temperatura máxima potencial cuando se consideran y se descartan las estaciones espacialmente anómalas.

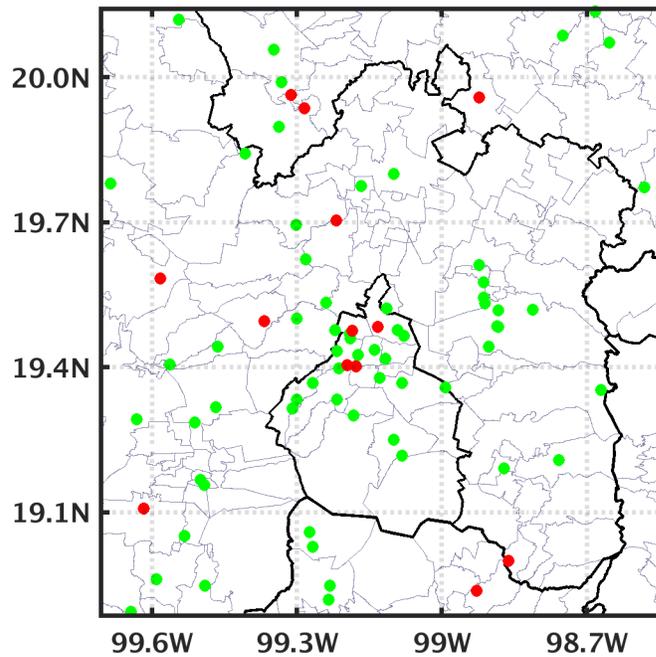
Estaciones meteorológicas con datos para 20 de mayo de 1962

Figura 7.4: Distribución de estaciones meteorológica para el 20 de mayo de 1962. Los puntos verdes representan las estaciones dentro del rango de variabilidad y los puntos rojos estaciones espacialmente anómalas.

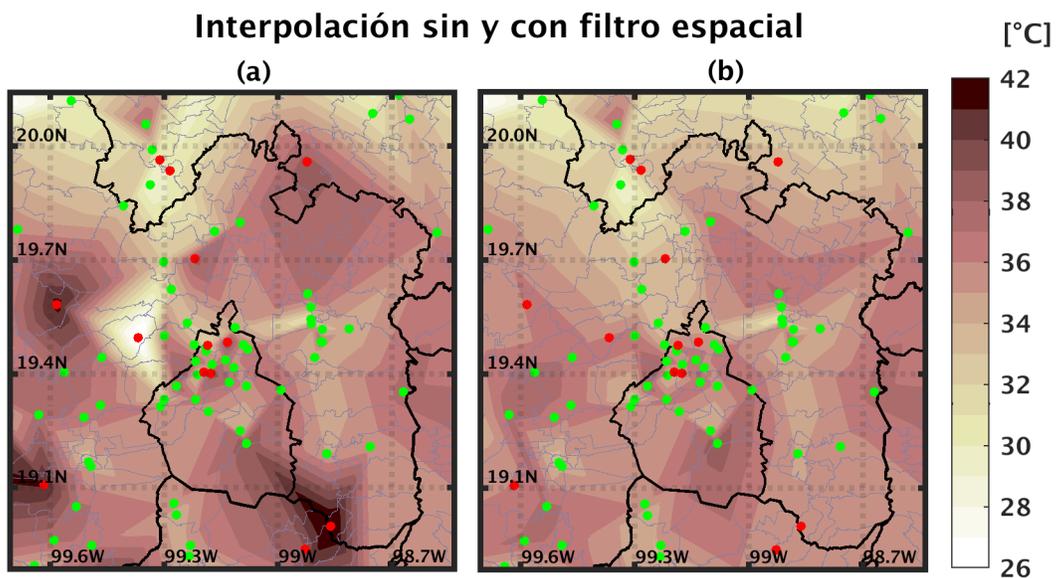


Figura 7.5: Comparación de temperatura potencial a nivel del mar obtenida mediante interpolación bilineal con y sin filtro espacial.

7.4. Interpolación bilineal de las temperaturas potenciales

Considerando únicamente las estaciones que pasaron el filtro espacial, se realiza la malla de temperatura potencial máxima y mínima sobre el dominio de muestreo. El resultado es una malla con dimensiones de 434 filas y 313 columnas con una resolución espacial de $\sim 1\text{km}$ (0.0083°).

7.5. Suavizado de mallas

Se aplica un suavizado a las nuevas mallas para aumentar las señales de los patrones climáticos al tiempo que se reduce el ruido provocado por las fluctuaciones aleatorias (OMM 2018b).

El suavizado se realiza aplicando 30 veces un filtro pasa-bajas de dos dimensiones usando un kernel cuya distribución se observa en la figura 5.4.

7.6. Obtención de la temperatura a 2 m de superficie a partir de la temperatura potencial

Considerando la misma razón de cambio que se menciona en la sección 7.2 y una malla de topografía proveniente del CEM con la misma resolución espacial que la zona de muestreo, se realiza la operación inversa a la ecuación 7.2. La ecuación 7.3 muestra la operación realizada.

$$T_{A_{ij}} = T_{p_{ij}} - \gamma \cdot Z_{ij} \quad (7.3)$$

Donde $T_{A_{ij}}$ es la temperatura ambiente en la posición i, j de una malla, $T_{p_{ij}}$ es la temperatura potencial en la posición i, j de la malla y Z_{ij} es la altura en la posición i, j de la malla.

Dado que la temperatura potencial y la topografía se encuentran en matrices de mismas dimensiones, la ecuación 7.3 se resume a una operación matricial bastante sencilla de aplicar.

7.7. Recorte de la malla al dominio de la ZMVM

Debido a que el dominio de muestreo contiene el dominio de la ZCM, se seleccionan de la malla las filas y columnas que representan la ZCM. Como resultado final se obtiene una malla de dos dimensiones (longitud y latitud) compuesta por 142 filas y 152 columnas.

Este proceso se repite para cada día del año y se almacena en un archivo netCDF³ que contiene los metadatos de las variables, la temperatura máxima, media y mínima diaria de la ZCM, un vector que almacena la longitud del dominio de la malla y otro array análogo para la latitud, una matriz denominada *estadis_tmax* que contiene el número de estaciones

³Network Common Data Form (NetCDF) es un tipo de formato de datos usado principalmente para compartir datos científicos estructurados como arrays. Se caracteriza por ser autodescriptivo y escalable.

utilizadas y descartadas en cada interpolación diaria por tipo de administrador de redes y por el tipo de dominio (ZCM y de muestreo) y una matriz denominada *estadis_tmin* análoga a *estadis_tmax*.

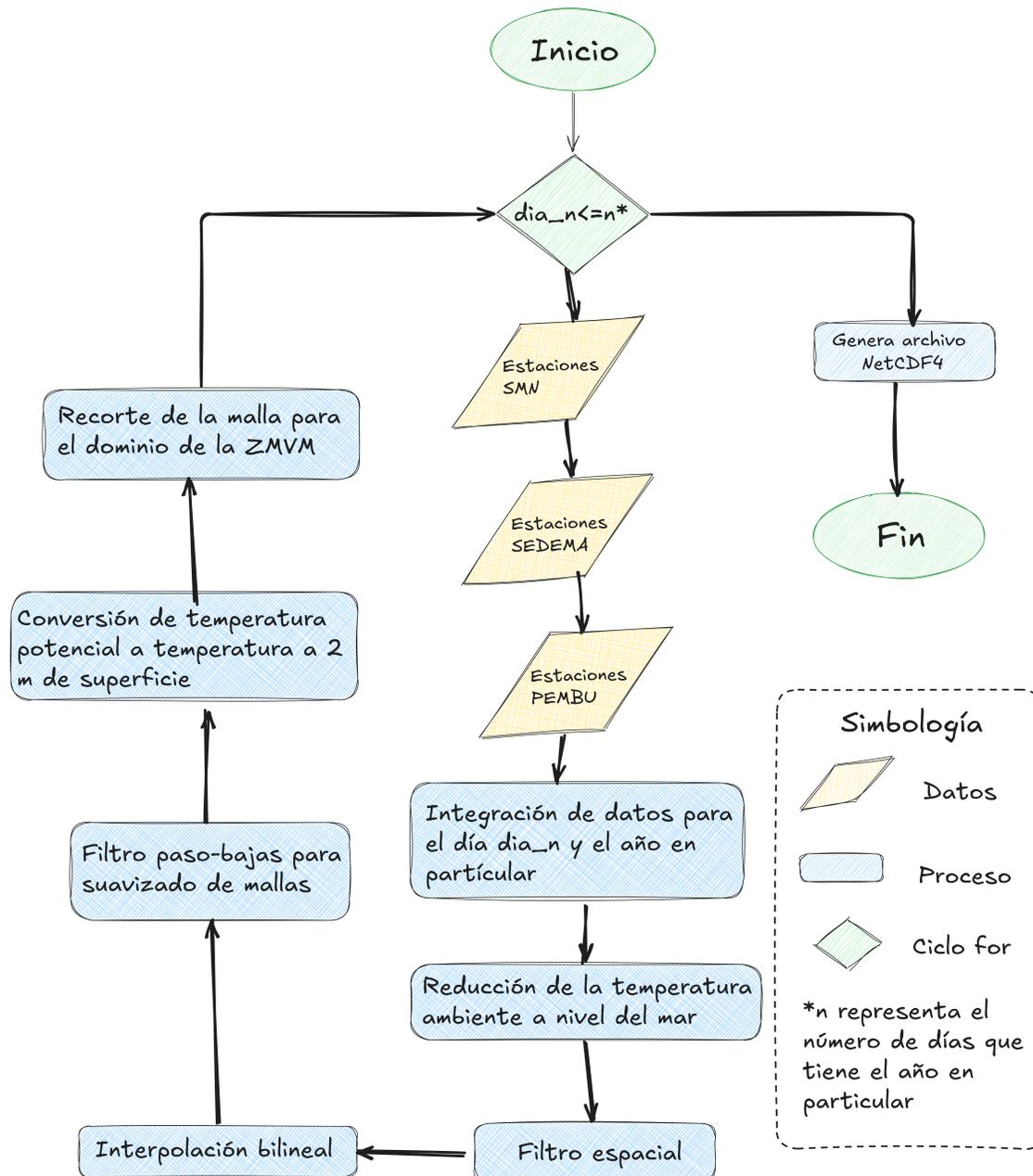


Figura 7.6: Diagrama de flujo del proceso realizado para la generación de las mallas de temperatura máxima y mínima para un año en particular.

Capítulo 8

Resultados y discusión

8.1. Climatología y variación estacional

La figura 8.2 muestra la climatología de temperatura máxima, media y mínima anual de la ZCM, se observa que existe una correspondencia con las elevaciones de la ZMVM.

Las temperaturas más bajas se encuentran en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (ubicado al oriente de la ZMVM), Parque Nacional Cumbres del Ajusco (al sur de la ZMVM), el Parque Nacional Cumbres Sierra Nevada (al poniente de la ZMVM) y todas las sierras que unen a la Sierra Nevada y el Ajusco.

Las temperaturas más altas de la ZMVM se presentan en las alcaldías centro de la CDMX, específicamente la alcaldía Cuauhtémoc, Benito Juárez, Iztacalco, Venustiano Carranza y parte importante de Iztapalapa, Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo.

En promedio, la oscilación térmica, es decir, la temperatura mínima y máxima característica de la ZMVM es de 6.3°C a 21.7°C , la temperatura más baja se presenta en el mes de enero y la más alta en el mes de abril. Estos valores y los siguientes representan el promedio espacial de 61 años de la temperatura máxima y mínima considerando toda la ZMVM.

La primavera, conformada por los meses de marzo, abril y mayo, se caracteriza por ser el periodo más cálido del año. Esta estación presenta temperatura máxima, media y mínima de 24.2°C , 15.5°C y 6.7°C respectivamente.

El invierno, conformado por diciembre, enero y febrero es lo opuesto a la primavera, representa el periodo más frío del año. Esta estación presenta temperatura máxima, media y mínima de 20.3°C , 11.6°C y 2.8°C respectivamente.

Las estaciones de verano (conformado por junio, julio y agosto) y otoño (conformado por septiembre, octubre y noviembre) son consideradas estaciones de transición, pues presentan en mayor o menor medida, temperaturas similares a la primavera o el invierno.

En verano y otoño se presentan temperaturas máxima, media y mínima de 21.8°C , 15.5°C , 8.9°C y 20.7°C , 13.7°C y 6.6°C , respectivamente.

Junio, julio, agosto y septiembre son los meses que presentan temperaturas mínimas más altas, meses que corresponden con la temporada de precipitación en la ZMVM.

La figura 8.1 muestra la variación mensual promedio de la temperatura en la ZMVM y

la figura 8.3 muestra la variación estacional espacialmente.

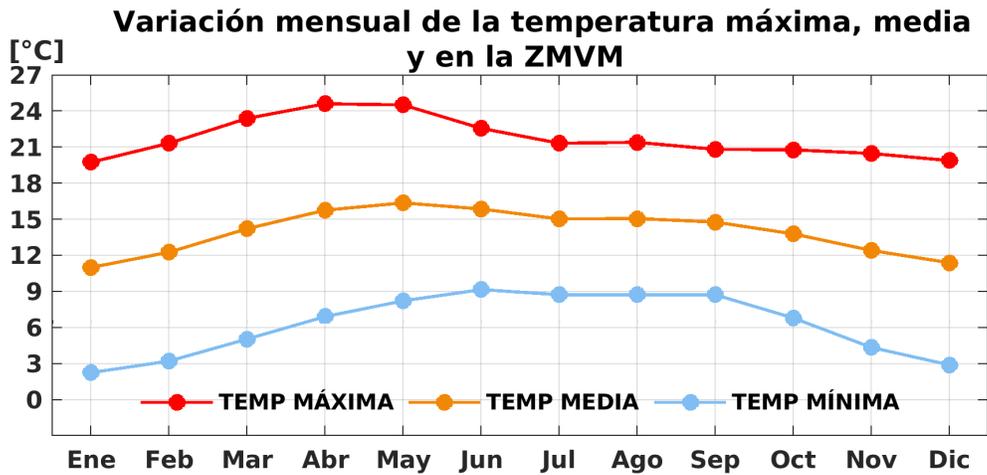


Figura 8.1: Temperatura máxima, media y mínima promedio por mes en la ZMVM considerando 61 años de datos.

Climatología de temperatura máxima, media y mínima anual 1961-2021

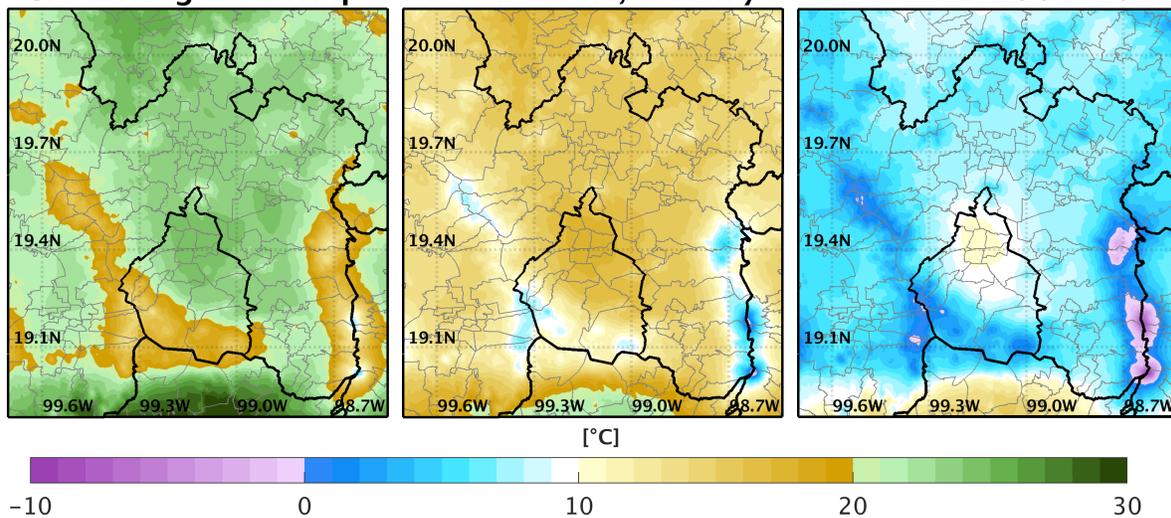


Figura 8.2: De izquierda a derecha, climatología de temperatura máxima, media y mínima anual de la ZCM para el periodo 1961-2021.

8.1.1. Climatología por Alcaldía

Las alcaldías centro de la CDMX son las más calientes. Sin embargo, las alcaldías que presentan temperaturas mayores a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ son la alcaldía Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez, Iztacalco y Coyoacán.

En contraparte, las alcaldías que presentan temperaturas menores a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ son la alcaldía Cuajimalpa de Morelos, Magdalena Contreras, Tlalpan y Milpa Alta.

La temperatura máxima, media y mínima de la Ciudad de México es de $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $8.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente.

Climatología 1961-2021 para las alcaldías de la CDMX

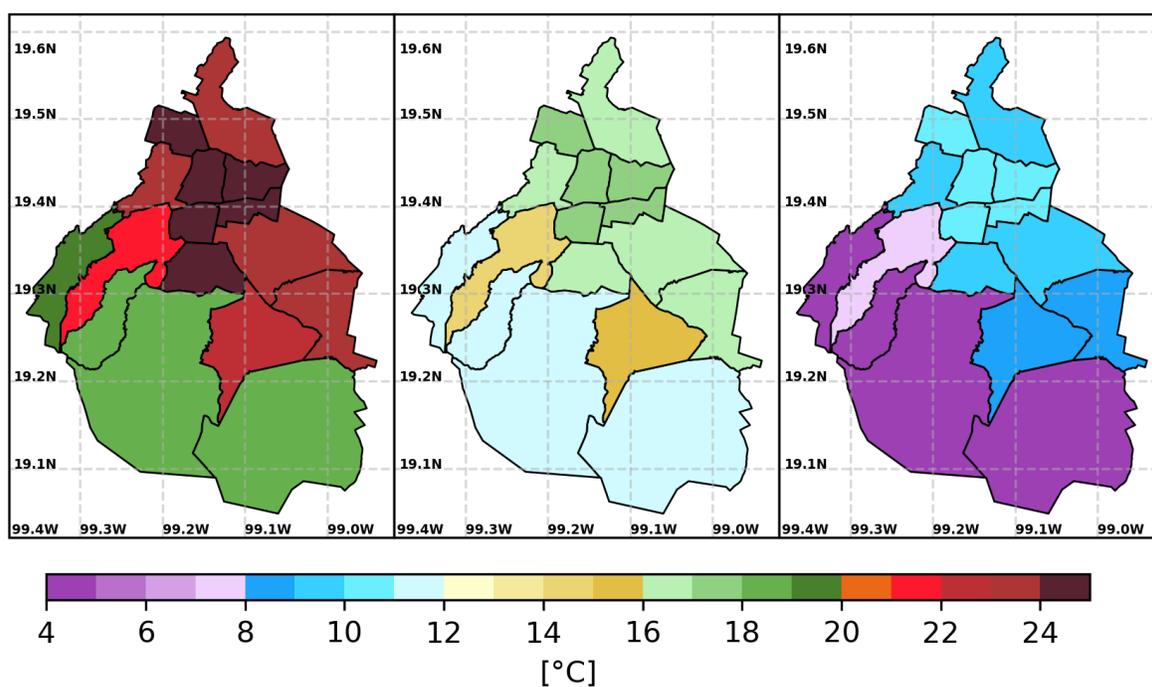


Figura 8.4: Climatología de temperatura máxima, media y mínima por alcaldía.

8.2. Variación interanual

Año con año existen variaciones en la temperatura que suelen estar determinadas en cierta medida, por fenómenos meteorológicos de escala sinóptica¹. La figura 8.5 muestra la temperatura máxima, media y mínima promedio en la ZMVM para los 61 años de estudio.

El año más cálido (temperatura máxima más alta) fue el año de 1998 donde se alcanzó un valor promedio de $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, año en el que se presentó El Niño² más intenso. El año menos cálido (temperatura máxima más baja) fue el año de 1976 con una magnitud de $20.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

¹Los fenómenos atmosféricos de escala sinóptica son grandes sistemas meteorológicos, como frentes, ciclones y anticiclones, que abarcan extensas áreas geográficas.

²Fenómeno meteorológico que se presenta sobre el océano pacífico tropical central y oriental.

El año menos frío (temperatura mínima más alta) fue el año 2019 con una magnitud de 7.8°C , mientras que el año más frío (temperatura mínima más baja) fue en 1999 con una magnitud de 5.4°C .

Variación interanual de temperatura máxima media y mínima en la ZMVM 1961-2021

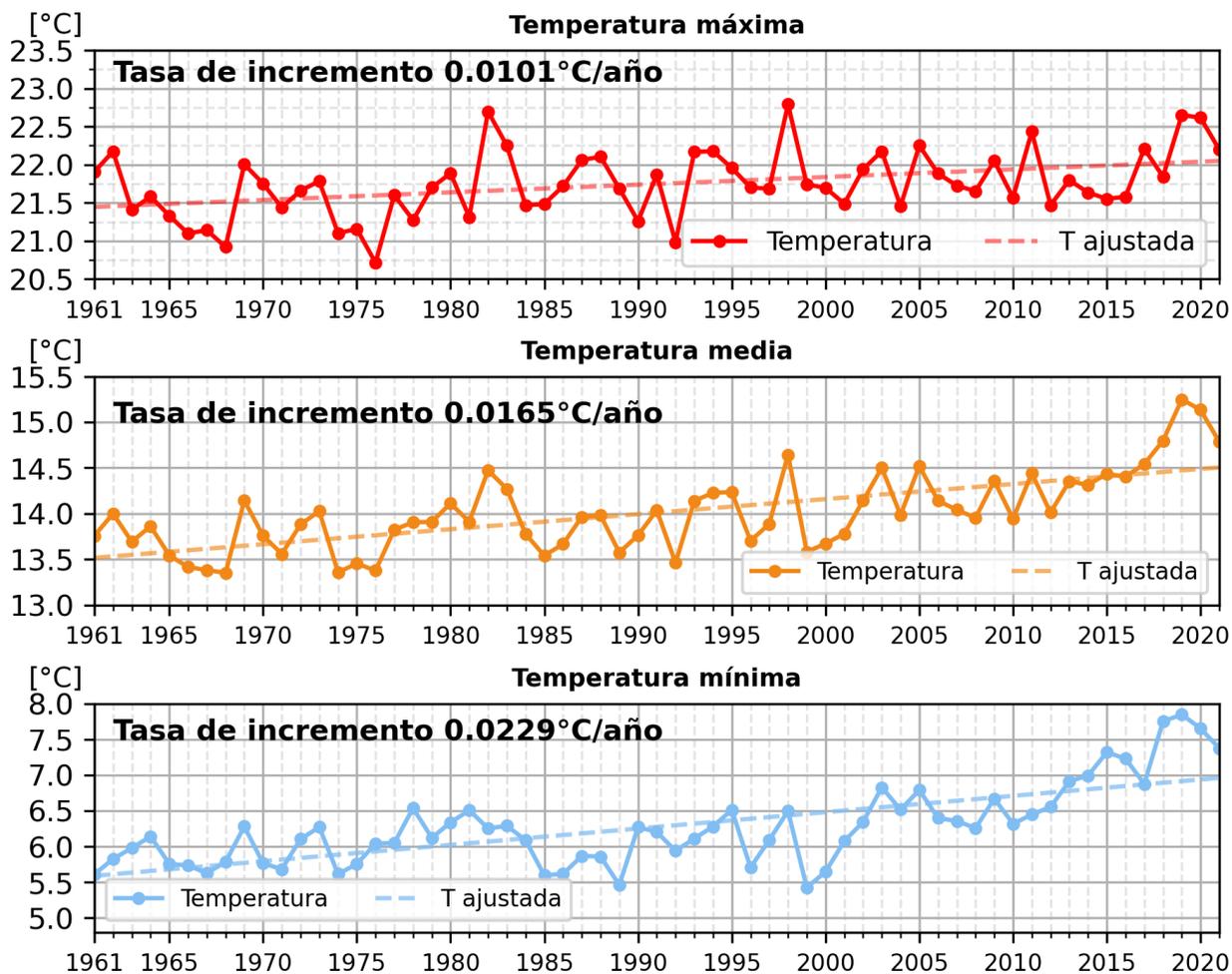


Figura 8.5: Serie de tiempo de la temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM 1961-2021.

La tasa de incremento anual de la temperatura que se muestra en la figura 8.5 es el resultado de aplicar regresión lineal a las series de tiempo. Tanto la temperatura máxima, media y mínima, presentan una tasa de incremento de magnitudes similares (del orden de centésimas de °C por año), siendo la temperatura mínima la que presenta una mayor magnitud.

La figura 8.6 muestra las anomalías de temperaturas referidas a la climatología 1961-2021. Determinar las anomalías con la climatología de todo el periodo de estudio y no respecto a otro periodo (como por ejemplo solo 30 años) permite determinar en qué años fueron los más cálidos o fríos del periodo de estudio.

