



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

“Caracterización climática de las olas de calor en el centro de México”

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

MARÍA REGINA ORTIZ MARTIN

Directora de Tesis:

Dra. Paulina Ordóñez Pérez

Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Comité tutor:

Dr. David Barriopedro Cepero (Instituto de Geociencias, CSIC-UCM)

Dra. Graciela Binimelis de Raga (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM)

Ciudad Universitaria, CDMX.

Agosto 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi compañera incondicional

Milly

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda de múltiples personas que me apoyaron a lo largo de mis estudios de maestría, especialmente a las siguientes.

Dra. Paulina Ordóñez, quien ha dirigido de manera exitosa el presente trabajo. Le agradezco enormemente su paciencia y tiempo para resolver todas mis dudas, sus enseñanzas, consejos y orientación; pero sobre todo su comprensión y confianza.

Dr. David Barriopedro, persona clave para la investigación realizada. Muchas gracias por todos sus consejos y comentarios respecto al trabajo, sin ellos esto no habría sido posible. Gracias por recibirme en una estancia de investigación, la cual fue maravillosa.

Dr. Ricardo García, muchas gracias por haber confiado en mí y recibirme en su grupo de trabajo, por sus aportaciones y sobre todo el interés que mostró con el tema y sus futuros alcances.

A todos mis profesores e investigadores del ICAyCC, quienes han aportado de diversas maneras a mi formación académica mediante enseñanzas y consejos; entre ellos: Dr. Arturo Quintar, Dr. Alejandro Jaramillo, Dra. Christian Domínguez, Dr, Carlos Ochoa. Con mención especial a la Dra. Graciela Binimelis Raga por formar parte de mi comité tutor y estar siempre dispuesta a ayudarme y aconsejarme.

A mi familia por apoyarme y alentarme, sin ustedes esto hubiera sido muy difícil. Mi mamá Flor Martin, mi papá Max Ortiz, mi hermana Flor Ortiz y mi novio Ángel Ramírez.

Finalmente al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

RESUMEN

En este trabajo se caracterizan por primera vez las olas de calor para el centro de México (CM). Para ello, se hace uso de un algoritmo de detección semi-lagrangiano que identifica la trayectoria de las olas de calor alrededor del globo a través de sus patrones de temperatura. Se define una ola de calor como un evento en el que la temperatura máxima a 700 hPa (T700) sobrepasa el percentil 95 (P95) del día del calendario sobre un área de al menos 250,000 km² y un mínimo de 4 días. Se consideran olas de calor para el CM, aquellos eventos que durante su ciclo de vida afectan algún punto de la región de estudio ([19-21 °N, 257-263 °E]). Los datos usados corresponden al reanálisis ERA5 del centro europeo para el periodo de 1979-2021 y la estación de primavera (marzo, abril y mayo), a una resolución espacial de 1°x1°.

Para el CM se detectaron en media 3 eventos por año con una persistencia de 3 días sobre la zona de estudio. El análisis temporal muestra una tendencia positiva en la frecuencia de olas de calor (0.76 eventos/década; $p < 0.01$) El aumento en la frecuencia de días cálidos no es significativo debido a la ausencia de cambios en la duración de los eventos. Las mayores frecuencias y tendencias se observan en el mes de marzo, lo que sugiere eventos cada vez más tempranos en la primavera.

Usando el método de clusterización *Self-Organizing Maps*, se han agrupado los eventos de ola de calor del CM de acuerdo a su evolución espacial. Para ello, se consideraron los patrones de las anomalías de T700 de tres fases: Pre-CM (3 días previos al inicio del evento sobre el CM), CM (días de ola de calor en CM) y Post-CM (3 días posteriores al fin del evento de CM). El análisis revela dos grupos dominantes con características diferenciadas en su estacionalidad y evolución: un grupo de eventos de carácter continental, provenientes del norte del país (Estados Unidos) y otro de rasgos marítimos asociados con las temperaturas del océano Pacífico del este. Existe una fuerte y contrastada estacionalidad en cada grupo: las olas que se desarrollan en continente son más comunes en marzo, y las que se generan sobre el océano dominan en mayo.

El análisis de un caso de estudio del grupo oceánico correspondiente a un año El Niño (1998), muestra que el calentamiento anómalo en la temperatura superficial del Pacífico del este actuó como una fuente de forzamiento de ondas de Rossby (patrón de Gill). La onda de

Rossby del hemisferio norte dio lugar a un anticiclón en altura sobre territorio mexicano propiciando las condiciones idóneas para generar la ola de calor.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OLAS DE CALOR	1
1.1.1 Definiciones	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO	6
CAPÍTULO 2. DATOS Y METODOLOGÍA	7
2.1 ZONA DE ESTUDIO	7
2.2 DATOS	11
2.2.1 Datos de reanálisis	11
2.2.2 Datos observados	12
2.3 METODOLOGÍA	14
2.3.1 Tendencias	14
2.3.2 Prueba de significancia	14
2.3.3 Clasificación de las olas de calor	15

CAPÍTULO 3. DETECCIÓN DE LAS OLAS DE CALOR	16
3.1 ALGORITMO DE DETECCIÓN	16
3.2 TEST DE SENSIBILIDAD	19
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	25
4.1 CATÁLOGO DE LAS OLAS DE CALOR	25
4.2 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL	27
4.3 PATRONES DE LAS OLAS DE CALOR	32
4.4 CASO DE ESTUDIO	39
CAPÍTULO 5. DISCUSIONES FINALES	46
5.1 CONCLUSIONES	46
5.2 RECOMENDACIONES FUTURAS	47
REFERENCIAS	49
APÉNDICE A	53
APÉNDICE B	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Zona de estudio (morado), con un total de 20 pixeles a una resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ posicionada sobre el área continental comprendida entre $[19-21^{\circ} \text{N}, 257-263^{\circ} \text{E}]$	7
Fig. 2.2. Orografía de México, en negro el dominio de la región de estudio. Valores en [m]. Datos de hipsometría, CONABIO.	8
Fig. 2.3 Promedios climatológicos (1979-2021) mensuales de la temperatura a 2m [$^{\circ}\text{C}$] (línea roja) y precipitación total [mm] (línea verde) sobre la región de estudio. Datos obtenidos del reanálisis de ERA5.	9
Fig. 2.4. Densidad poblacional en México, en negro el dominio de la región de estudio. Valores en [hab/km^2]. Datos del censo 2020, INEGI.	10
Fig. 2.5. Ubicación de las 237 EMAs utilizadas. Las estaciones en morado se encuentran a una altitud menor a 1000 m, en naranja entre 1000-2000 m y en rojo a más de 2000 m. En negro se resalta el dominio de la zona de estudio.	11
Fig. 3.1 Metodología del algoritmo para la identificación de las HW. Modificada de Sánchez-Benítez et al. (2020).	18
Fig. 3.2 Análisis de falsas alarmas (días calurosos detectados por el algoritmo pero no en las observaciones). Los colores indican la frecuencia relativa de