Se observa que es a partir de la década de los 90 donde se concentran más las anomalías positivas en prácticamente los tres tipos de temperatura. En los últimos años, la temperatura máxima ha tenido anomalías positivas de menor magnitud en comparación con sus correspondientes en la temperatura media y mínima, lo que implica que la temperatura máxima no ha aumentado tanto en comparación con la temperatura media y mínima.

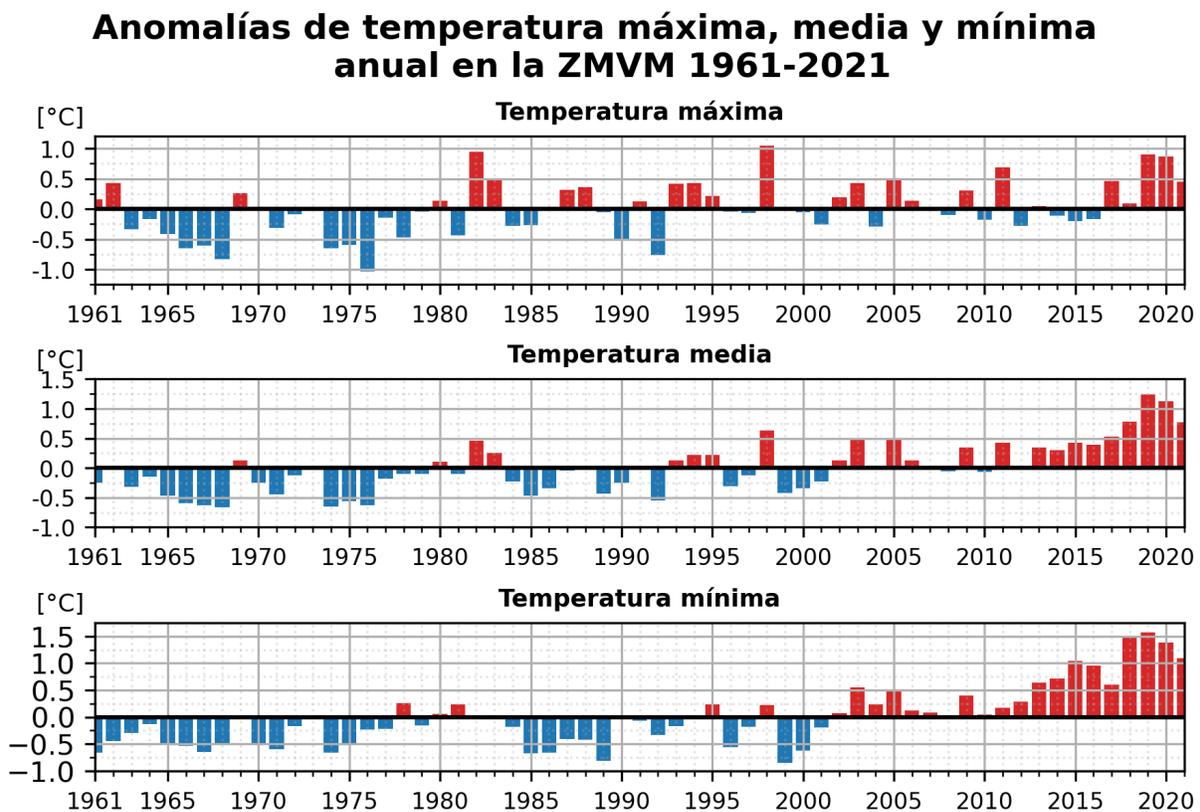


Figura 8.6: Anomalías de temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM referidas a la climatología 1961-2021.

Las temperaturas anuales de cada año del periodo de estudio se encuentran en el Anexo A.

8.2.1. Por tipo de cobertura

Se caracterizó la temperatura del aire distinguiendo en las tres coberturas predominantes en la ZMVM antes mencionadas. Como se observa en la figura 8.7, las zonas urbanas son las que presentan una mayor temperatura, seguidas de las zonas de agricultura y finalmente zonas vegetadas. La temperatura en las zonas de agricultura pueden variar dependiendo de la fase fenológica de los cultivos y del porcentaje de área de suelo descubierto.

Omitiendo la tendencia de la temperatura máxima y media en las zonas urbanas, todas las temperaturas de las demás coberturas e incluyendo la temperatura mínima de la cobertura urbana, presentan una tendencia positiva cuya magnitud varían entre ellas.

Las zonas urbanas presentan la mayor y menor tasa de incremento en la temperatura media y máxima respectivamente. Las zonas vegetadas presentan la mayor y menor tasa de incremento en la temperatura máxima y mínima respectivamente, mientras que las zonas de agricultura prácticamente presentan el mismo incremento en los tres tipos de temperatura.

La temperatura máxima en las zonas urbanas tiene la particularidad de presentar una tendencia negativa de $-0.009^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Se observa que fue en el periodo 1988-1990 cuando la temperatura presentó un decremento de casi un grado, a partir de ese periodo son pocos los años que rebasan los 24°C en comparación con los años posteriores al periodo mencionado. Las causas de esta particularidad deben ser estudiadas a profundidad en trabajos futuros.

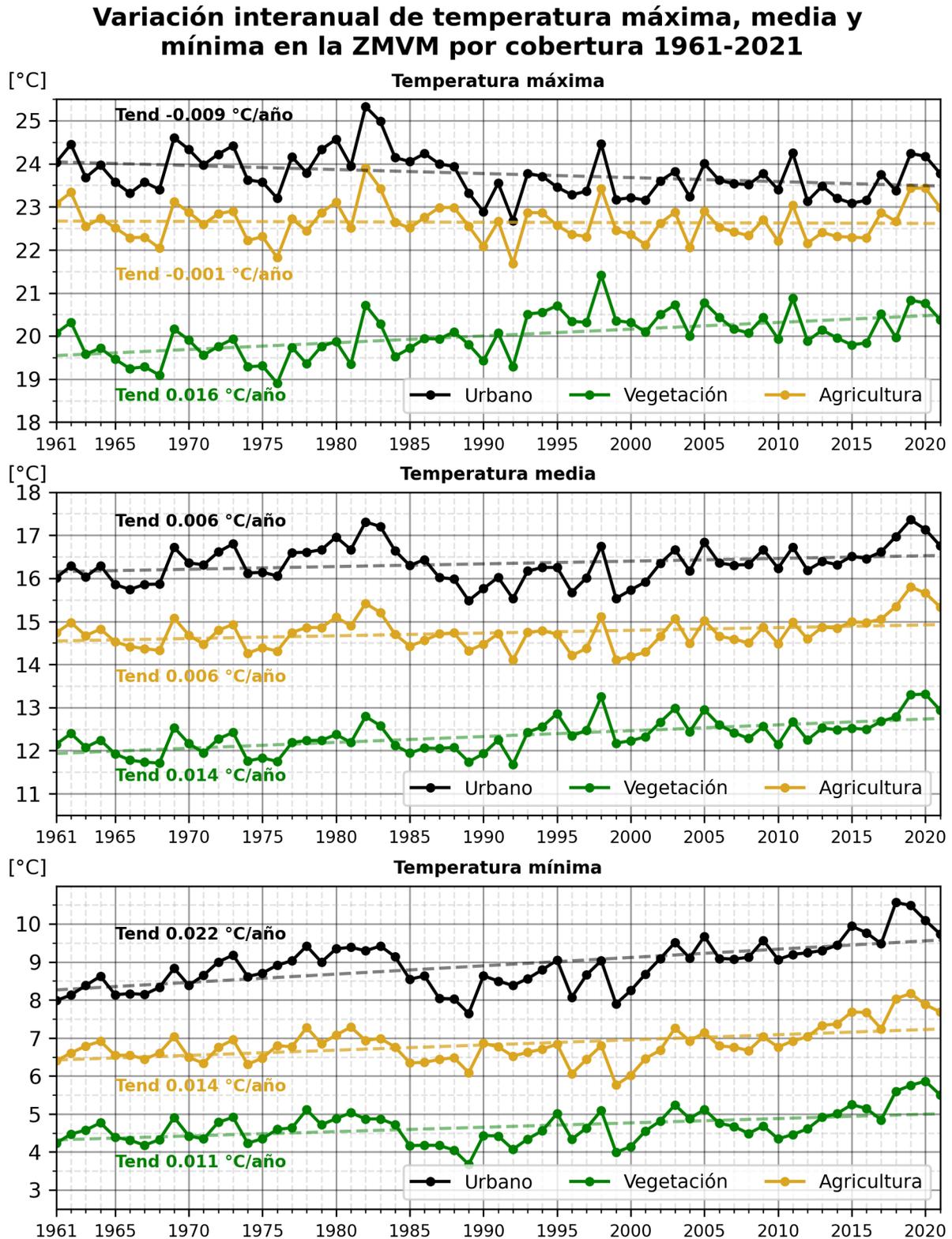


Figura 8.7: Series de tiempo de la temperatura máxima, media y mínima anual en la ZMVM por cobertura 1961-2021.

8.2.2. Tendencias e incrementos

Las tendencias que se muestran en las figuras 8.5 y 8.7 representan una generalización (mediante el promedio) de las tendencias que se observan en la ZMVM, sin embargo, existen variaciones de mayor o menor magnitud cuando se analiza espacialmente la ZCM.

La figura 8.8 muestra la tendencia anual de la temperatura máxima, media y mínima calculada mediante regresión lineal. El norte de la ZCM presenta una tasa de decremento de temperatura máxima de hasta -0.03 °C/año, así como las alcaldías norte y centro de la CDMX con una magnitud de hasta -0.02 °C/año.

En zonas cercanas al norte de la ZCM, la temperatura mínima presenta valores de 0.04 °C/año y alcanza magnitudes de hasta 0.08 °C/año, casi el doble o cuádruple que las magnitudes en la temperatura máxima.

La tendencia de la temperatura media prácticamente es positiva en toda la ZCM, con magnitudes máximas de hasta 0.06 °C/año en algunas pequeñas regiones de esta.

La figura 8.9 muestra la tendencia promedio por alcaldía.

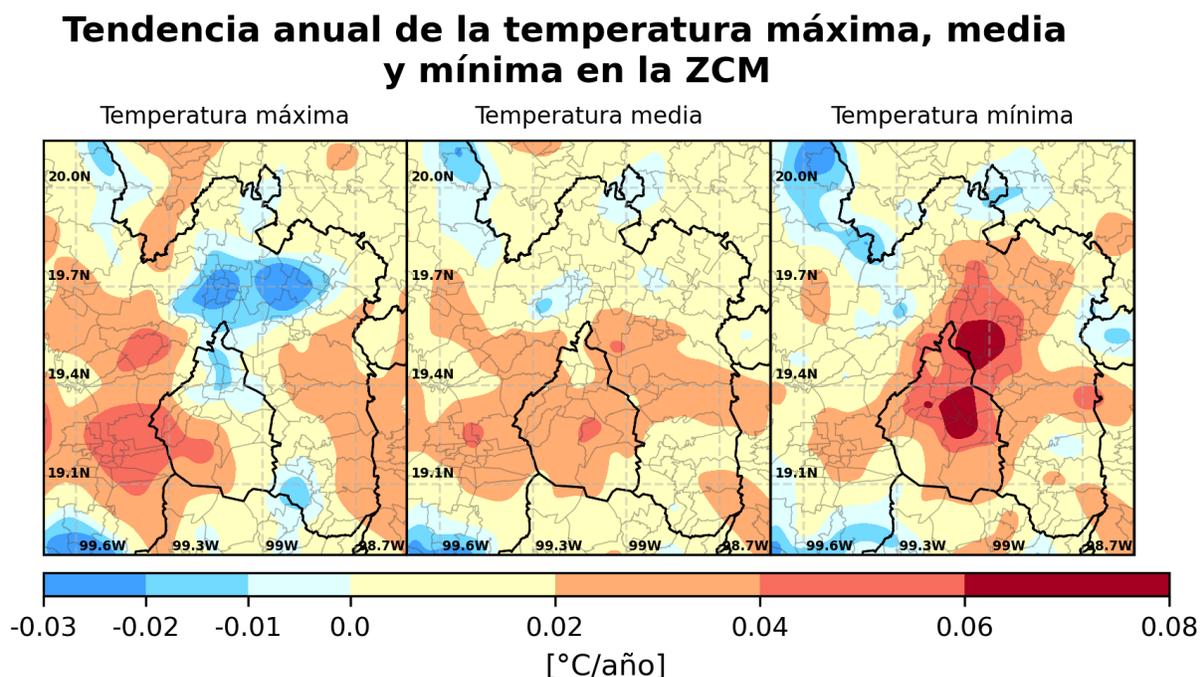


Figura 8.8: Tendencia anual de la temperatura máxima, media y mínima en la ZCM.

Tendencia anual de temperatura máxima, media y mínima y mínima por alcaldía

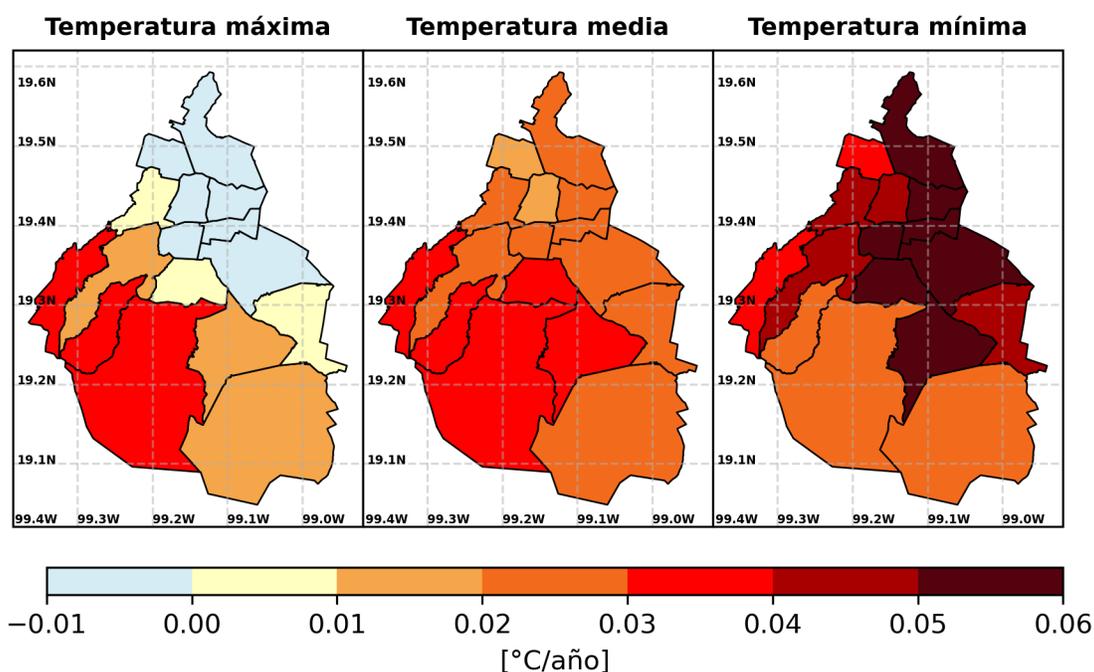


Figura 8.9: Tendencia anual de la temperatura máxima, media y mínima por alcaldía.

A partir de las tendencias generadas se calculó el incremento de la temperatura a lo largo de los 61 años de estudio. El incremento es el resultado de la diferencia entre la temperatura estimada mediante regresión lineal del último año y el primer año de estudio.

En algunas pequeñas regiones de la zona norte de la ZMVM la temperatura máxima presenta decrementos de hasta 2°C , en general se presentan incrementos de la temperatura máxima en la ZMVM. La temperatura mínima presentan los incrementos más altos, con magnitudes de por lo menos 0.5°C hasta 5°C en algunas pequeñas regiones.

Las alcaldías Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Venustiano Carranza, Iztacalco e Iztapalapa presenta un decremento de temperatura de hasta 0.5°C , en contraparte, estas mismas alcaldías son las que presentan un incremento de temperatura mínima de hasta 4°C .

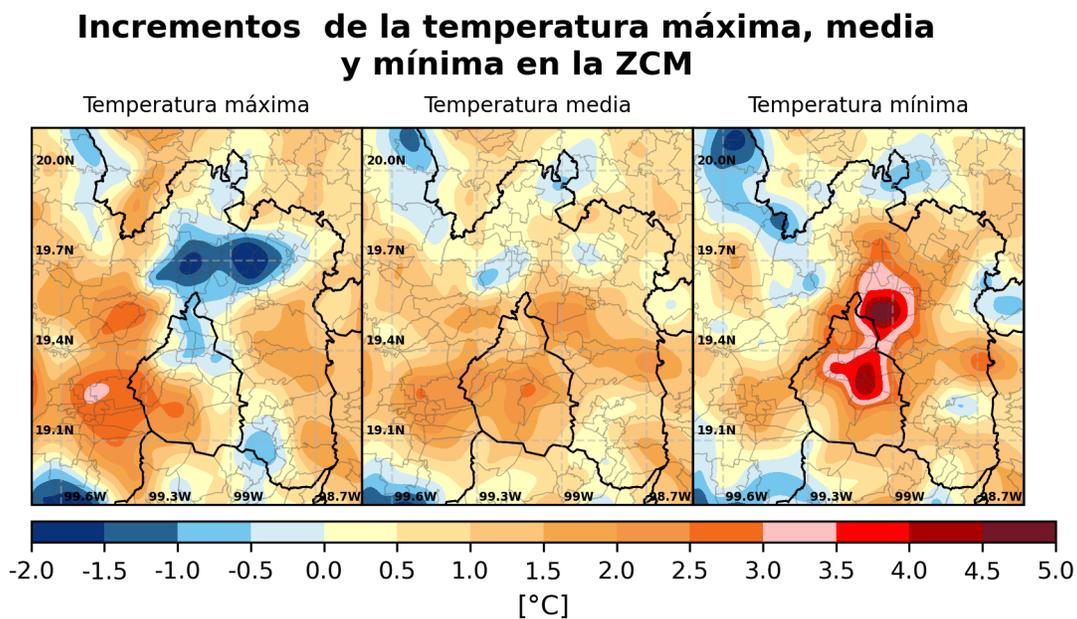


Figura 8.10: Incrementos de la temperatura máxima, media y mínima en la ZMVM.

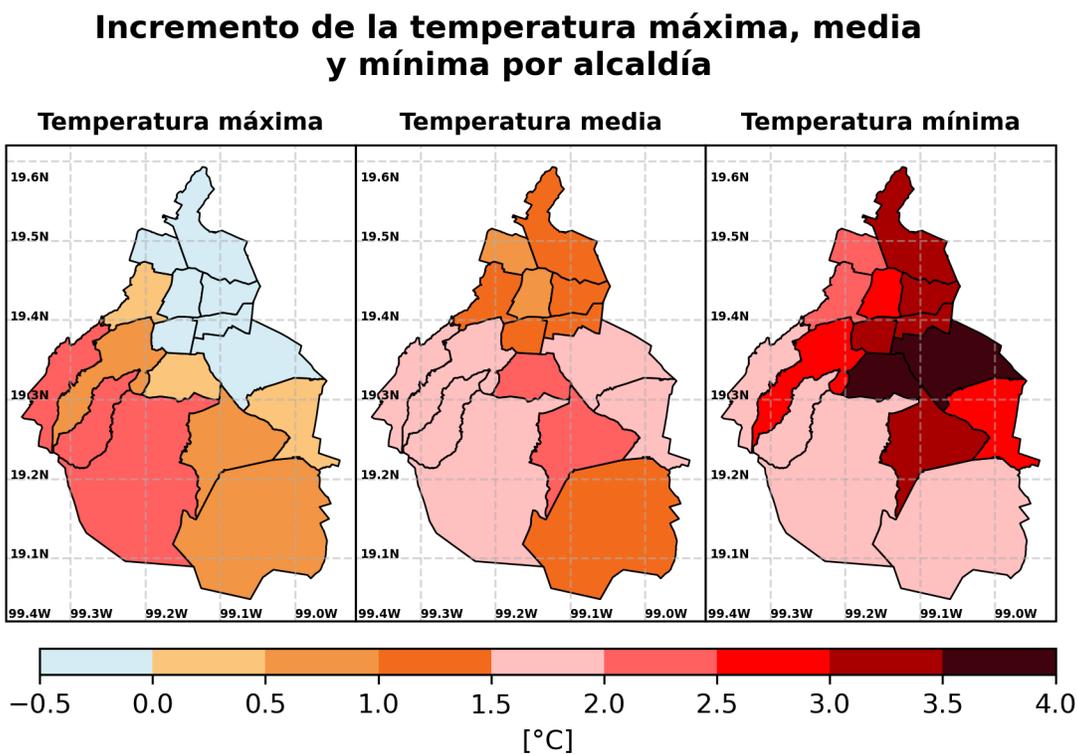


Figura 8.11: Incrementos de la temperatura máxima, media y mínima a nivel alcaldía.

8.3. Variación decadal

Analizar las variaciones de temperatura por década permite observar características y patrones que se asocian a algunos fenómenos como lo es el cambio climático. La figura 8.12 muestra las anomalías de temperatura máxima, media y mínima promedio por década en el dominio de la ZCM referidas a la climatología 1961-2021.

En los tres tipos de temperatura, las anomalías positivas se concentran a partir de la década de los 90 (1991-2020), siendo las de mayor magnitud las de la temperatura mínima. Las anomalías positivas se distribuyen regionalmente o uniformemente sobre todo el dominio según el tipo; En la temperatura máxima estas se concentran principalmente al poniente de la ZCM, con excepción en la última década donde se observa una distribución más uniforme, salvo algunas regiones como lo son las alcaldías centro y norte de la CDMX. En la temperatura media y mínima en general se observa una distribución uniforme sobre el dominio.

En las primeras dos décadas (1961-1970 y 1971-1980) las anomalías negativas se concentran principalmente en el poniente y sur poniente de la ZCM, mientras que en la temperatura mínima, las anomalías negativas se concentran en el centro de la ZCM, en la temperatura media las anomalías negativas se distribuyen uniformemente.

En promedio las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez, Venustiano Carranza e Iztacalco presentan anomalías positivas de temperatura máxima en las tres primeras décadas del estudio, mientras que en las tres últimas presentan anomalías positivas. Tanto las anomalías negativas como positivas se encuentra en el mismo rango de magnitud (0°C a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$), el orden temporal de las anomalías explica la tendencia negativa que se presentó en las figuras 8.7 y 8.8. Dado que el mismo número de décadas presentan un incremento positivo y negativo en el mismo rango de magnitud, se concluye que a pesar de que las zonas urbanas presentan una tendencia negativa, el incremento neto (cuyo resultado es un decremento) de la temperatura máxima no es significativo.

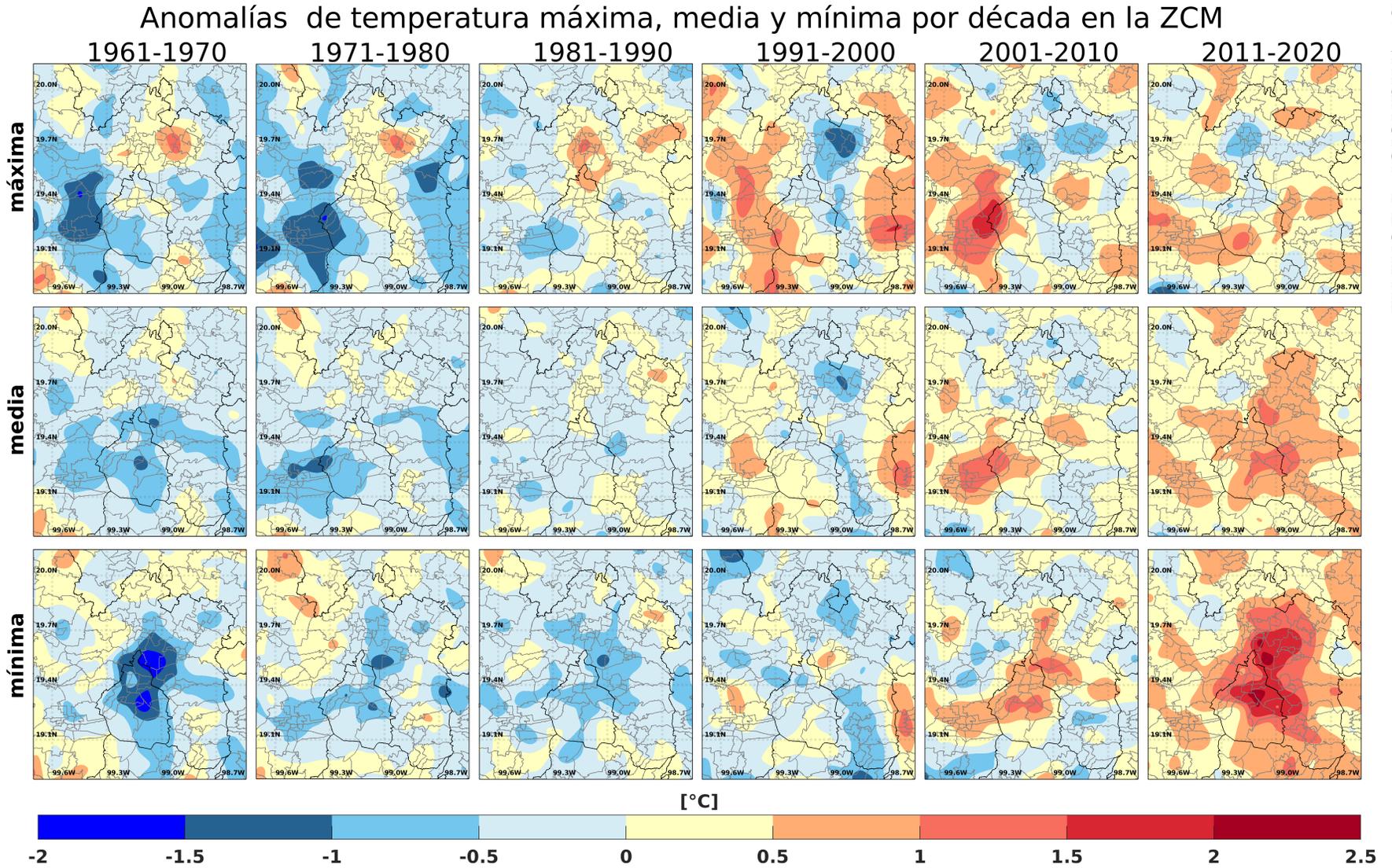


Figura 8.12: Anomalías de temperatura máxima , media y mínima por década en la ZCM.

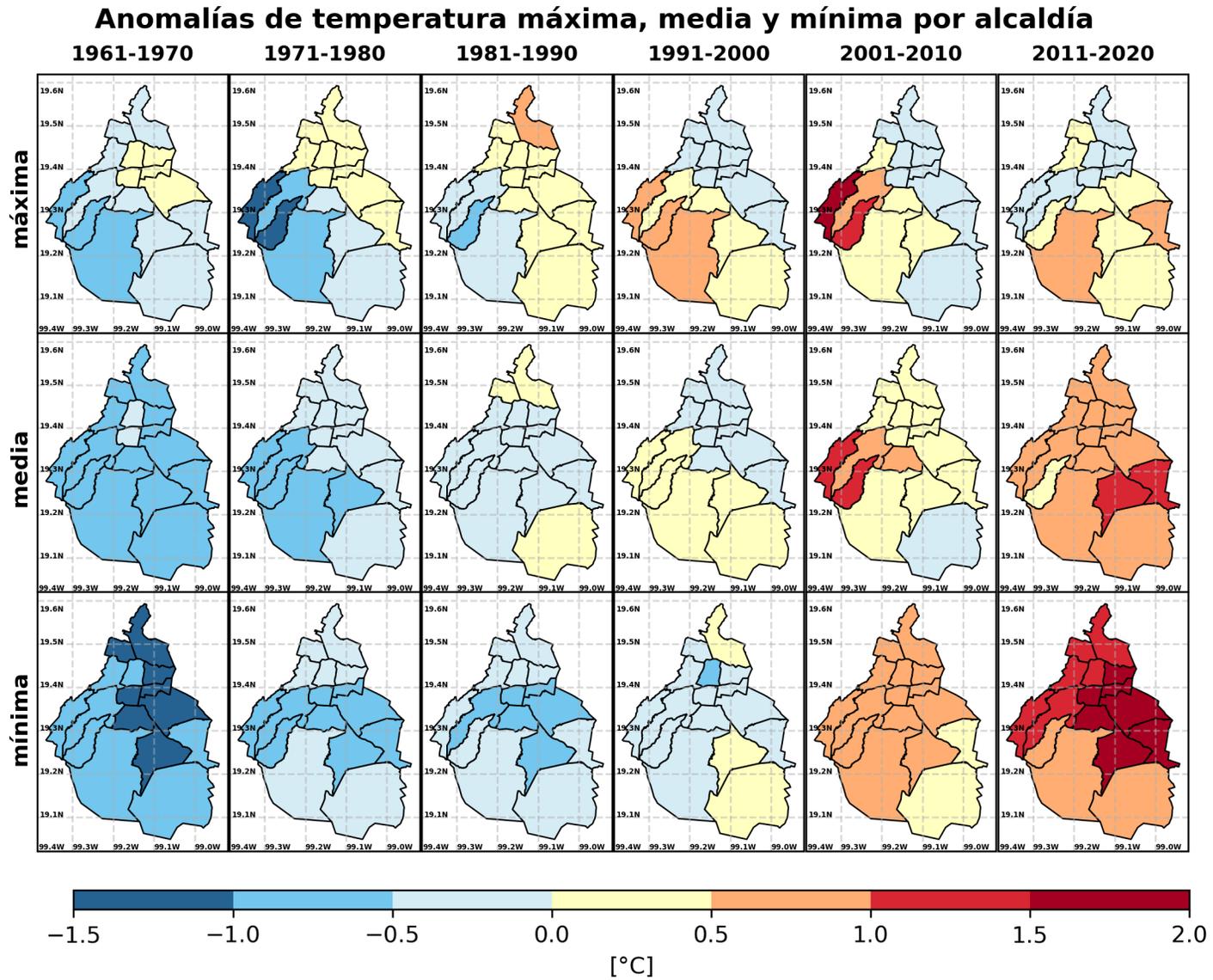


Figura 8.13: Anomalías de temperatura máxima, media y mínima por década nivel alcaldías.

En contraparte, la temperatura media y mínima presentan anomalías negativas en la primera década y aumentan de magnitud hasta ser positivas conforme avanza el tiempo. Las alcaldías Iztacalco, Iztapalapa, Benito Juárez, Coyoacán, Xochimilco y Tláhuac son las que presentan mayor incremento de temperatura mínima.

La figura 8.14 muestra las anomalías y temperaturas promedio de la ZMVM por década. La temperatura máxima y media presentan anomalías positivas a partir de la década 1991-2000, mientras que la temperatura mínima presenta anomalías positivas desde la década de 2001-2010, siendo la última década (2011-2020) la de mayor magnitud entre todas las décadas y tipos de temperatura.

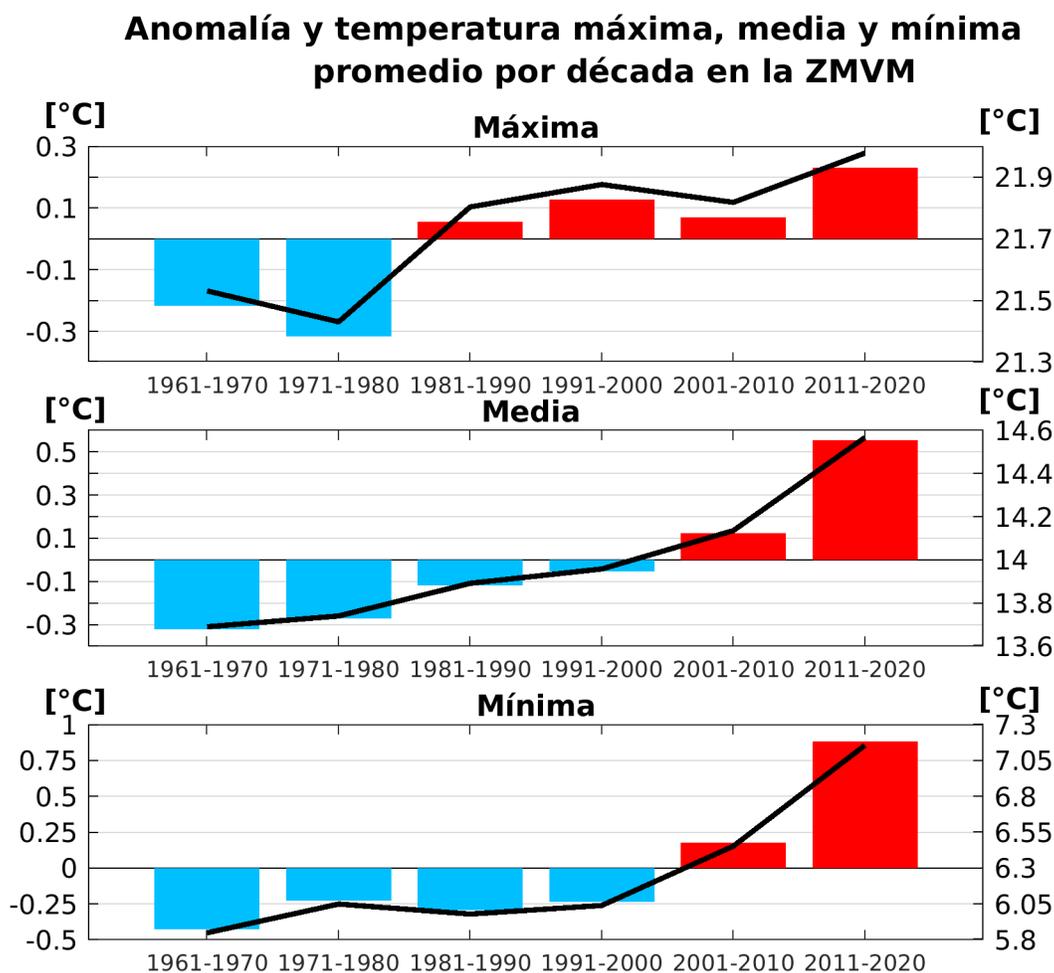


Figura 8.14: Anomalías (barras) respecto a la climatología 1961-2021 y temperaturas (líneas) promedio por década.

8.4. Percentiles de temperatura

En esta sección se presentan los percentiles anuales y mensuales de temperatura, calculados considerando cada día como un dato independiente. Es decir, no se calcularon percentiles

para cada día calendario específico, sino que se generó un único conjunto de datos ordenados de menor a mayor para determinar los percentiles.

Se calcularon los percentiles 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 y 99. Sin embargo, solo se analizarán espacialmente los percentiles 10 y 90 (ver figura 8.15), ya que estos valores representan los límites del rango que contiene el 80

■ **Percentil 10 de temperatura máxima:**

En las alcaldías del centro, norte y oriente de la Ciudad de México, el 10 % de las temperaturas máximas registraron valores inferiores a 21°C.

En las demás alcaldías, las temperaturas máximas mínimas oscilan entre 10°C (en zonas más altas como el Ajusco) y 20°C.

El resto de la ZCM muestra valores similares distribuidos regionalmente.

■ **Percentil 10 de temperatura media:**

El 10 % de las temperaturas medias en la ZCM estuvieron entre 9°C y 15°C, dependiendo de la región. En zonas elevadas como el Ajusco y el Parque Izta-Popo, las temperaturas medias mínimas variaron desde 9°C hasta -2°C.

■ **Percentil 10 de temperatura mínima:**

En prácticamente toda la ZCM, las temperaturas mínimas fueron inferiores a 14°C en el 10 % de los días más fríos.

Las zonas altas presentaron temperaturas mínimas que oscilan entre 0°C y -14°C en estos días.

■ **Percentil 90 de temperatura máxima:**

En el 10 % de los días más cálidos, las temperaturas máximas superaron los 26°C, llegando hasta 30°C en algunas regiones.

Las alcaldías Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Benito Juárez e Iztacalco presentan excepciones a este comportamiento.

■ **Percentil 90 de temperatura media:**

Durante el 10 % de los días más cálidos, las temperaturas medias en toda la ZCM fueron superiores a 20°C.

Las alcaldías mencionadas anteriormente registraron temperaturas medias mayores a 21°C.

■ **Percentil 90 de temperatura mínima:**

En toda la ZCM, durante el 10 % de los días con las temperaturas mínimas más altas, estas estuvieron en el rango de 10°C a 12°C.

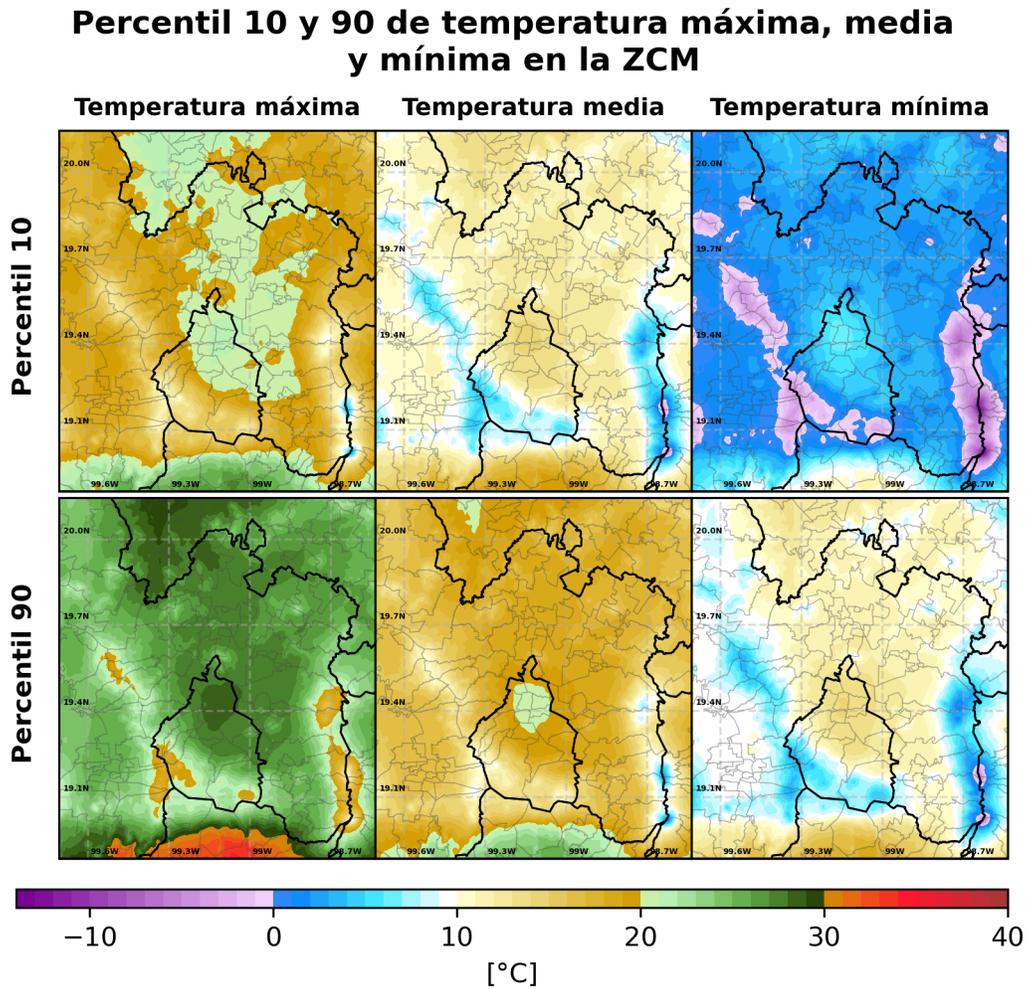


Figura 8.15: Percentil 10 y 90 de temperatura máxima, media y mínima en la ZCM.

La figura 8.16 muestra los percentiles promedio de temperatura máxima, media y mínima por mes.

La temperatura más alta y baja en promedio de todo el periodo de estudio es de 30°C y -3.°C respectivamente, la temperatura más alta se presentó en el mes de abril y la más baja en el mes de enero.

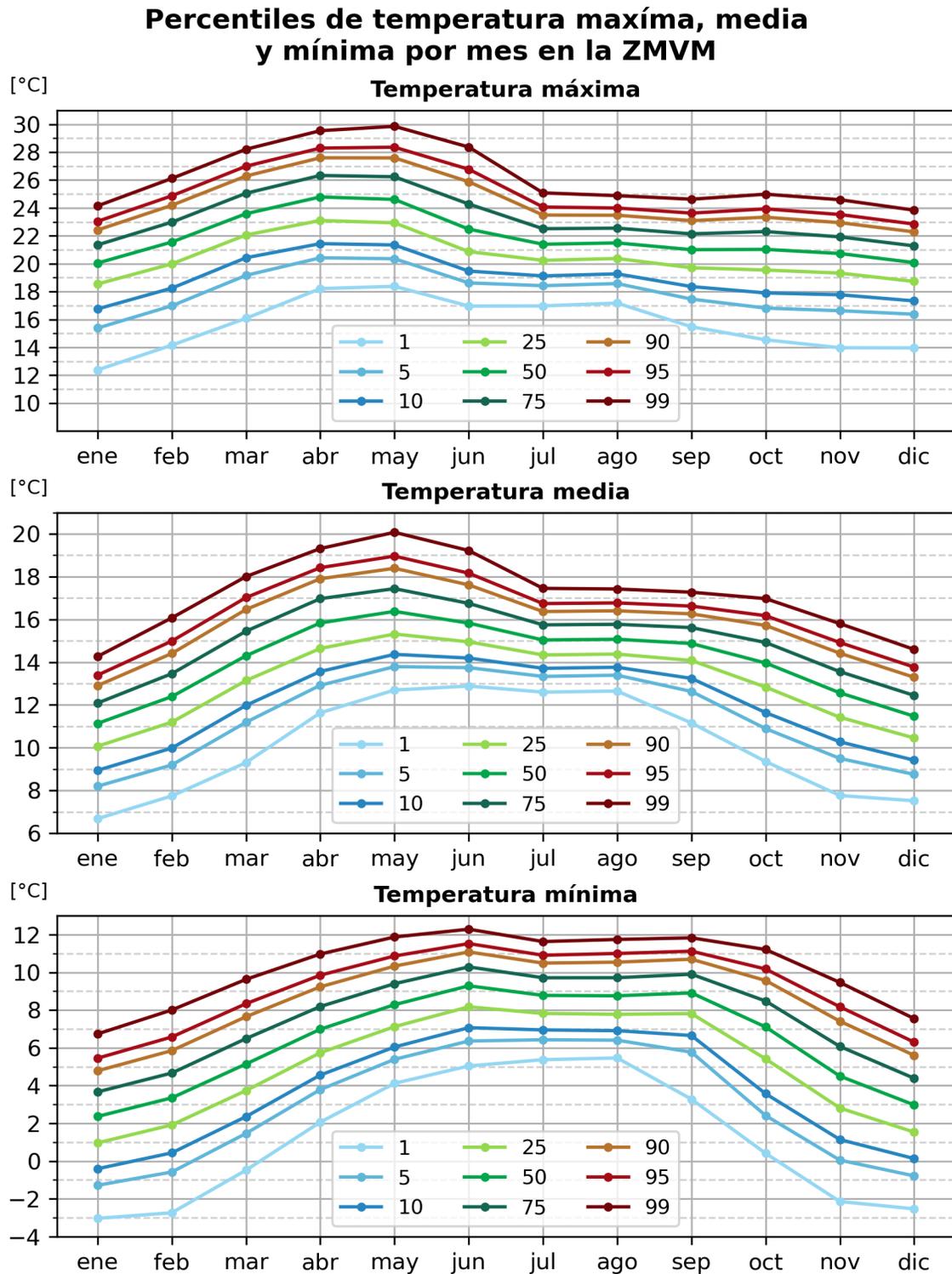


Figura 8.16: Percentiles 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 y 99 promedio de temperatura máxima, media y mínima por mes en la ZMVM.

8.5. Variaciones de rango diurno

8.5.1. Variación estacional

El rango diurno presenta variaciones espaciales y temporales. La figura 8.17 muestra la variación estacional del rango diurno. Esta variación presenta una oscilación que alcanza su máxima amplitud en el mes de marzo y su mínima amplitud en el mes de septiembre.

A diferencia de la temperatura máxima más alta, el rango diurno más grande ocurre en el mes marzo, esto debido a que en marzo hay menor lluvia y humedad del suelo.

La ocurrencia temporal del menor rango diurno en septiembre se explica por la presencia de precipitación en la ZCM, lo que implica una reducción de la radiación solar debida a la nubosidad y un enfriamiento de la superficie debido a la precipitación.

Espacialmente se presentan distintas magnitudes de rango diurno en la ZCM (sin importar el mes de estudio). En la figura 8.18 se observa que el rango diurno de menor magnitud se presenta en prácticamente en toda la CDMX y el rango diurno de mayor magnitud se presentan en los alrededores de esta.

Esta variación espacial posiblemente puede ser debida a las propiedades físicas de las coberturas (como el albedo, la velocidad de absorción y emisión de radiación), características topográficas y la rugosidad del terreno.

En la CDMX, las coberturas predominantes son el concreto y el asfalto, dos coberturas que absorben gran cantidad de radiación para posteriormente emitirla a una baja velocidad en comparación con las coberturas vegetales, cuyas propiedades físicas permiten absorber mayor radiación solar y emitirla más rápidamente a través de procesos como la evapotranspiración.

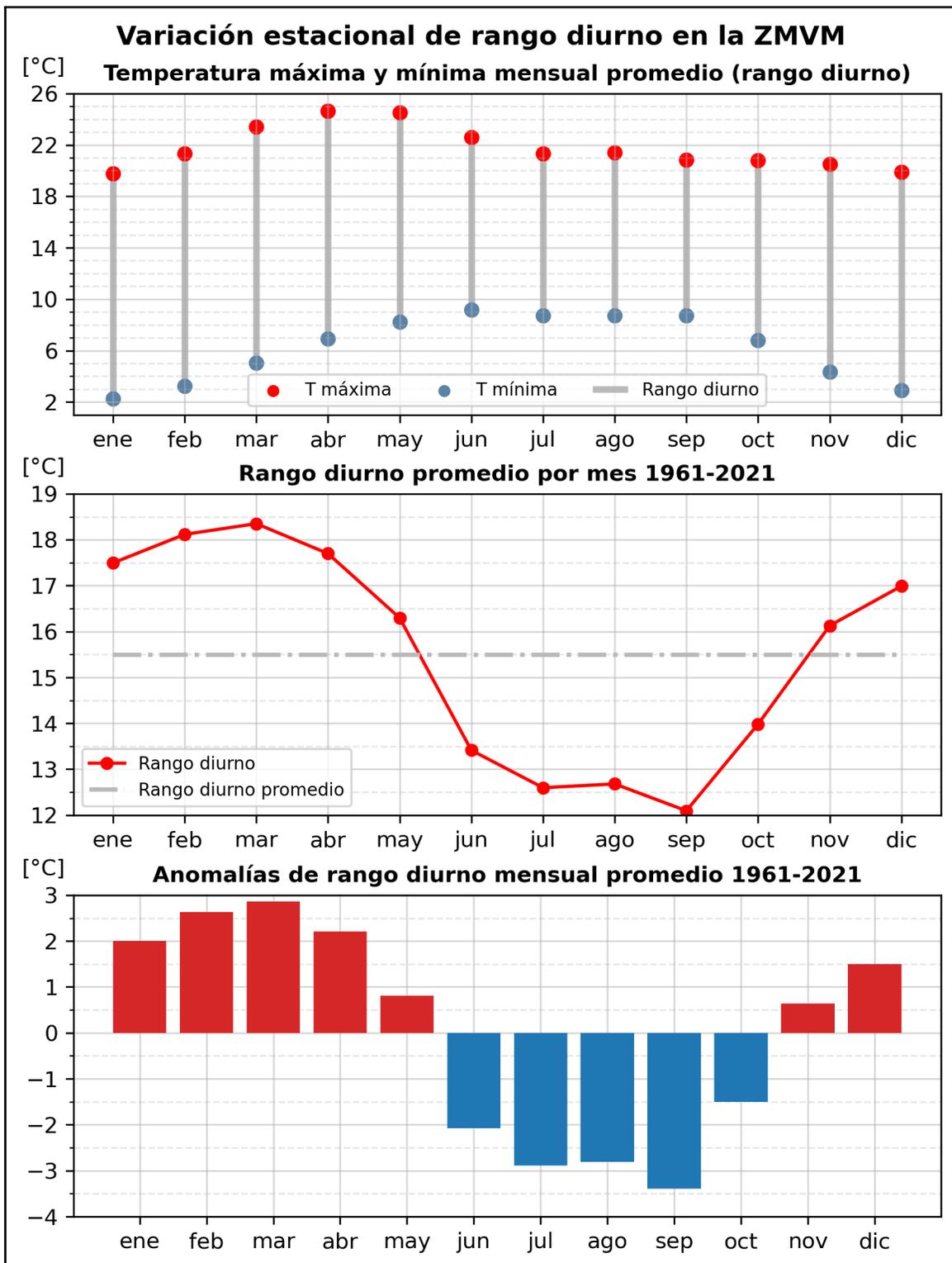


Figura 8.17: Variación estacional de rango diurno en la ZMVM.

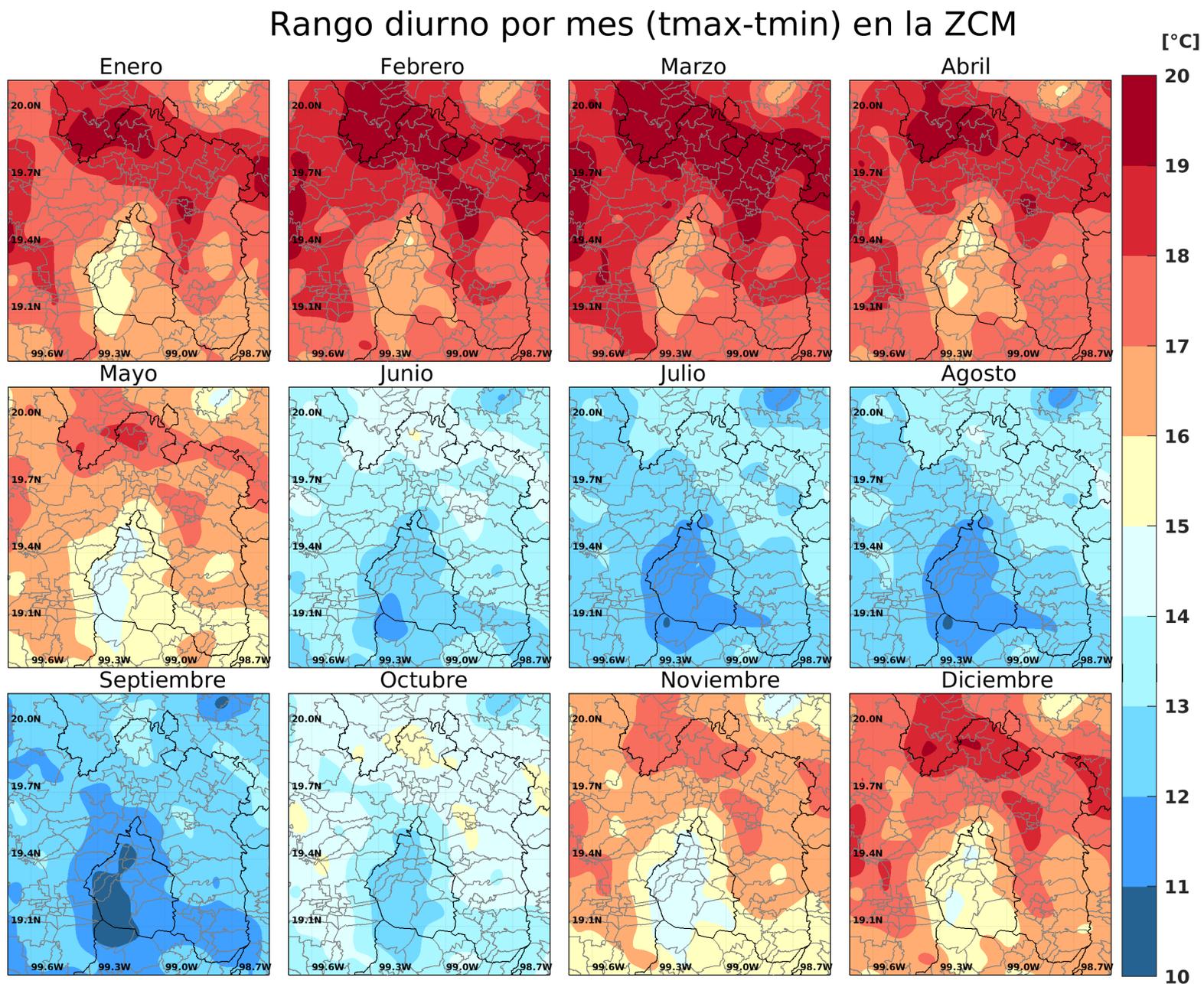


Figura 8.18: Mapas de variación estacional de rango diurno en la ZCM.

8.5.2. Variación interanual

El rango diurno promedio en la ZMVM es de 15.47 °C, la magnitud más baja del rango diurno se presentó en 2015 con 14.01 °C, mientras que la magnitud más alta se presentó en 1998 con 16.44 °C.

Mediante regresión lineal, se evaluó la tendencia temporal del rango diurno en la ZMVM. Los resultados indican un decremento anual del rango diurno de 0.013°C, lo que sugiere que el rango diurno está disminuyendo a lo largo del tiempo. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido es 0.17, lo que implica que el modelo de regresión explica el 17% de la variabilidad observada en los datos. Aunque el valor de R^2 no es muy alto, sí evidencia una tendencia decreciente en el rango diurno que podría estar asociada a cambios climáticos o factores urbanos en la región.

La gráfica de anomalías del rango diurno promedio anual (tercera gráfica de la figura 8.19) revela un comportamiento decadal con fluctuaciones claras.

Durante las décadas de 1960 y 1970 predominan anomalías positivas, mientras que en la década de 1980 se observa un periodo de anomalías negativas.

A partir de los años 90 y hasta principios de los 2000, las anomalías positivas vuelven a dominar, pero después de 2010 se destaca una tendencia negativa constante, con anomalías por debajo de la media histórica, lo que refleja un marcado decremento del rango diurno en los últimos años.

Esto confirma la tendencia observada de una disminución general del rango diurno en la región.

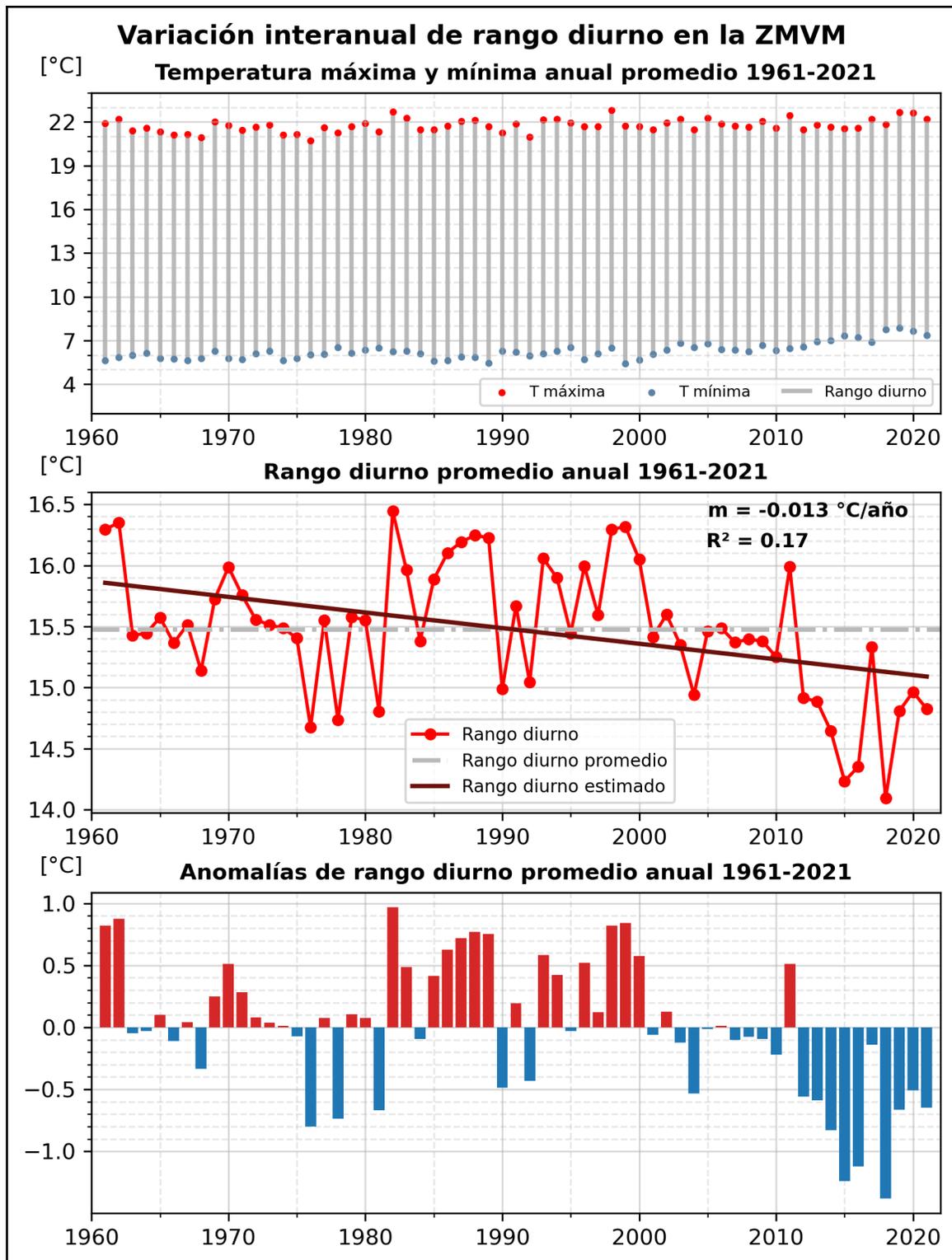


Figura 8.19: Variación interanual del rango diurno en la ZMVM.

8.6. Eventos extremos

8.6.1. Días cálidos

Para determinar el año y los meses en los que se presentaron el mayor número de días cálidos, se determinó el número de días cálidos promedio por mes en la ZMVM para cada año del periodo de estudio (figura 8.20).

Con 21.53 días en promedio, el mes de mayo de 1998 presentó el mayor número de días cálidos de todo el periodo de estudio, seguido de junio del mismo año con 18.15 días en promedio.

Es hasta finales de los 70 cuando en general se agrupan meses con días cálidos promedio por mes menores a 1, es decir, en las décadas de 1961-1970 y 1971-1980 existieron regiones pequeñas en la ZMVM con días cálidos que promediadas sobre la extensión de la ZMVM dan valores menores a 1. Conforme avanza el tiempo el número de días cálidos aumenta.

Durante todo el período de estudio, en abril y julio de 1976 y en febrero de 2010, no ocurrieron días cálidos.

La serie de tiempo del número de días cálidos promedio por año (figura 8.21) muestra una tendencia de incremento tanto en el número e intensidad de días cálidos, por lo que se concluye que cada vez tendremos más días cálidos con mayor intensidad.

Para analizar las variaciones espaciales de los días cálidos, se generó el promedio de días cálidos por década (figura 8.22).

Como se mencionó anteriormente, en las primeras dos décadas el número de días cálidos era menor en comparación con las demás décadas, sin embargo, en estas décadas en la zona norte de la ZMVM se presenta una pequeña región con un número de días cálidos considerables. En la década de 1981-1990 en el centro y norte de la CDMX, así como el norte y oriente de la ZMVM se concentraron el mayor número de días cálidos.

En las últimas tres décadas, existen regiones con una persistencia espacial de más de 60 días cálidos en el poniente y sur de la ZMVM, además se integran nuevas regiones en las que se presentan más de 50 días cálidos en el dominio de la ZMVM.

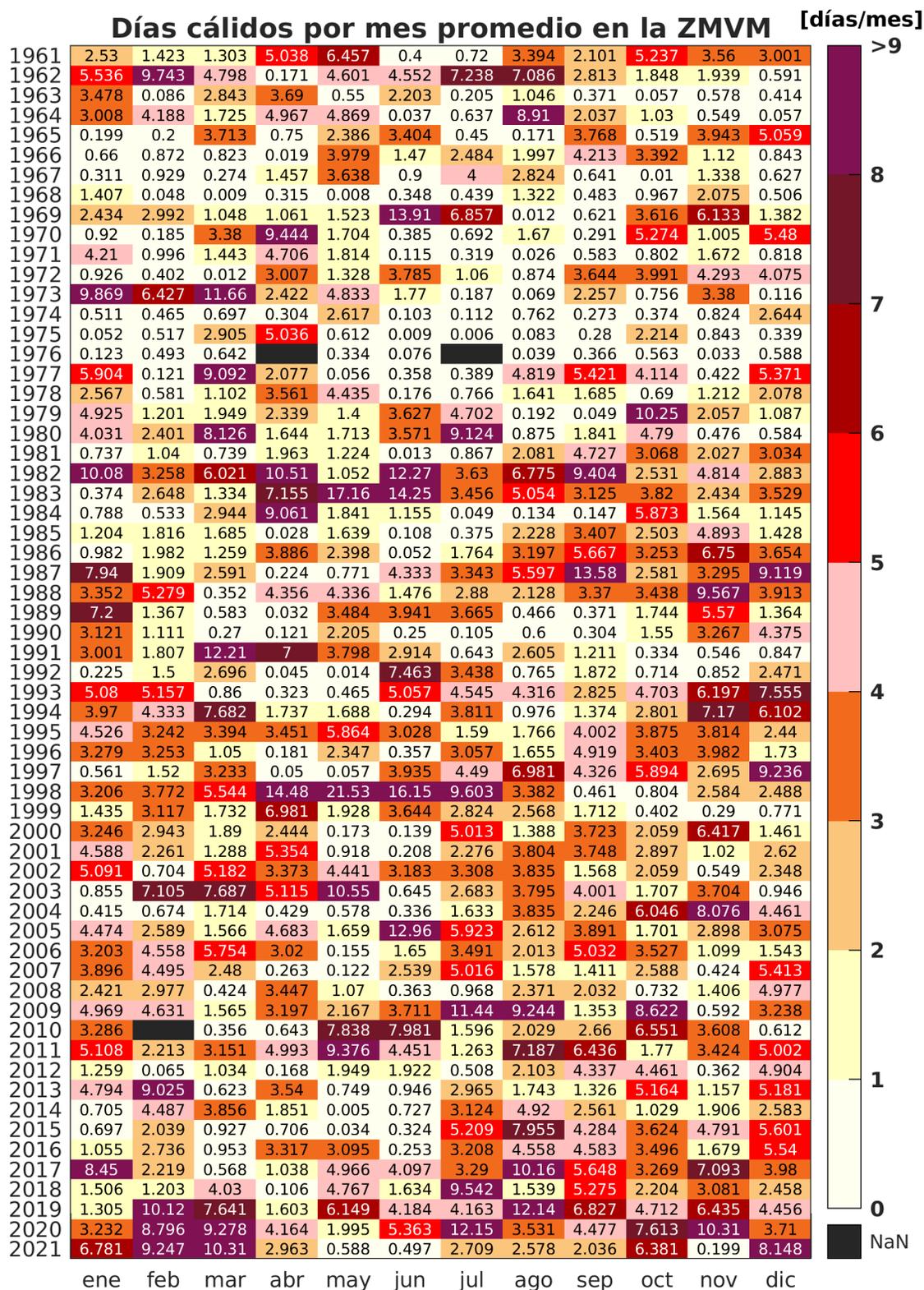


Figura 8.20: Número de días cálidos promedio por mes en la ZMVM 1961-2021.

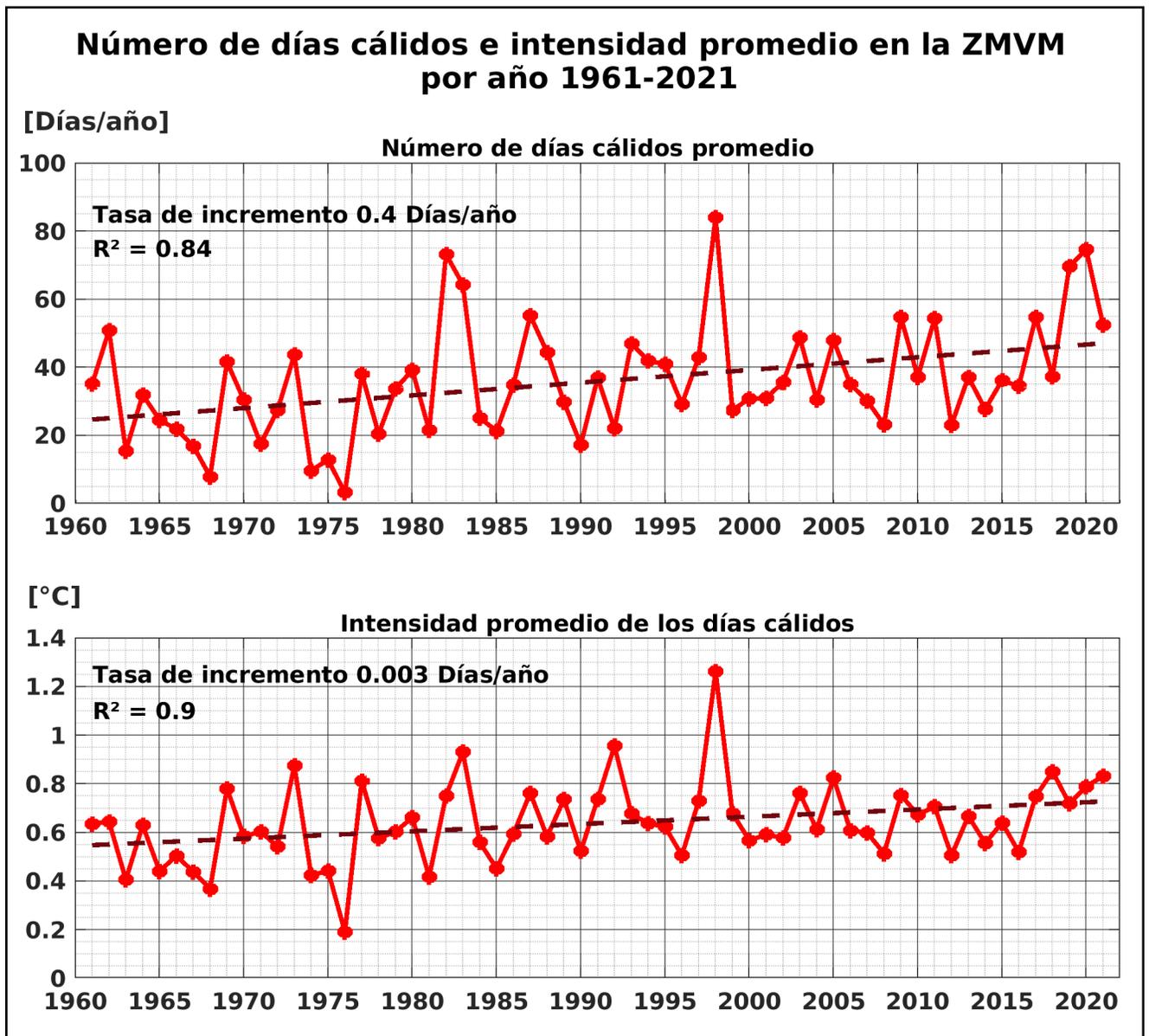


Figura 8.21: Número e intensidad de días cálidos promedio anual 1961-2021.

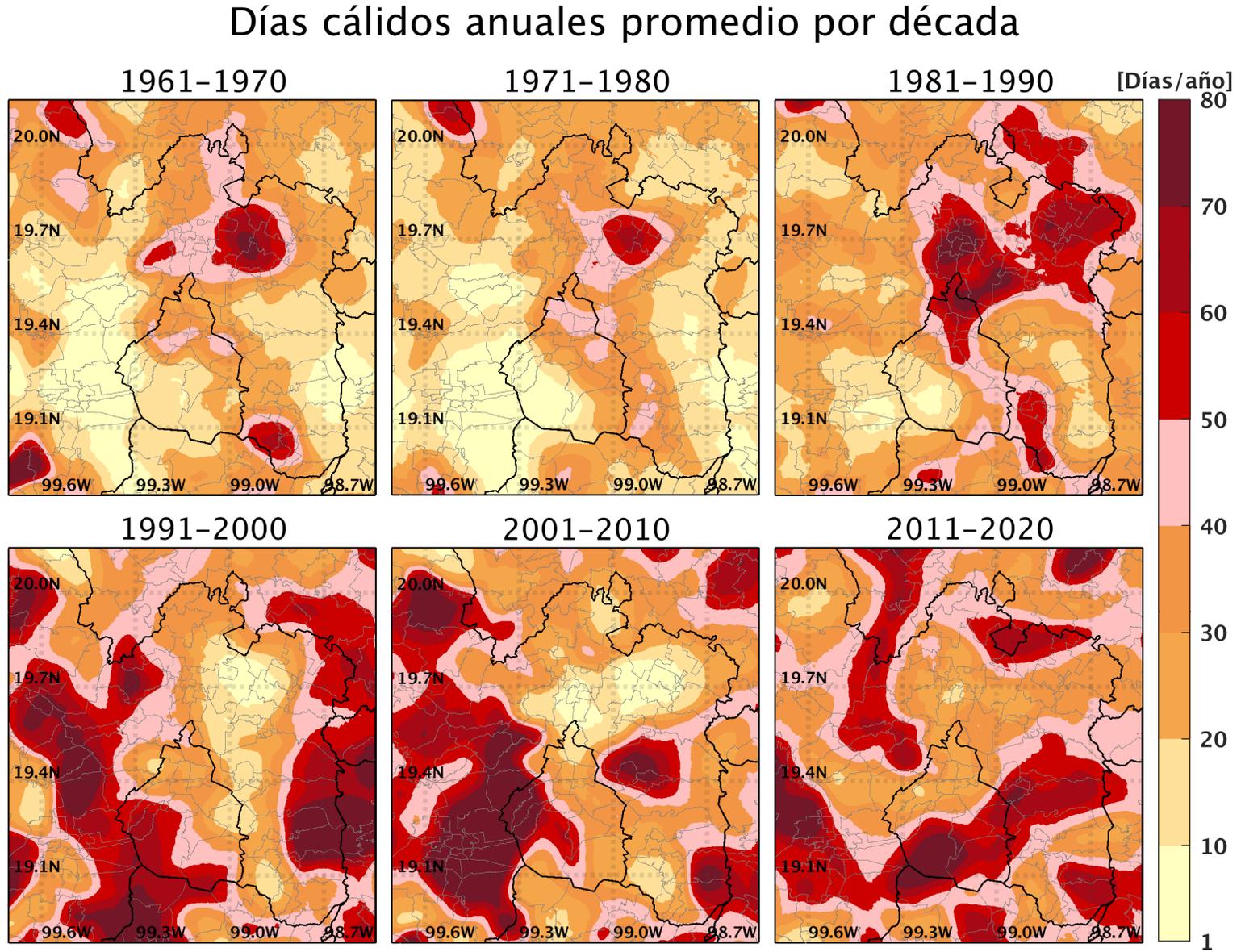


Figura 8.22: Mapas de días cálidos anuales promedio por década en la ZCM.

8.6.2. Noches frías

Al igual que los días cálidos, se calculó el número de noches frías promedio por mes en la ZMVM para cada año del periodo de estudio (figura 8.23).

De manera casi opuesta a los días cálidos, el mayor número de noches frías se concentran principalmente en las primeras 4 décadas del periodo de estudio (1961-2000), en las dos últimas décadas el número de noches frías promedio disminuyó considerablemente, salvo los meses de octubre, noviembre y diciembre del 2010 y septiembre y octubre del 2011.

Con 15.4 noches frías en promedio, el mes de octubre de 1979 se presentó el mayor número de noches frías de todo el periodo de estudio, seguido de marzo de 1986 con 14.94 noches frías en promedio.

En noviembre de 1972 y 1978 y octubre de 2019 y 2004 se observa la particularidad de la ausencia de noches frías, estas particularidades deben ser analizadas a mayor profundidad en trabajos futuros.

La figura 8.24 muestra la serie de tiempo de las noches frías promedio anual, a diferencia de la serie de días cálidos, es posible observar una oscilación más consistente pero con frecuencia y amplitud variable entre sí misma. En los años de 1989 y 1999 se presentaron el mayor número de noches frías con prácticamente la misma magnitud (68 noches frías por año). En la década de los 2000 y 2010 se concentran el mayor número de años con menos noches frías, siendo en 2016 el año con menos noches frías (14 noches frías).

Los resultados de la regresión lineal aplicada a los promedios anuales confirman el decremento de noches frías observado. Prácticamente cada 3 años se tiene una noche fría menos.

Las noches frías también presentan variaciones espaciales que se sintetizan en los mapas de noches frías promedio por década (figura 8.25). En la década de 1961-1970 las noches frías se concentraban en prácticamente toda la CDMX y los municipios alrededores del nororiente de esta, con magnitudes que iban desde 30 noches frías hasta 90 noches frías por año.

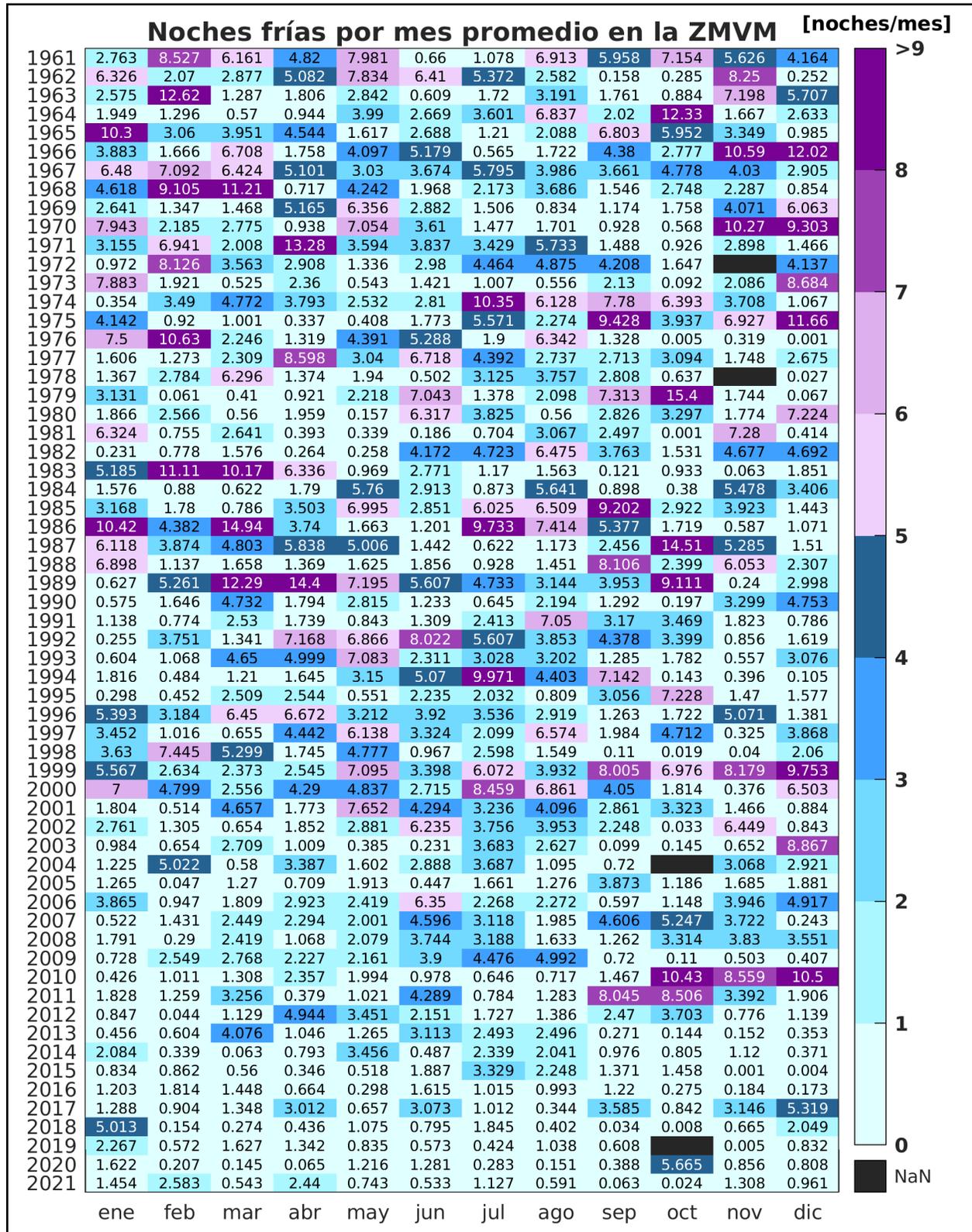


Figura 8.23: Número de noches frías promedio por mes en la ZMVM 1961-2021.

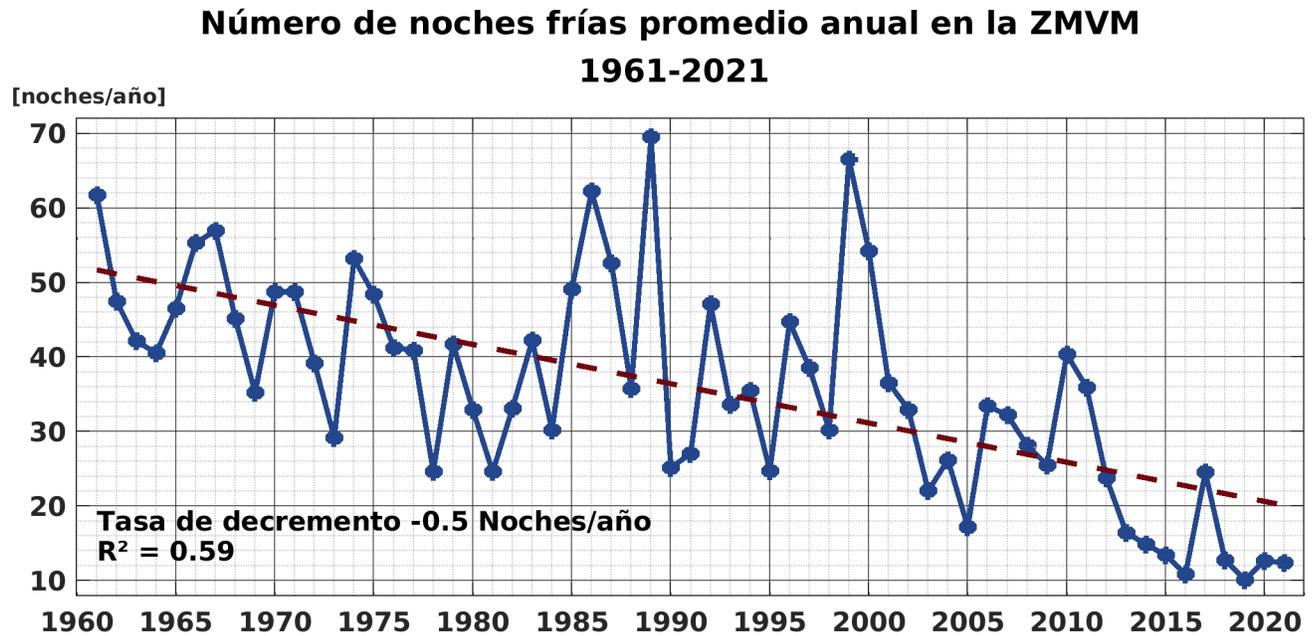


Figura 8.24: Número de noches frías promedio anual en la ZMVM 1961-2021.

En la segunda y tercera década se observa una reducción importante de las noches frías y la ruptura del patrón espacial, en zonas donde en la primera década había hasta 90 noches frías, en la segunda y tercera década había hasta 49 y 59 noches frías respectivamente.

Las últimas dos décadas confirman el decremento en prácticamente toda la ZMVM, el máximo de noches frías que se presentaron en la última década fue de hasta 49 noches frías en el sur-poniente de la ZMVM, mientras que en el resto de la ZMVM ocurrieron entre 19 y 9 noches frías según la región.

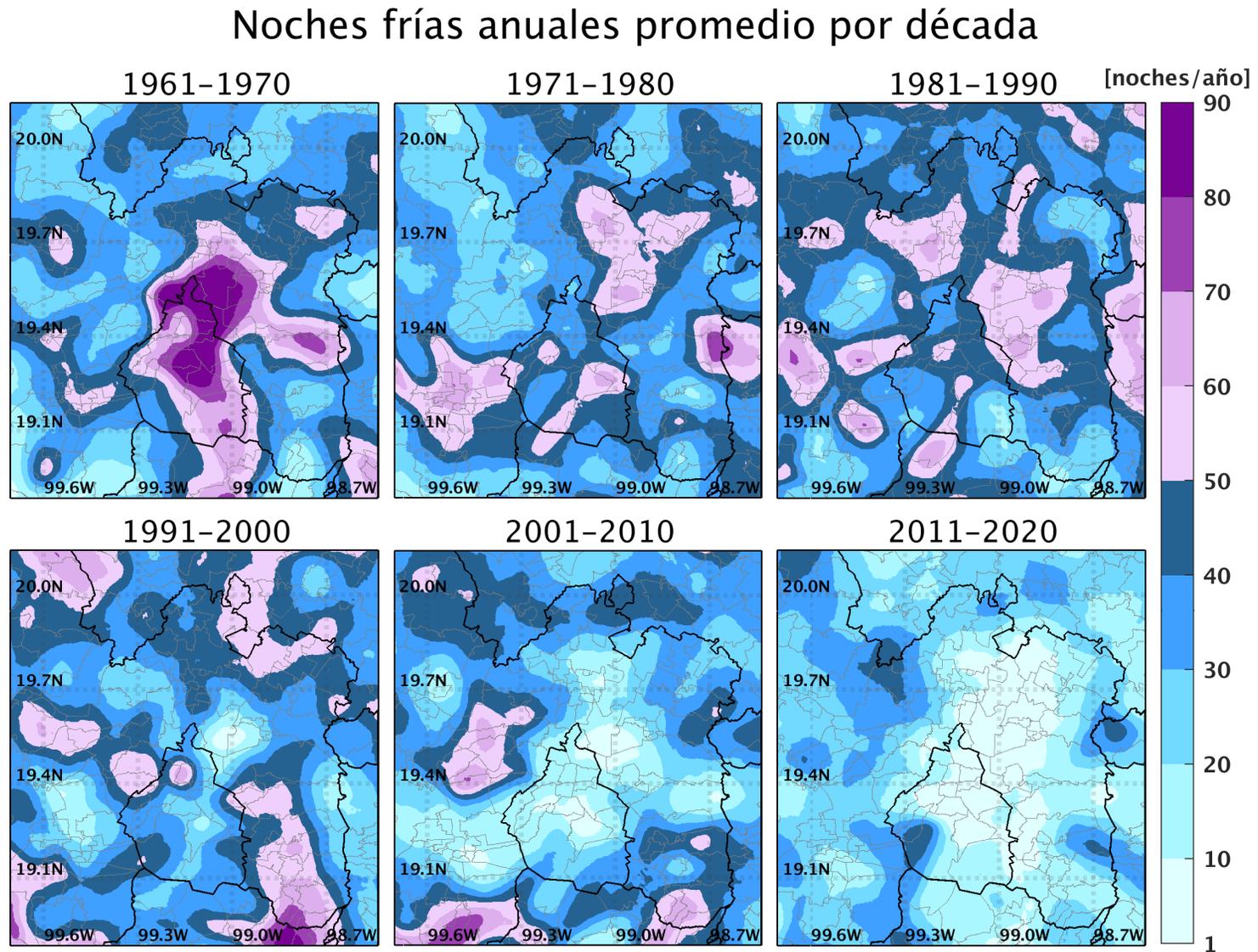


Figura 8.25: Mapas de noches frías anuales promedio por década en la ZCM.

8.6.3. Heladas

A diferencia de los días cálidos y las noches frías, las heladas se agruparon por estaciones para analizar las heladas tempranas (ocurridas en otoño), de invierno y tardías (ocurridas en primavera). La figura 8.26 muestra las heladas por estación promedio en la ZMVM.

Salvo los años 1966 y 2010, la mayor cantidad de heladas ocurrieron en invierno, seguido de otoño (heladas tempranas), primavera (heladas tardías) y finalmente en verano. La existencia de heladas en verano es a causa de la presencia de heladas en prácticamente todo el año en las zonas altas como el Volcán Popocatepetl, por lo que al promediar sobre la superficie de la ZMVM, se obtienen estas heladas con magnitudes menores a 1 en prácticamente todos los años.

El año con mayor número de heladas en invierno ocurrió en 1976 con 24.15 heladas en un mes, seguido de 1963 con 23.55 heladas. Con 18.45 heladas, 1966 es el año con mayor número de heladas ocurridas en otoño, incluso el número de heladas fue mayor que las ocurridas en el invierno de ese año. 2010 fue el segundo año con mayor heladas en otoño (16.94) y también presentó la misma particularidad antes mencionada.

Es evidente el decremento de las heladas sin importar la ocurrencia temporal de estas. La serie de heladas anuales promedio (figura 8.27) muestra una oscilación de amplitud variable que se encuentra en decremento. De acuerdo con los resultados de la regresión lineal aplicada, en promedio sobre la ZMVM, cada 6 años tenemos una helada menos.

Si bien la tendencia calculada permite sacar conclusiones generales sobre lo que ocurre en la ZMVM, esta no es representativa a nivel espacial. Los mapas de heladas promedio por década y por estación (figura 8.28 y 8.29 respectivamente) sí muestran las variaciones espaciales y temporales.

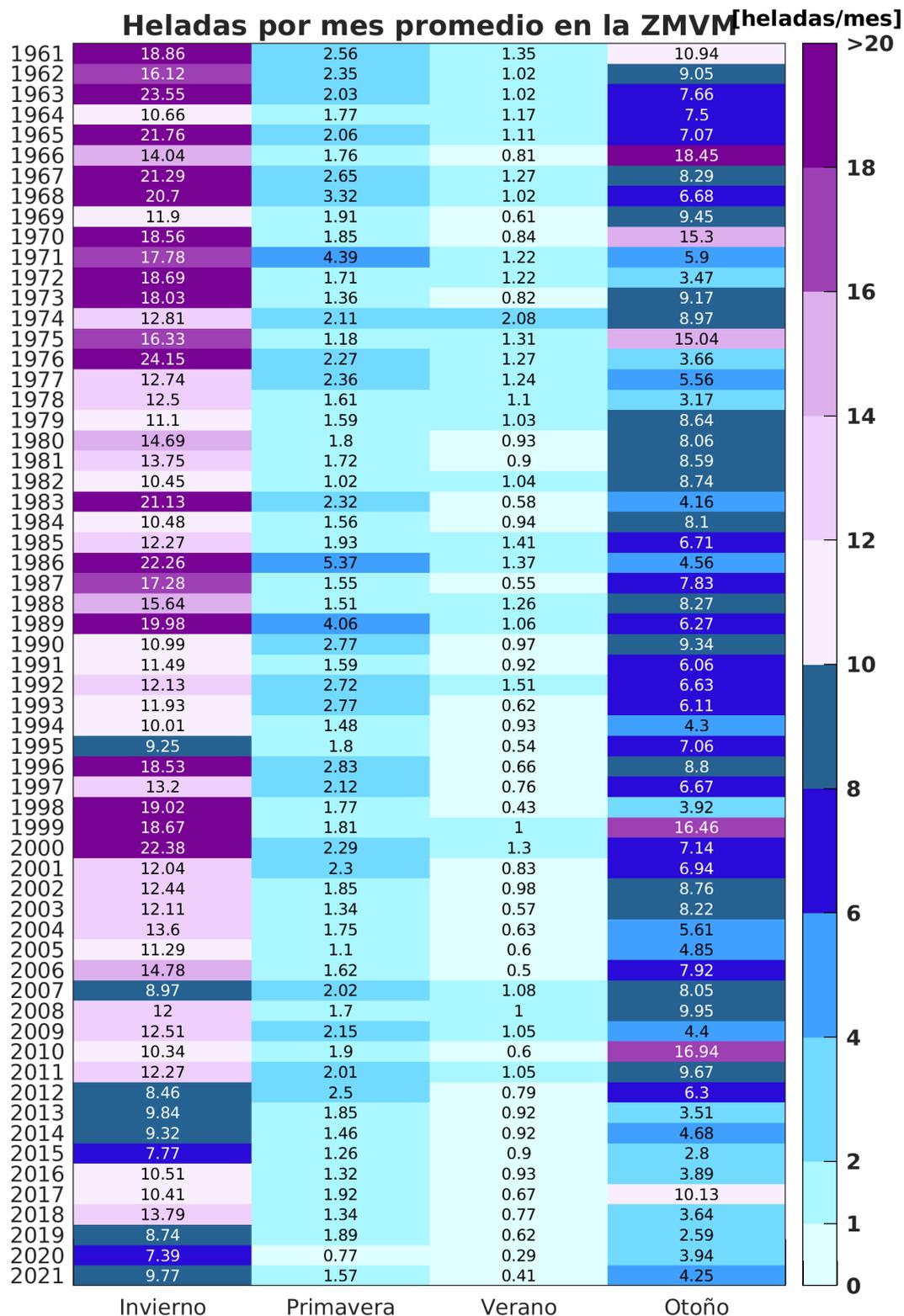


Figura 8.26: Número de heladas promedio por estación en la ZMVM 1961-2021.

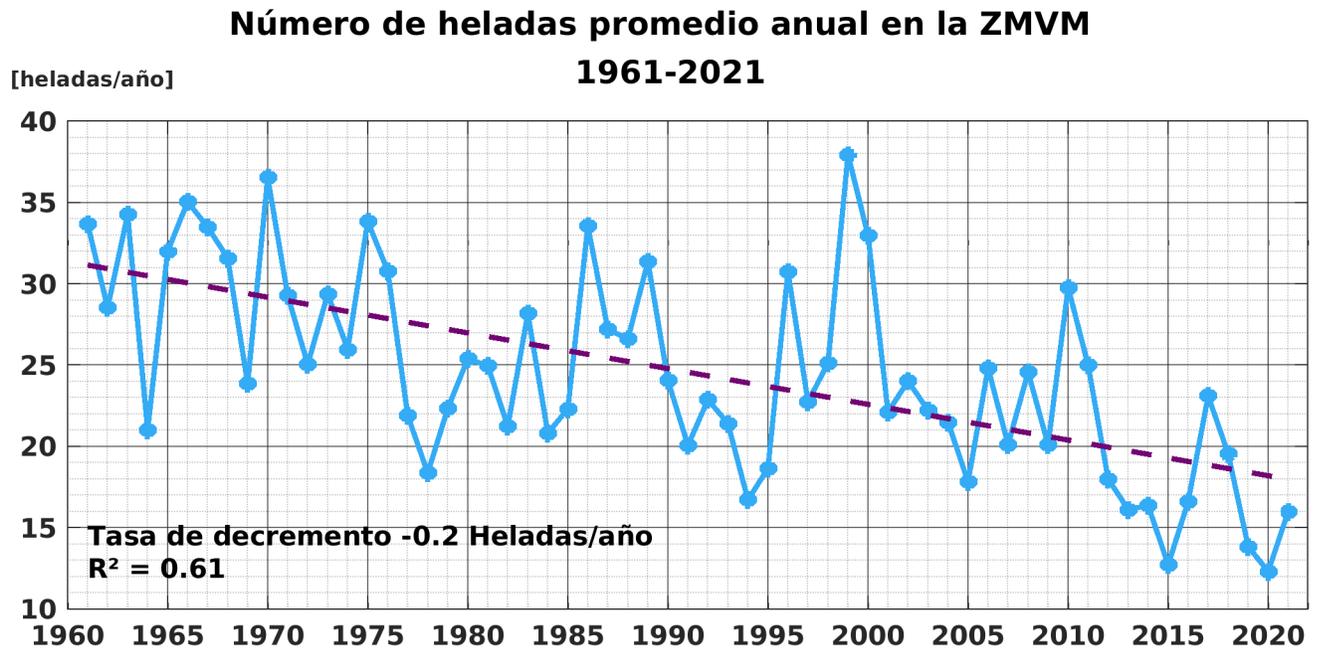


Figura 8.27: Número de heladas promedio anual en la ZMVM 1961-2021.

En la primera década prácticamente toda la ZMVM (excepto las regiones altas) ocurrieron entre 1 y hasta 30 heladas, en regiones altas desde 30 hasta más de 100 heladas por año. Conforme avanza el tiempo se observa el decremento de las heladas en las regiones de la ZMVM, de tal manera que en la última década no ocurren más de 5 heladas en prácticamente toda la ZMVM (salvo las regiones altas).

En las alcaldías de la CDMX se observa un fenómeno bastante importante, desde la segunda década en algunas alcaldías se dejaron presentar heladas al punto que desde la cuarta década y hasta la fecha no se han presentado heladas en estas mismas alcaldías.

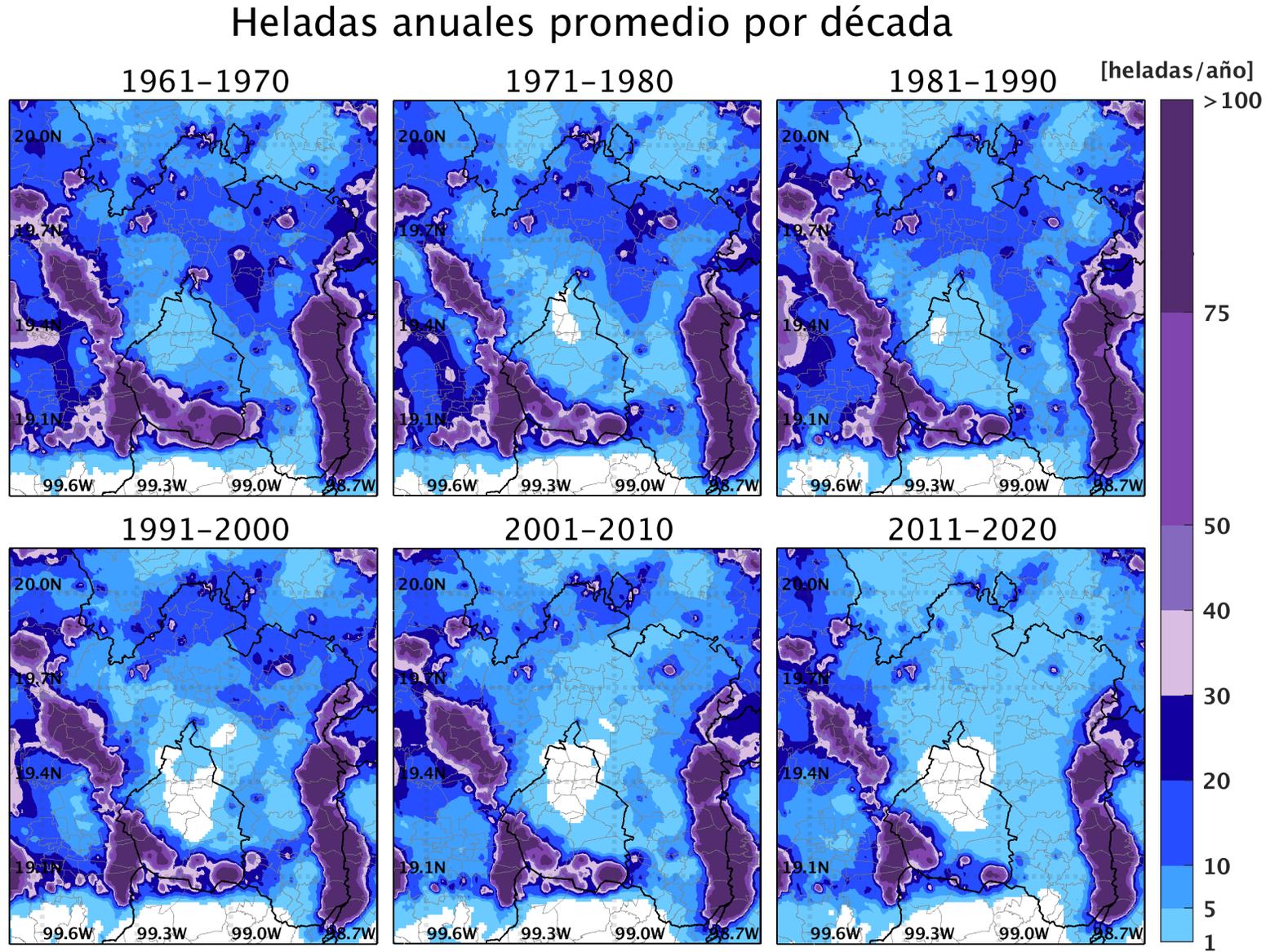


Figura 8.28: Mapas de heladas anuales promedio por década en la ZCM.

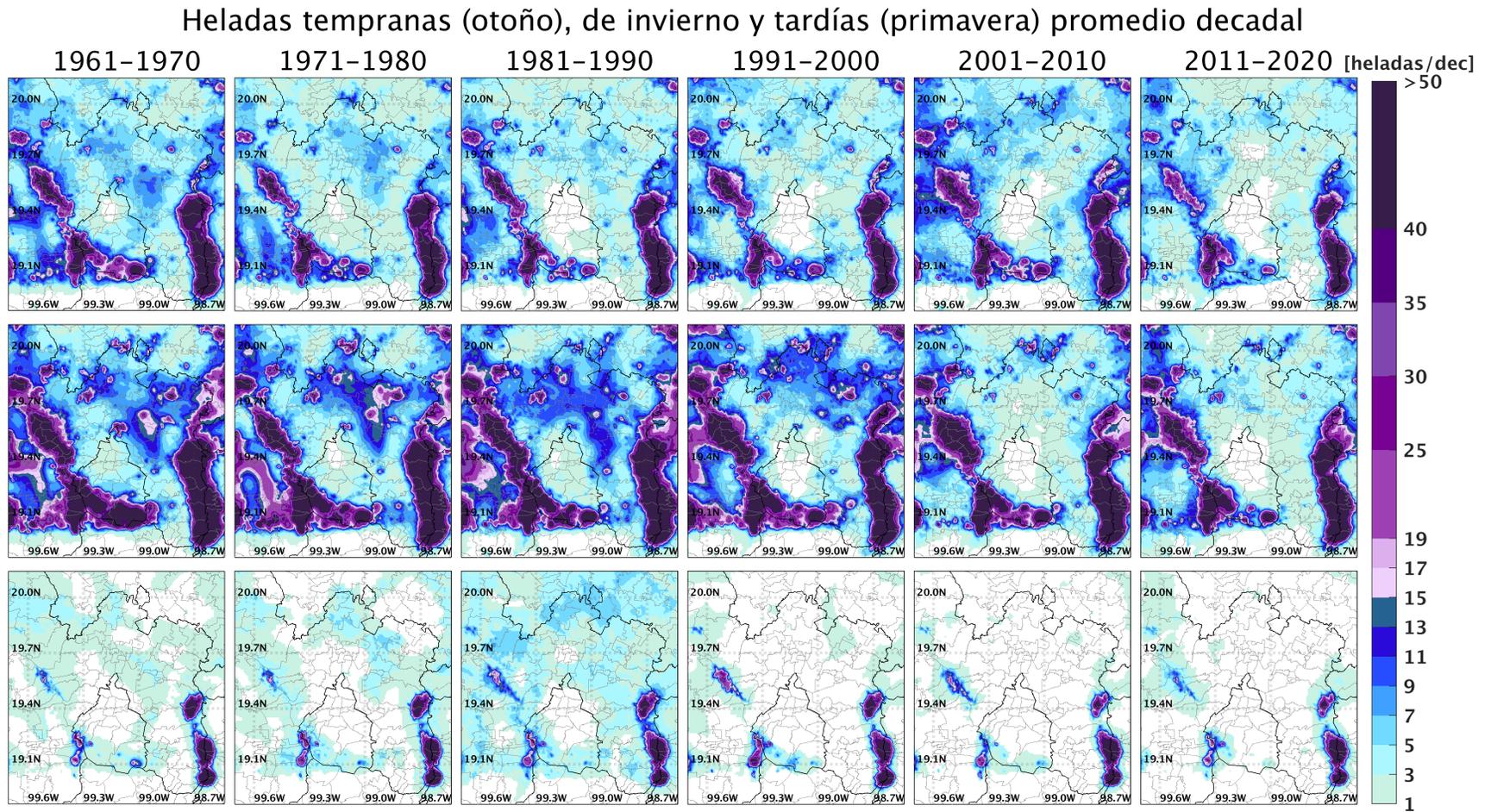


Figura 8.29: Mapas de heladas por estación promedio por década en la ZCM.

Capítulo 9

CONCLUSIONES

A lo largo de los 61 años de estudio, la ZMVM presenta un aumento general de las temperaturas. Se observan tendencias de incremento en las temperaturas máxima, media y mínima, con una tasa de incremento mayor en las temperaturas mínimas, lo que indica una disminución del rango diurno. Este cambio se refleja principalmente a partir de la década de 1990, donde las anomalías positivas se concentran en todos los tipos de temperatura, lo que indica un impacto del cambio climático en la región.

Las alcaldías que presentan los mayores incrementos de temperatura son Iztacalco, Iztapalapa, Coyoacán, Xochimilco y Tláhuac, especialmente en lo que respecta a las temperaturas mínimas. Las causas de este incremento pueden estar relacionadas con que en este periodo ocurrió una mayor urbanización en estas regiones pues las otras alcaldías se urbanizaron antes. El efecto de isla de calor, principalmente por la reducción de áreas verdes, contribuye a que estas zonas experimenten un mayor calentamiento. La densidad poblacional y las actividades humanas también juegan un papel importante en la retención de calor durante la noche, lo que explica el incremento más notable en las temperaturas mínimas.

Las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Cuauhtémoc, Iztacalco y Benito Juárez presentan anomalías negativas consistentes en las tres últimas décadas. Estas alcaldías se urbanizaron primero y deben haber experimentado el efecto de isla de calor más intenso antes del periodo analizado en este estudio. Probablemente el crecimiento de árboles en estas alcaldías contribuya a este enfriamiento, pero también el crecimiento vertical que han experimentado, lo que redistribuye la radiación de onda corta entrante en una mayor superficie. Esto tiene que continuar estudiando con mayor profundidad

La figura de percentiles de temperatura máxima, media y mínima por mes en la ZMVM muestra cómo los máximos del año se desplazan según el tipo de temperatura(ver figura 8.16).

La temperatura máxima en la ZMVM alcanza sus valores máximos entre abril y junio, periodo en que las temperaturas pueden llegar a superar los 29°C en el percentil 99. Posteriormente, a partir de julio, la temperatura máxima comienza a disminuir de manera gradual hasta diciembre. Esto sugiere que los meses de primavera y principios del verano son los más cálidos en términos de temperatura máxima diurna.

En cambio, la temperatura mínima aumenta a partir de mayo y se mantienen altas hasta octubre, el periodo en el que la temperatura mínima se mantiene alta es más prolongado en comparación con la temperatura máxima. Esto indica que, durante estos meses, las noches son más cálidas de manera sostenida, manteniendo un nivel alto de temperatura mínima durante un periodo extendido. Este comportamiento es característico de la influencia de las lluvias, la mayor humedad en el suelo, nubosidad que incrementa el efecto invernadero y el efecto de isla de calor, que disminuye la capacidad de enfriamiento nocturno en zonas urbanizadas.

El rango diurno promedio en la ZMVM presenta cambios en su magnitud respecto al promedio. Se estima su reducción de $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década. La CDMX prácticamente presenta el mismo rango diurno en toda su extensión, mientras que en la ZMVM se tienen regiones con diferentes magnitudes.

Los eventos extremos relacionados con la temperatura mínima, como las noches frías y las heladas, han disminuido en frecuencia a lo largo del tiempo. En las alcaldías del centro y norte de la Ciudad de México, se han registrado 70 noches frías menos en comparación con décadas anteriores. Con respecto a las heladas en estas alcaldías, mientras que en la primera década del estudio se observaban hasta 5 heladas al año, en las últimas dos décadas ya no se ha registrado ninguna helada.

Con el paso del tiempo, los días cálidos han mostrado un aumento tanto en frecuencia como en intensidad, con algunas regiones más afectadas que otras. Se estima que, cada década, el número de días cálidos aumentó en 4 días y que la intensidad de la temperatura en estos días se incrementó en 0.03°C . La zona sur de la Ciudad de México, junto con algunas áreas de la ZCM, será donde se experimenten los mayores incrementos de días cálidos.

La modificación del filtro espacial, utilizado para generar mapas de temperatura, interpolando los valores observados, puede mejorarse al integrar una distancia mínima entre las estaciones descartadas para evitar falsos positivos.

Finalmente, la metodología empleada para la creación de mallas diarias de temperatura genera buenas estimaciones de la temperatura en zonas donde no existen estaciones meteorológicas. La incertidumbre de las estimaciones está asociada a la incertidumbre de las mediciones que son difíciles de estimar debido a que los administradores de las redes no cuentan con un registro público de la instrumentación que realiza la medición en cada estación y de sus incertidumbres, sin embargo, las mediciones sí son consistentes temporal y espacialmente, lo que brinda certeza a los productos, análisis generados y las conclusiones descritas en esta tesis.

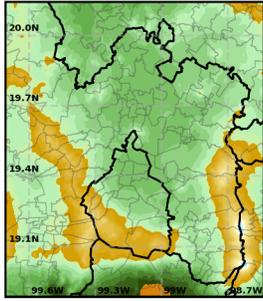
Apéndice

Capítulo A

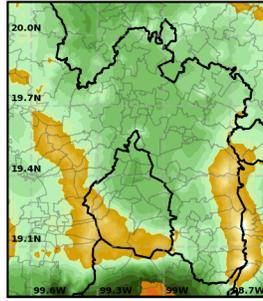
Mapas de temperatura máxima, media y mínima promedio Anual

Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

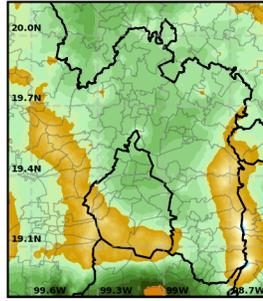
Temperatura máxima 1961



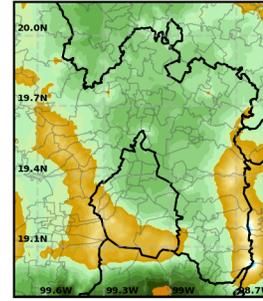
Temperatura máxima 1962



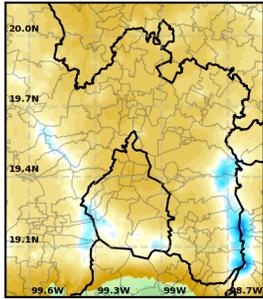
Temperatura máxima 1963



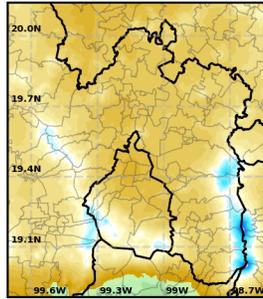
Temperatura máxima 1964



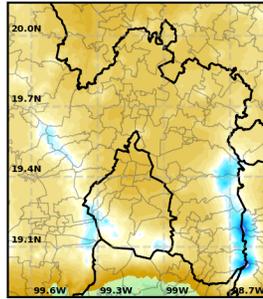
Temperatura media 1961



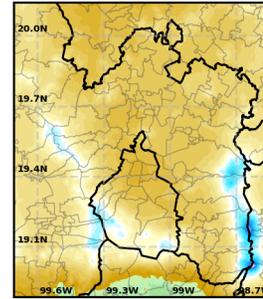
Temperatura media 1962



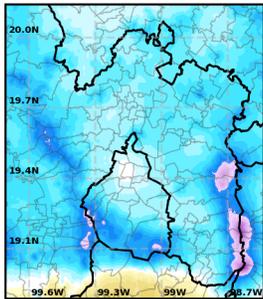
Temperatura media 1963



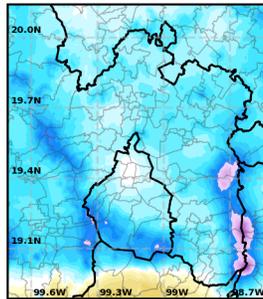
Temperatura media 1964



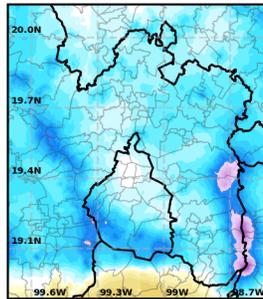
Temperatura mínima 1961



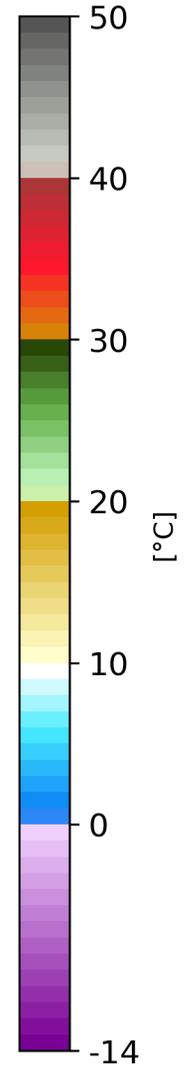
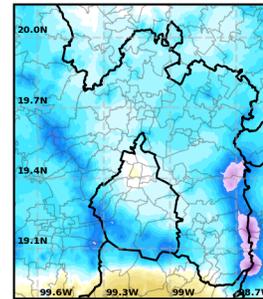
Temperatura mínima 1962



Temperatura mínima 1963

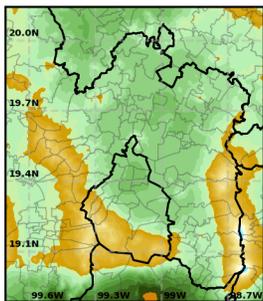


Temperatura mínima 1964

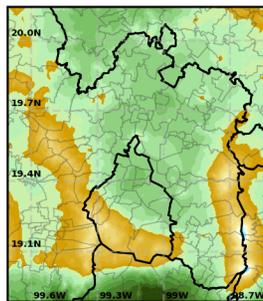


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

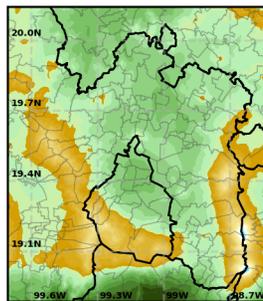
Temperatura máxima 1965



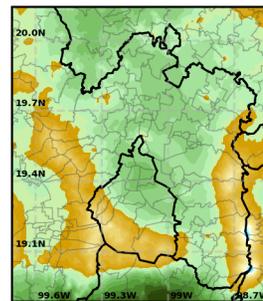
Temperatura máxima 1966



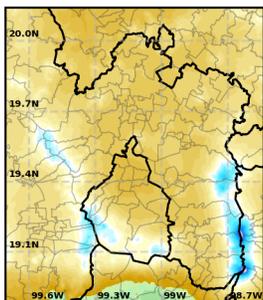
Temperatura máxima 1967



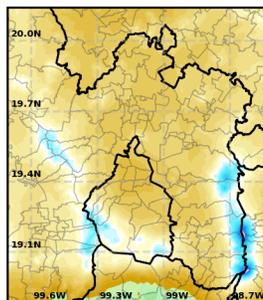
Temperatura máxima 1968



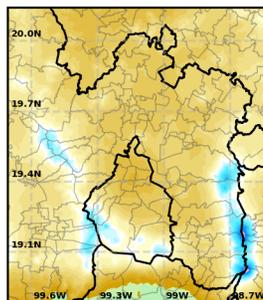
Temperatura media 1965



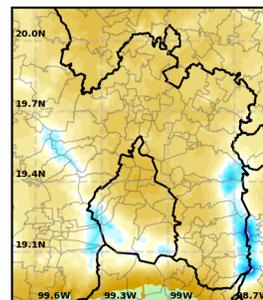
Temperatura media 1966



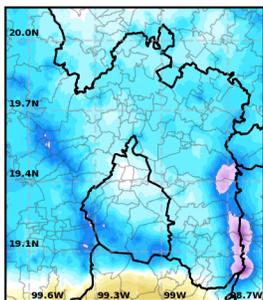
Temperatura media 1967



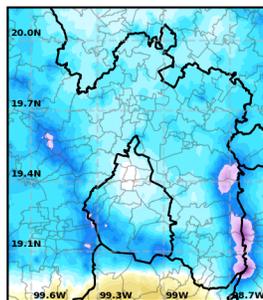
Temperatura media 1968



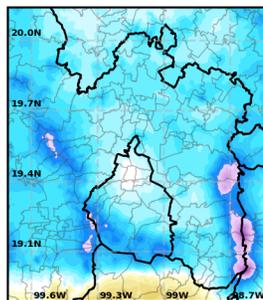
Temperatura mínima 1965



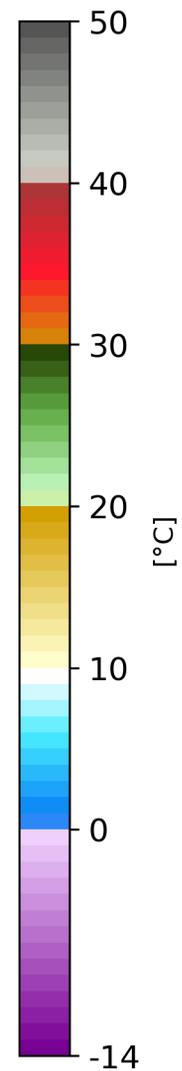
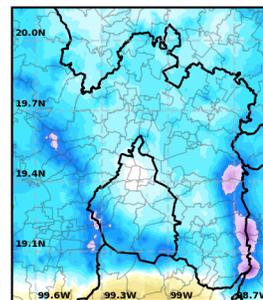
Temperatura mínima 1966



Temperatura mínima 1967

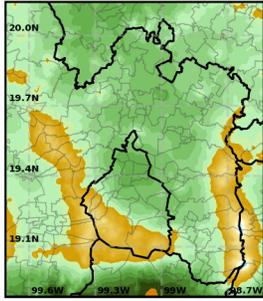


Temperatura mínima 1968

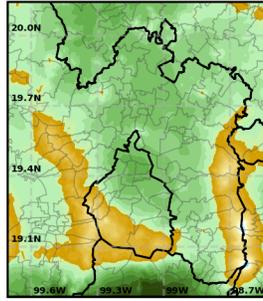


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

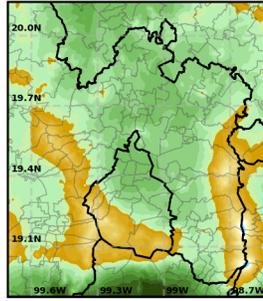
Temperatura máxima 1969



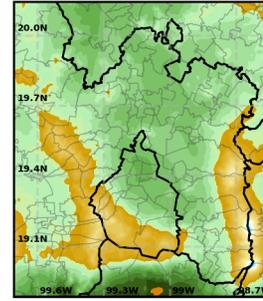
Temperatura máxima 1970



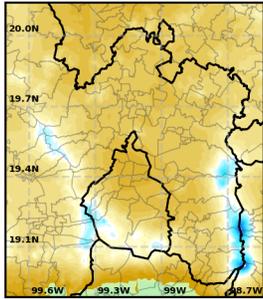
Temperatura máxima 1971



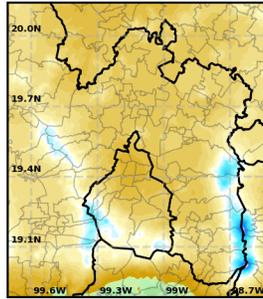
Temperatura máxima 1972



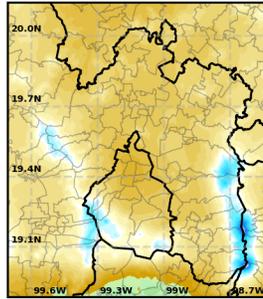
Temperatura media 1969



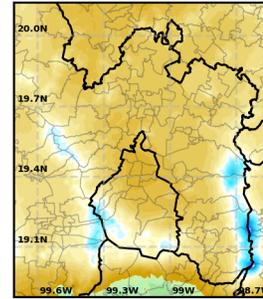
Temperatura media 1970



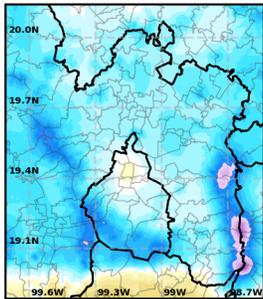
Temperatura media 1971



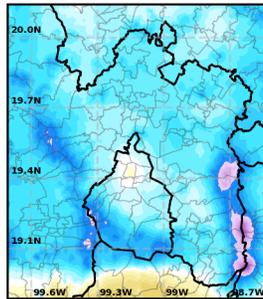
Temperatura media 1972



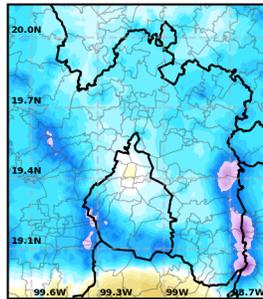
Temperatura mínima 1969



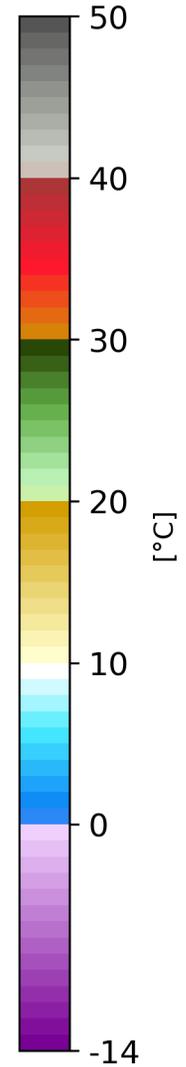
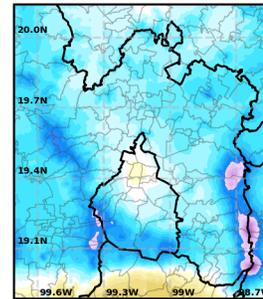
Temperatura mínima 1970



Temperatura mínima 1971

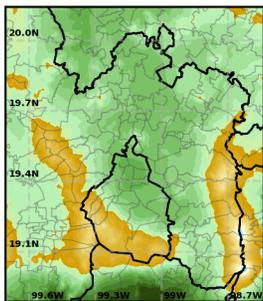


Temperatura mínima 1972

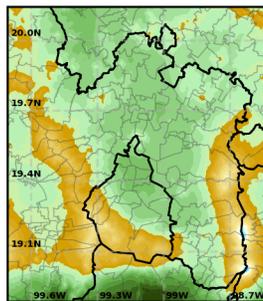


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

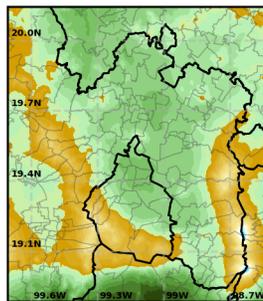
Temperatura máxima 1973



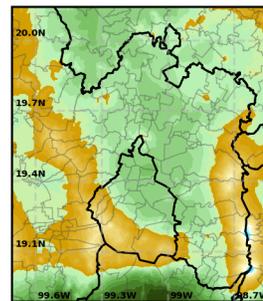
Temperatura máxima 1974



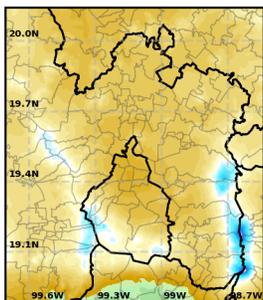
Temperatura máxima 1975



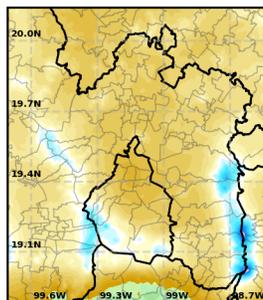
Temperatura máxima 1976



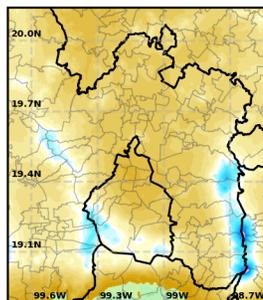
Temperatura media 1973



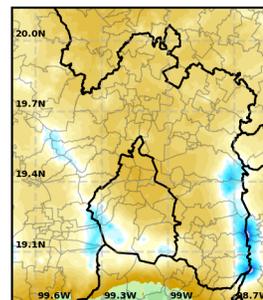
Temperatura media 1974



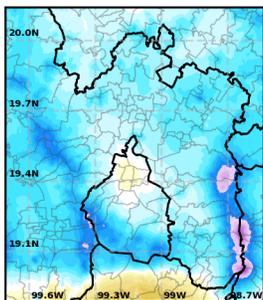
Temperatura media 1975



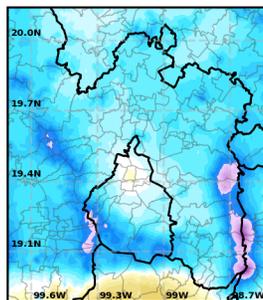
Temperatura media 1976



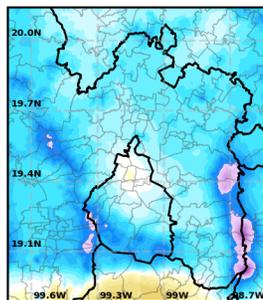
Temperatura mínima 1973



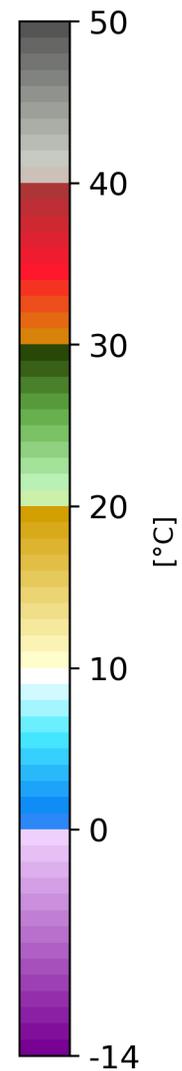
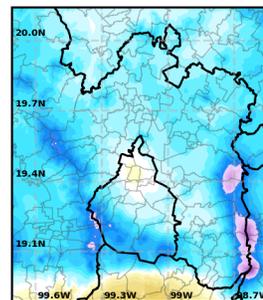
Temperatura mínima 1974



Temperatura mínima 1975

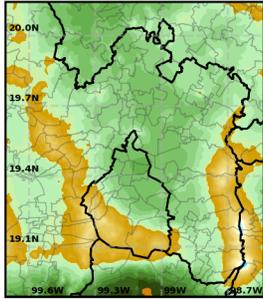


Temperatura mínima 1976

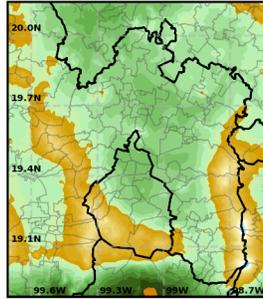


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

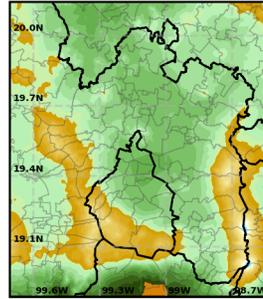
Temperatura máxima 1977



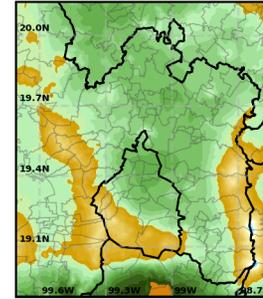
Temperatura máxima 1978



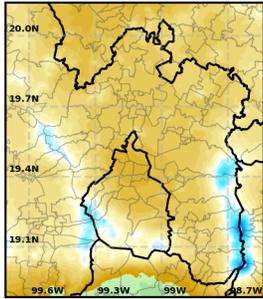
Temperatura máxima 1979



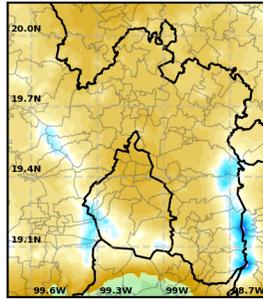
Temperatura máxima 1980



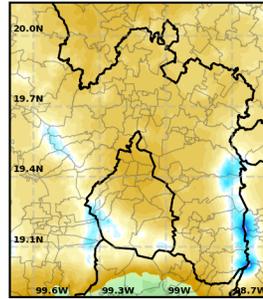
Temperatura media 1977



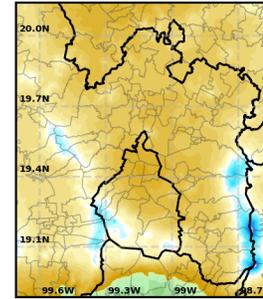
Temperatura media 1978



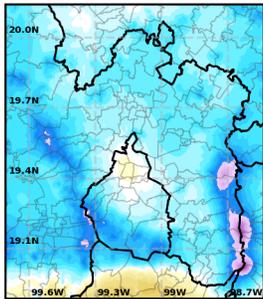
Temperatura media 1979



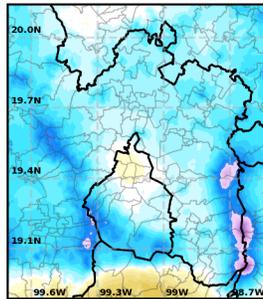
Temperatura media 1980



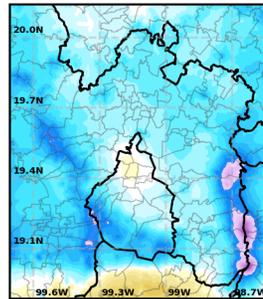
Temperatura mínima 1977



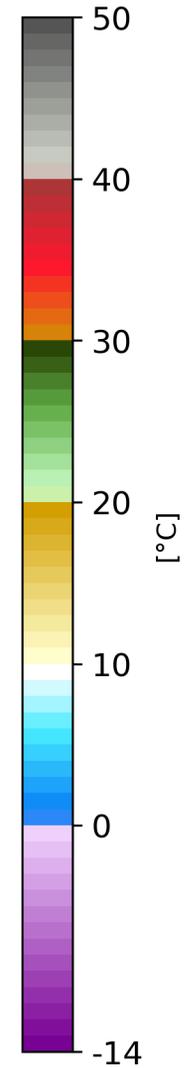
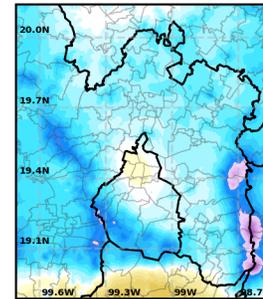
Temperatura mínima 1978



Temperatura mínima 1979

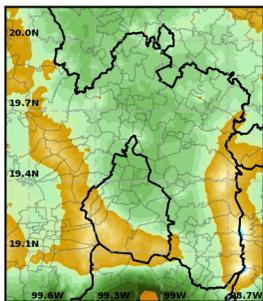


Temperatura mínima 1980

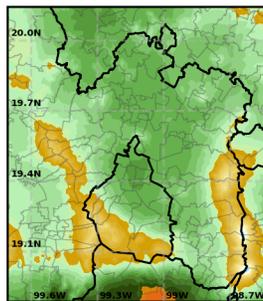


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

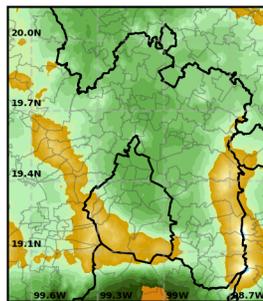
Temperatura máxima 1981



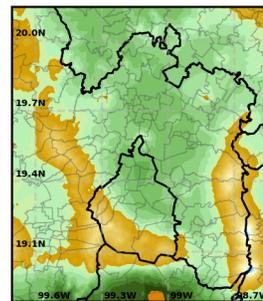
Temperatura máxima 1982



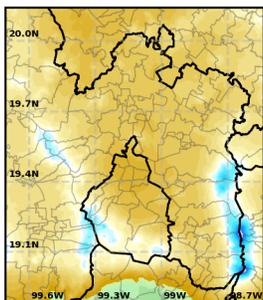
Temperatura máxima 1983



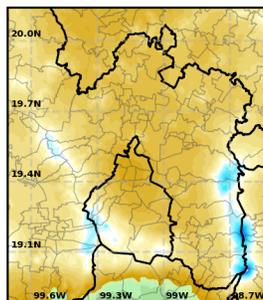
Temperatura máxima 1984



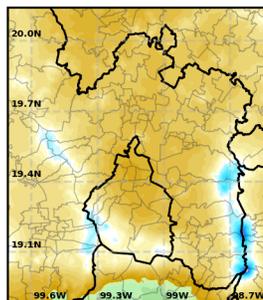
Temperatura media 1981



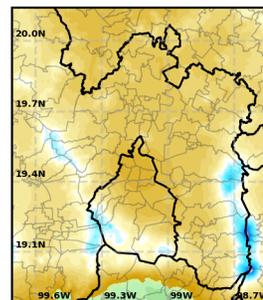
Temperatura media 1982



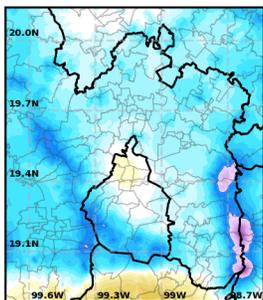
Temperatura media 1983



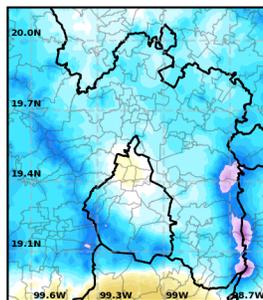
Temperatura media 1984



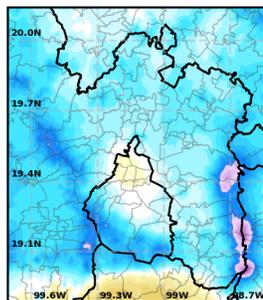
Temperatura mínima 1981



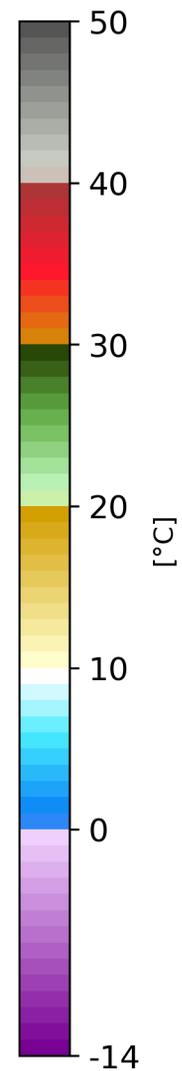
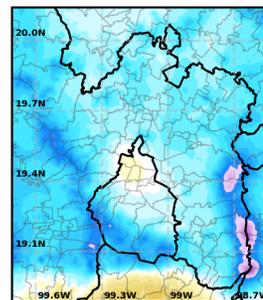
Temperatura mínima 1982



Temperatura mínima 1983

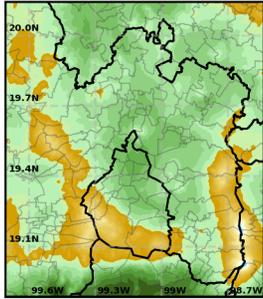


Temperatura mínima 1984

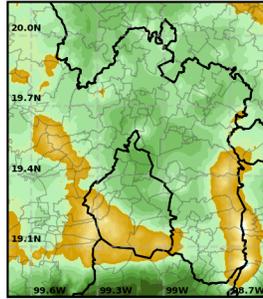


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

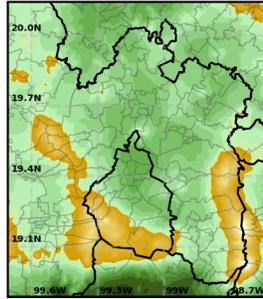
Temperatura máxima 1985



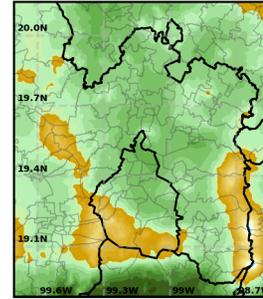
Temperatura máxima 1986



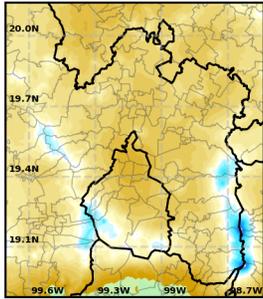
Temperatura máxima 1987



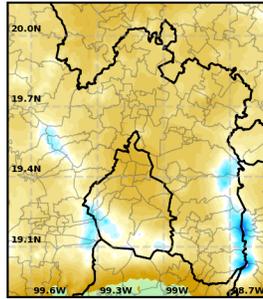
Temperatura máxima 1988



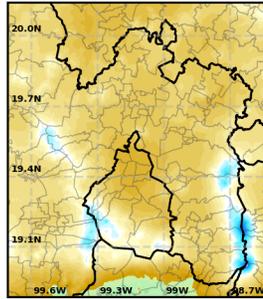
Temperatura media 1985



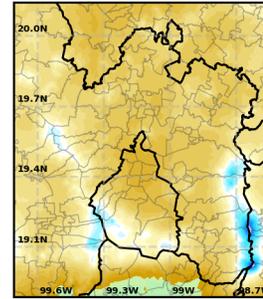
Temperatura media 1986



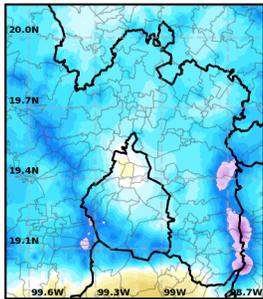
Temperatura media 1987



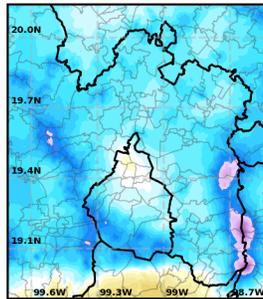
Temperatura media 1988



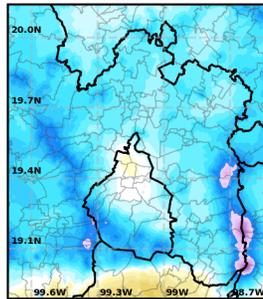
Temperatura mínima 1985



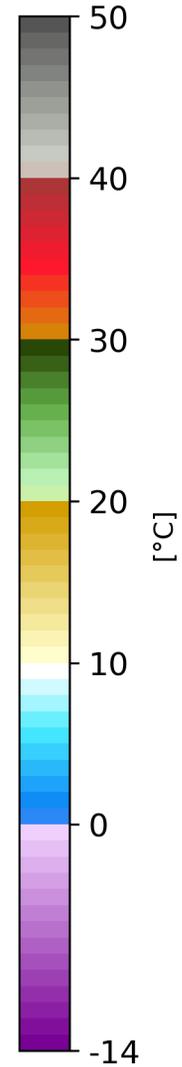
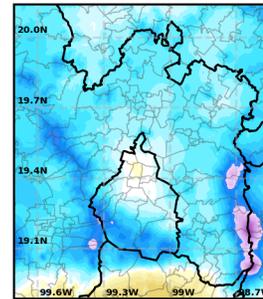
Temperatura mínima 1986



Temperatura mínima 1987

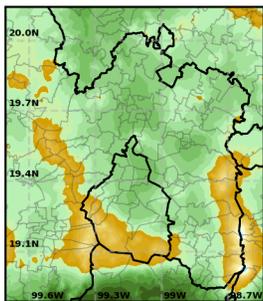


Temperatura mínima 1988

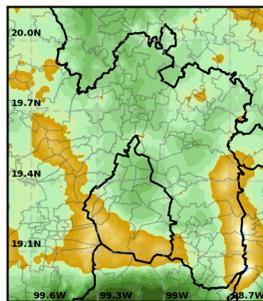


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

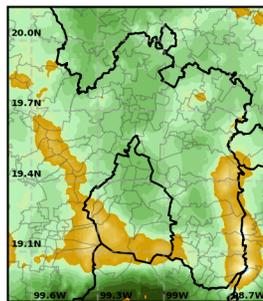
Temperatura máxima 1989



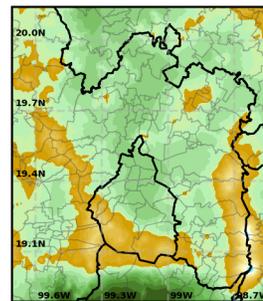
Temperatura máxima 1990



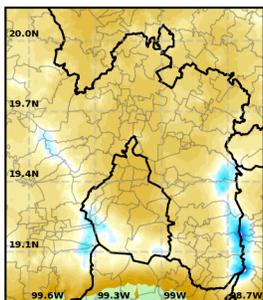
Temperatura máxima 1991



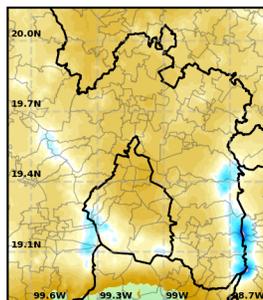
Temperatura máxima 1992



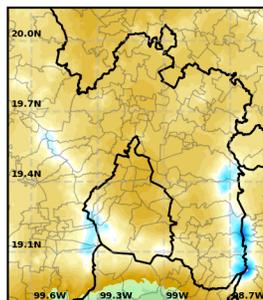
Temperatura media 1989



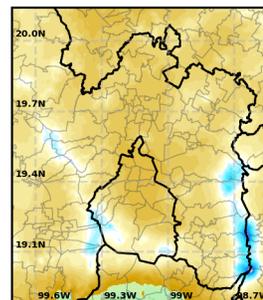
Temperatura media 1990



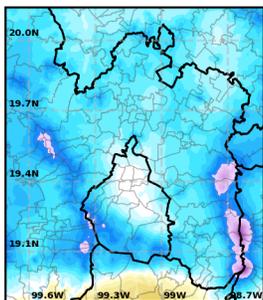
Temperatura media 1991



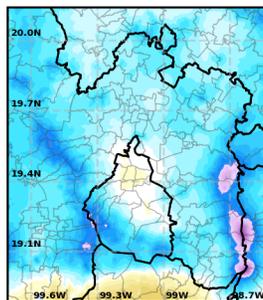
Temperatura media 1992



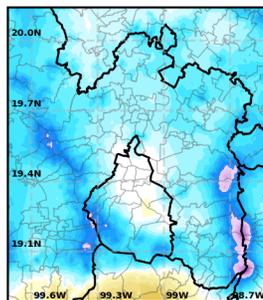
Temperatura mínima 1989



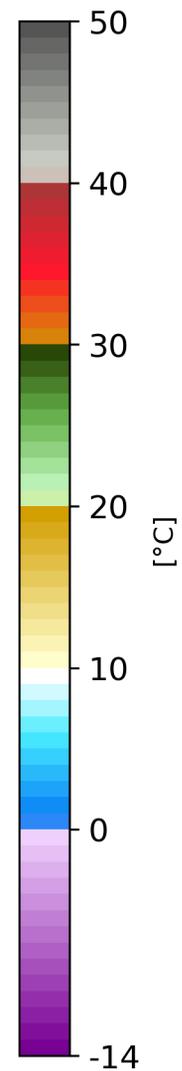
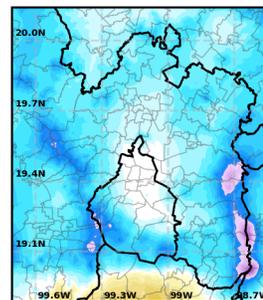
Temperatura mínima 1990



Temperatura mínima 1991

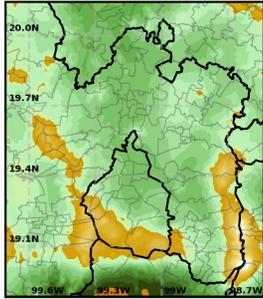


Temperatura mínima 1992

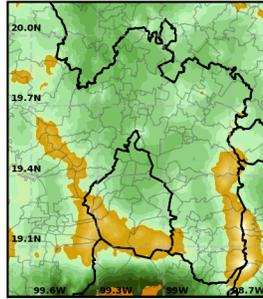


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

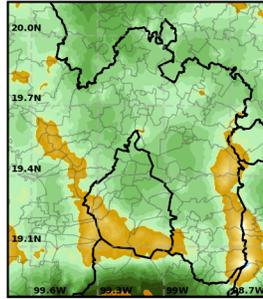
Temperatura máxima 1993



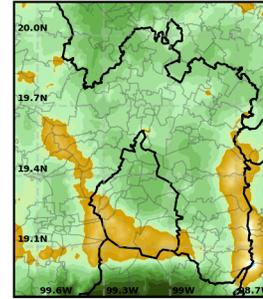
Temperatura máxima 1994



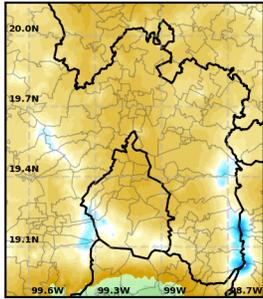
Temperatura máxima 1995



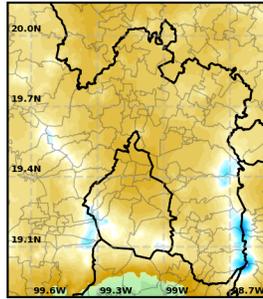
Temperatura máxima 1996



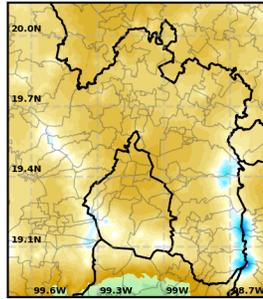
Temperatura media 1993



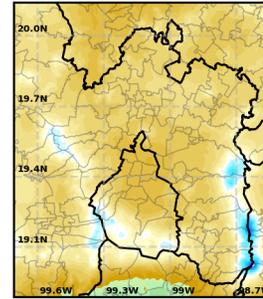
Temperatura media 1994



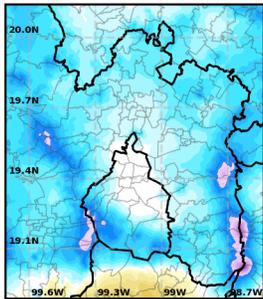
Temperatura media 1995



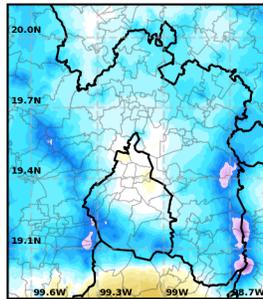
Temperatura media 1996



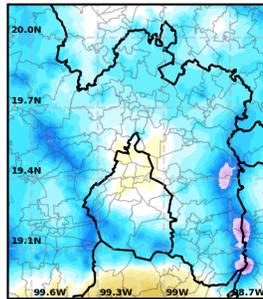
Temperatura mínima 1993



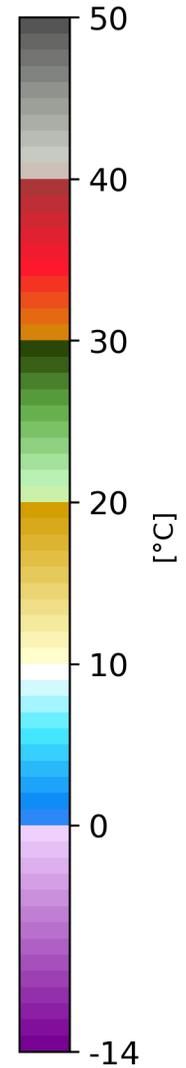
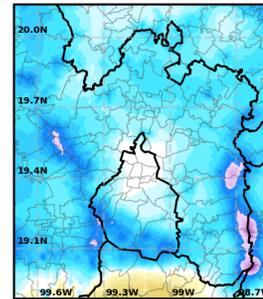
Temperatura mínima 1994



Temperatura mínima 1995

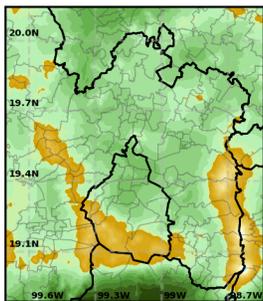


Temperatura mínima 1996

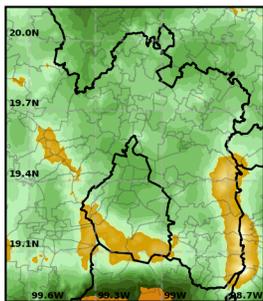


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

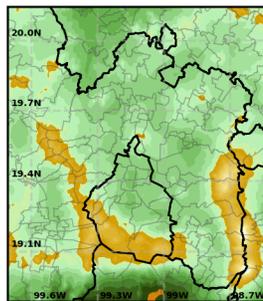
Temperatura máxima 1997



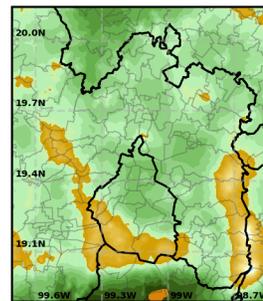
Temperatura máxima 1998



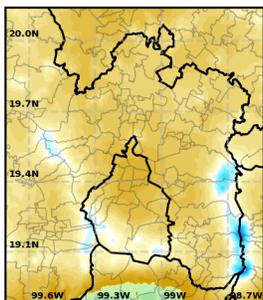
Temperatura máxima 1999



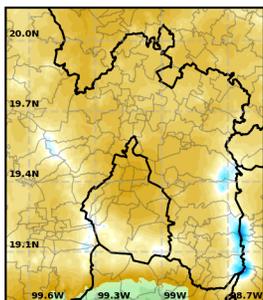
Temperatura máxima 2000



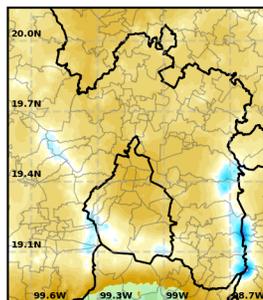
Temperatura media 1997



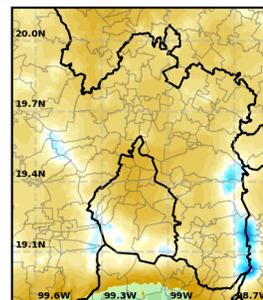
Temperatura media 1998



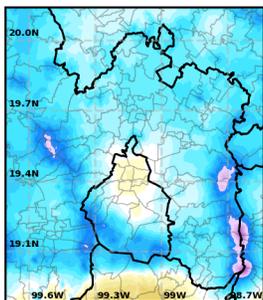
Temperatura media 1999



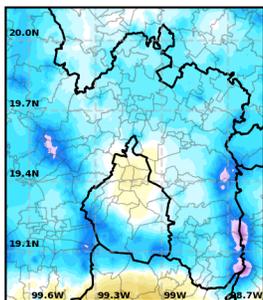
Temperatura media 2000



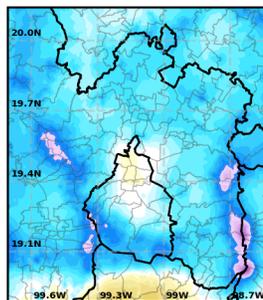
Temperatura mínima 1997



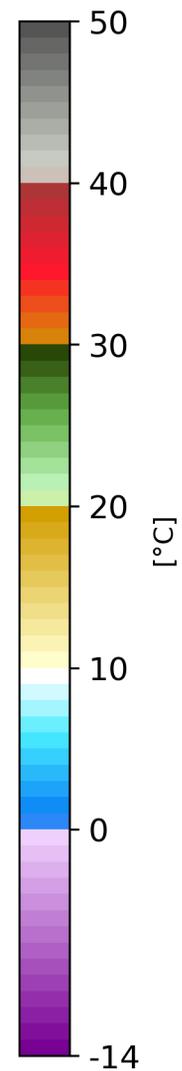
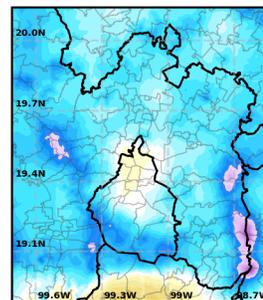
Temperatura mínima 1998



Temperatura mínima 1999

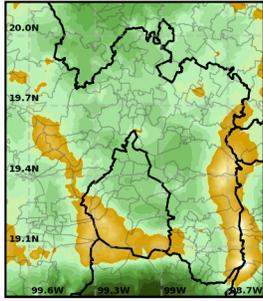


Temperatura mínima 2000

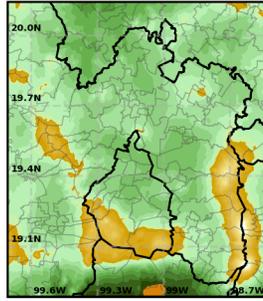


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

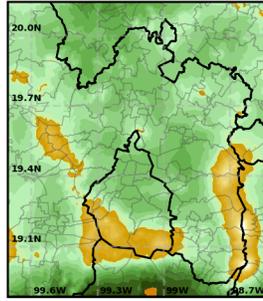
Temperatura máxima 2001



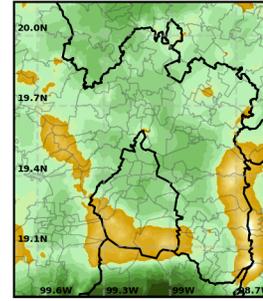
Temperatura máxima 2002



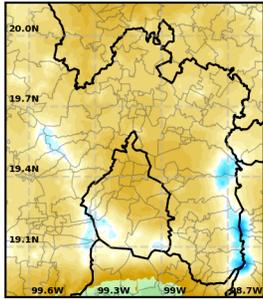
Temperatura máxima 2003



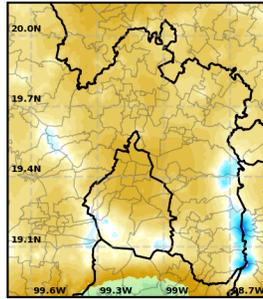
Temperatura máxima 2004



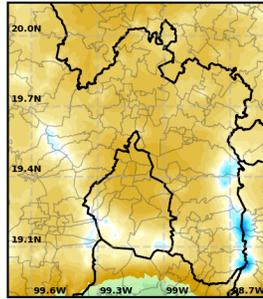
Temperatura media 2001



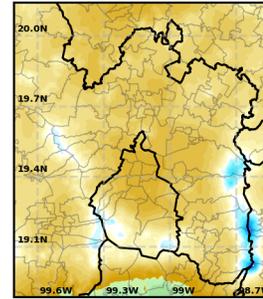
Temperatura media 2002



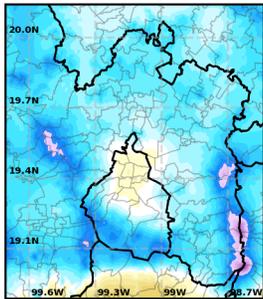
Temperatura media 2003



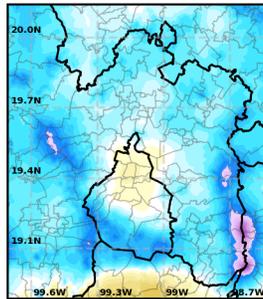
Temperatura media 2004



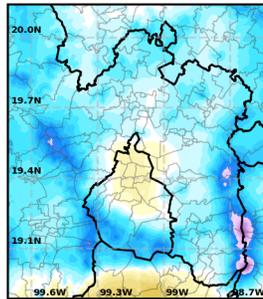
Temperatura mínima 2001



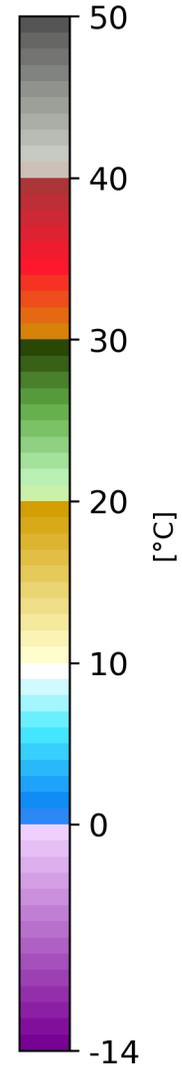
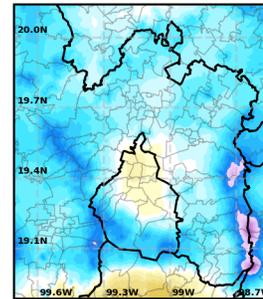
Temperatura mínima 2002



Temperatura mínima 2003

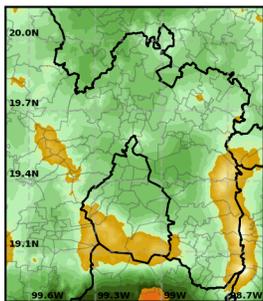


Temperatura mínima 2004

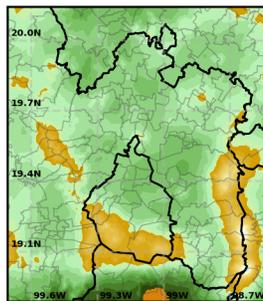


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

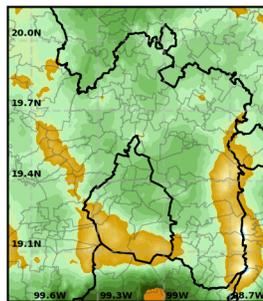
Temperatura máxima 2005



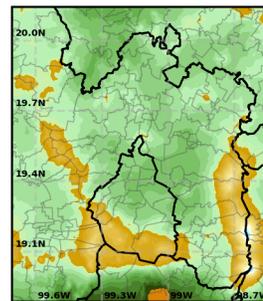
Temperatura máxima 2006



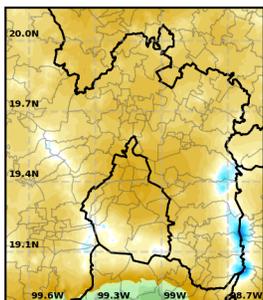
Temperatura máxima 2007



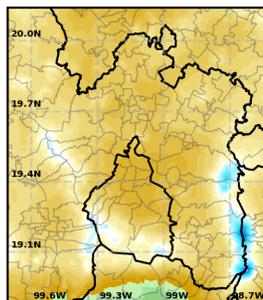
Temperatura máxima 2008



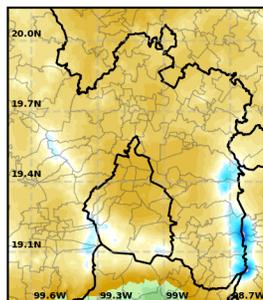
Temperatura media 2005



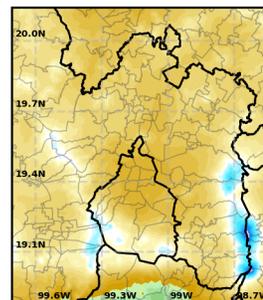
Temperatura media 2006



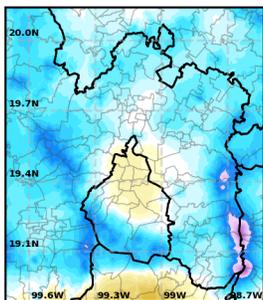
Temperatura media 2007



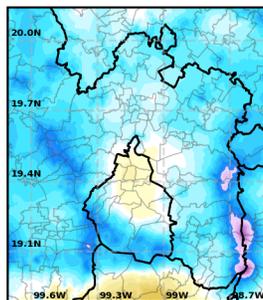
Temperatura media 2008



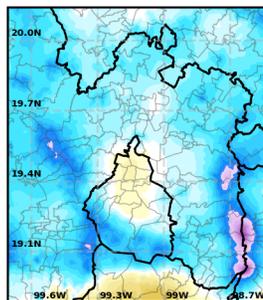
Temperatura mínima 2005



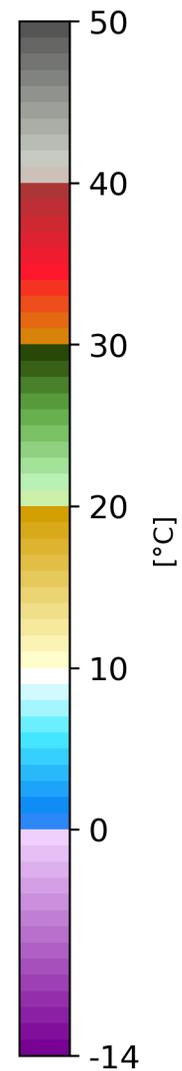
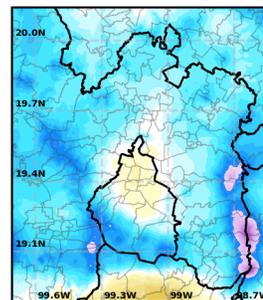
Temperatura mínima 2006



Temperatura mínima 2007

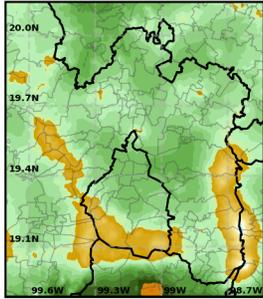


Temperatura mínima 2008

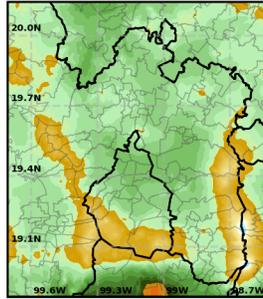


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

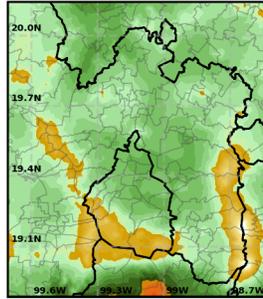
Temperatura máxima 2009



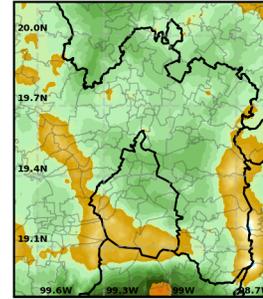
Temperatura máxima 2010



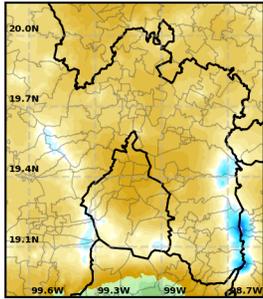
Temperatura máxima 2011



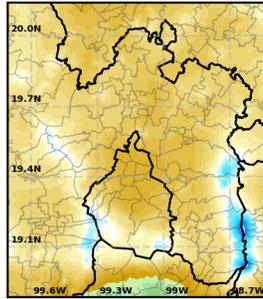
Temperatura máxima 2012



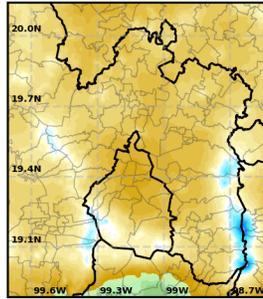
Temperatura media 2009



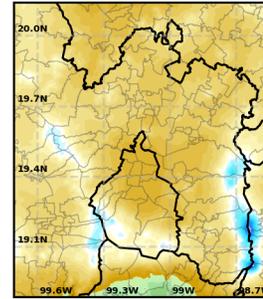
Temperatura media 2010



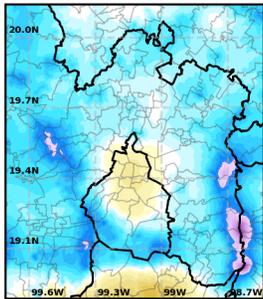
Temperatura media 2011



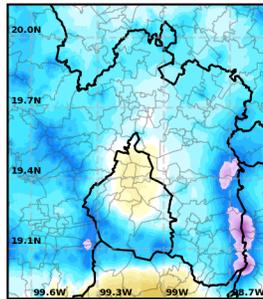
Temperatura media 2012



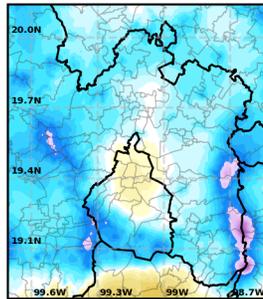
Temperatura mínima 2009



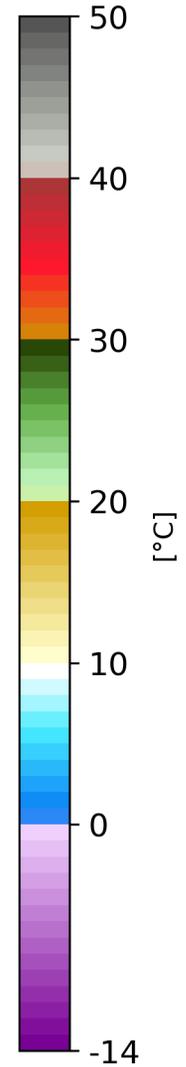
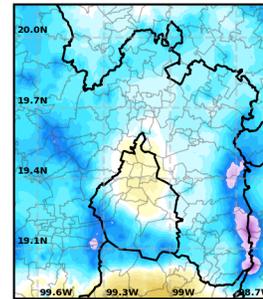
Temperatura mínima 2010



Temperatura mínima 2011

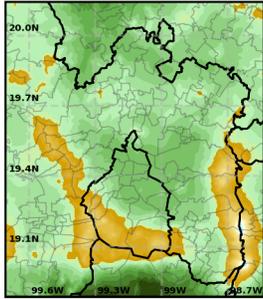


Temperatura mínima 2012

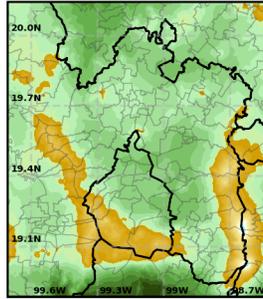


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

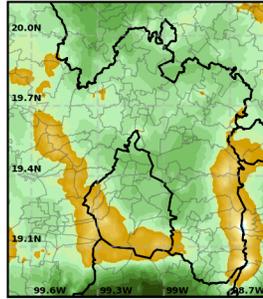
Temperatura máxima 2013



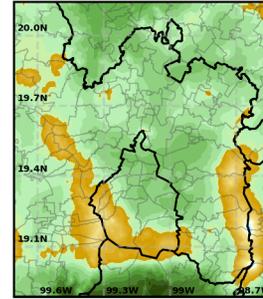
Temperatura máxima 2014



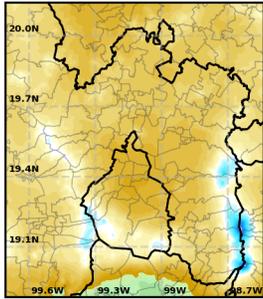
Temperatura máxima 2015



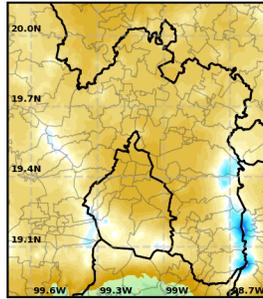
Temperatura máxima 2016



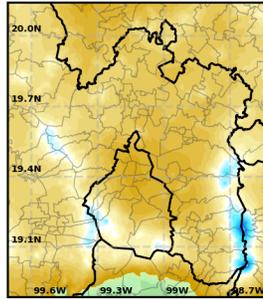
Temperatura media 2013



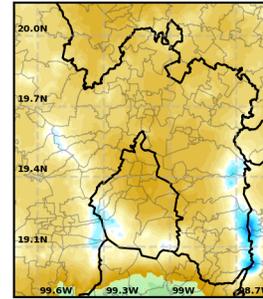
Temperatura media 2014



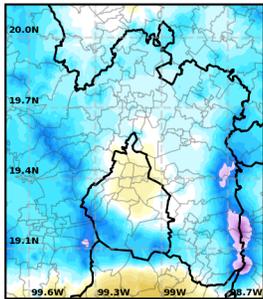
Temperatura media 2015



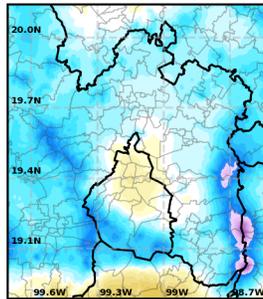
Temperatura media 2016



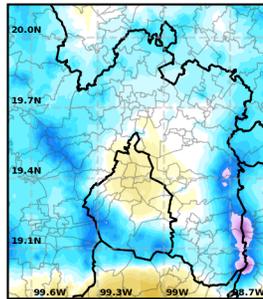
Temperatura mínima 2013



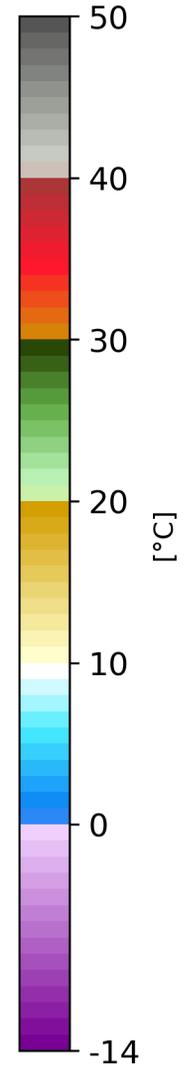
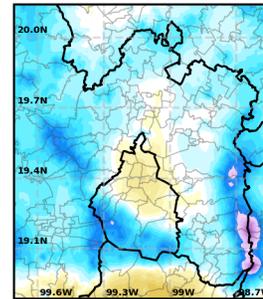
Temperatura mínima 2014



Temperatura mínima 2015

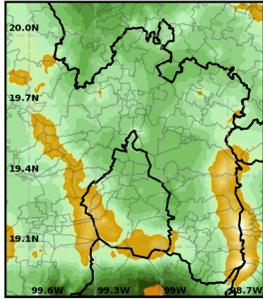


Temperatura mínima 2016

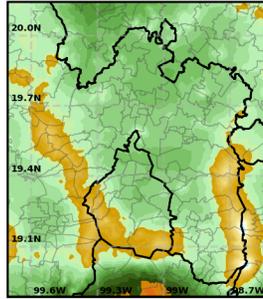


Temperatura máxima, media y mínima anual promedio

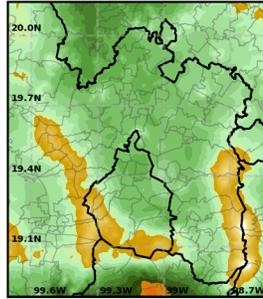
Temperatura máxima 2017



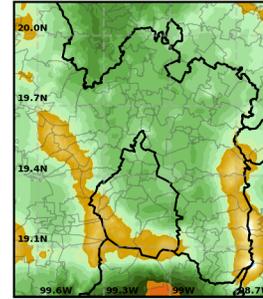
Temperatura máxima 2018



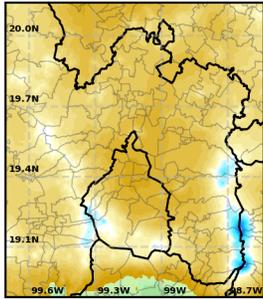
Temperatura máxima 2019



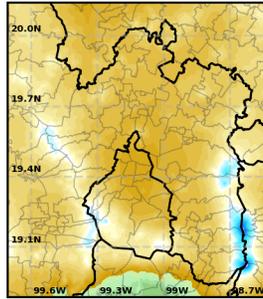
Temperatura máxima 2020



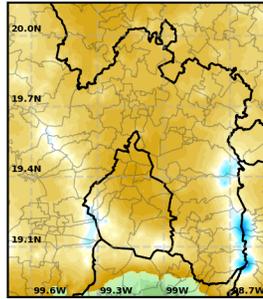
Temperatura media 2017



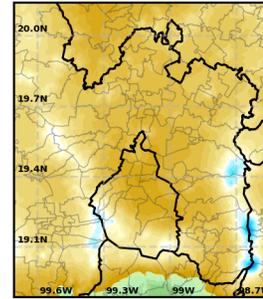
Temperatura media 2018



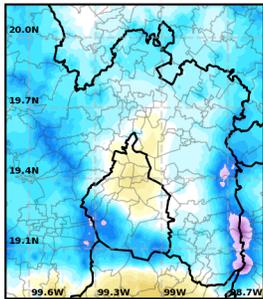
Temperatura media 2019



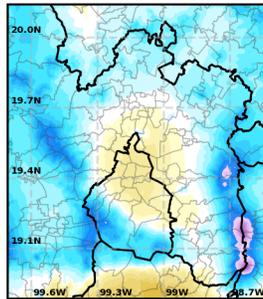
Temperatura media 2020



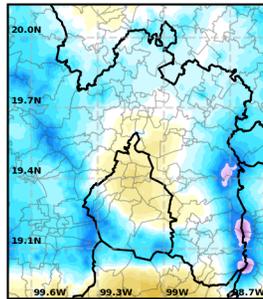
Temperatura mínima 2017



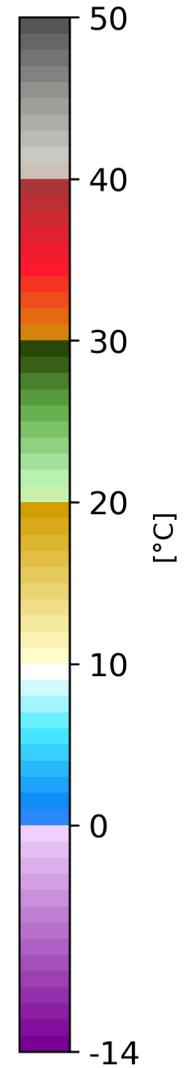
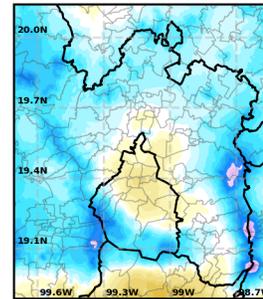
Temperatura mínima 2018



Temperatura mínima 2019



Temperatura mínima 2020



Bibliografía

- Absalón, Carlos (2007). *Introducción al análisis de regresión lineal*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ISBN: 978 968 9182 32-3.
- Amidror, I. (2002). «Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey». En: *Journal of Electronic Imaging* 11.2, págs. 157-76. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1455013>. URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/99883>.
- Canavos, G (1988). «Análisis de regresión, el modelo lineal simple». En: *Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos, vol. 1*. McGraw-Hill. ISBN: 968-451-856-0.
- Carrasco, M. (2013). «Reconstrucción y análisis de la variación de la temperatura en México». Tesis de maestría. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000697956>.
- Chacón, J. y M. Olguín (2016). *Revisión de la climatología de heladas y días cálidos en México*. Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000697956>.
- Chen, A., B. Howl y A. Sidel (2015). *aerosols*. Deep Blue, Goddard Earth Sciences Division Project. National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/data/deep-blue/aerosols> (visitado 25-01-2024).
- CONAGUA (2013). *Estaciones climatológicas*. Página oficial de la Comisión Nacional del Agua. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). URL: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/estaciones-climatologicas> (visitado 10-08-2023).
- De Berg, Mark (2000). *Computational geometry: algorithms and applications*. Springer Science & Business Media.
- Douville, Hervé et al. (jul. de 2023). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*, págs. 1513-1766. DOI: 10.1017/9781009157896.013. URL: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.
- Estrada, Francisco et al. (2023). *Estado y perspectivas del Cambio climático en México: un punto de partida*. Programa de Investigación en Cambio Climático PINCC. ISBN: 978-607-30-8172-6.
- Heras, Andrea (2020). «Dualidad Triangulación de Delaunay - Diagrama de Voronoi mediante dualidad 3D». Tesis de maestría. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. URL: https://oa.upm.es/57962/1/TFG_ANDREA_DE_LAS_HERAS_PARRILLA.pdf.

- Hill, John B (1966). «Temperature variability and synoptic cold fronts in the winter climate of Mexico.» En: URL: <https://escholarship.mcgill.ca/downloads/bg257g53b>.
- INEGI (2023). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. URL: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463902836> (visitado 25-01-2024).
- IPCC (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed. por H. Lee Core Writing Team y J. Romero. Geneva, Switzerland: IPCC, págs. 35-115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Jáuregui, Ernesto (1973). «The Urban Climate of Mexico City». En: *Erdkunde* 27.4, págs. 298-307. ISSN: 00140015. URL: <http://www.jstor.org/stable/25641419> (visitado 13-02-2024).
- (jun. de 2010). «The heat spells of Mexico City». En: *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*. DOI: 10.14350/rig.18078. URL: <https://doaj.org/article/5ebb5b550cb146349f6bbf151ae95928>.
- Jiménez, Uribe. et al. (2023). *Metrópolis de México 2020*. Vol. 1. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano SEDATU. ISBN: 978-607-98208-2-4. URL: https://www.gob.mx/cms/uploads/sedatu/MM2020_19102023.pdf.
- Kirkland, Earl J. (2010). «Bilinear Interpolation». En: *Advanced Computing in Electron Microscopy*. Boston, MA: Springer US, págs. 261-263. ISBN: 978-1-4419-6533-2. DOI: 10.1007/978-1-4419-6533-2_12. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6533-2_12.
- Lillesand, Thomas, Ralph W Kiefer y Jonathan Chipman (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lutgens, Frederick K., Edward J. Tarbuck y Redina L. Herman (2018). *The atmosphere: An introduction to meteorology*. 14th. New York: Pearson. ISBN: ISBN-10: 0-134-75858-7, ISBN-13: 78-0-134-75858-9. URL: <https://lccn.loc.gov/2017049640>.
- NASA (2023a). *Dióxido de carbono*. National Aeronautics y Space Administration. URL: <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/> (visitado 25-01-2024).
- (2023b). *Water vapor*. Earth Observatory. National Aeronautics y Space Administration. URL: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MYDAL2_M_SKY_WV (visitado 25-01-2024).
- NCEI (2018). *Wheater vs climate*. National Oceanic y Atmospheric Administration. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/news/weather-vs-climate> (visitado 23-01-2024).
- OMM, Organización Meteorológica Mundial (2018a). *Guía de instrumentos y métodos de observación (OMM-N° 8)*. Vol. 1 | Medición de variables meteorológicas. ISBN: 978-92-63-30100-0. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027.
- (2018b). *Guía de Prácticas Climatológicas (OMM-N° 100)*. ISBN: 978-92-63-30100-0. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027.
- PEMBU (2023a). *Estación meterológica CHH Oriente UNAM*. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario. Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos RUOA. ICAYCC. URL: <https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=estaciones&id=4> (visitado 21-08-2023).

- (2023b). *Misión y objetivos*. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario. Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos RUOA. ICAYCC. URL: <https://www.ruoa.unam.mx/pembu/index.php?page=mision> (visitado 21-08-2023).
- Romero, J (oct. de 1990). «Modernización del Servicio Meteorológico Nacional». En: *Ingeniería Hidráulica en México* 1.edición especial, págs. 82-96. URL: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/625/538>.
- Romero, Netz y Ricardo Barrón-Fernández (2016). «Validación de la triangulación De-launay empleando algebra geométrica conforme». En: *Computación y Sistemas* 20.4, págs. 789-798.
- SEDEMA (2021). *Caracterización, evaluación y análisis del entorno físico y de la representatividad en las estaciones del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México*. Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Dirección General de Calidad del Aire. URL: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-entornos.pdf> (visitado 10-08-2023).
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional (2010). *Información Estadística Climatológica*. Página oficial de la Comisión Nacional del Agua. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). URL: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica> (visitado 10-08-2023).
- (2021). *Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA)*. Página oficial del Servicio Meteorológico Nacional de México. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). URL: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> (visitado 10-08-2023).
- Wallace, John M y Peter V Hobbs (2006). *Atmospheric science: an introductory survey*. Vol. 92. Elsevier. ISBN: ISBN-10: 0-12-732951-X, ISBN-13: 978-0-12-732951-2.
- Willmott, C. J. y K. Matsuura (1995). «Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States». En: *Journal of Applied Meteorology* 34.11, págs. 2577-2586. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034<2577:SIOAAA>2.0.CO;2. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034%3C2577:SIOAAA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034%3C2577:SIOAAA%3E2.0.CO;2).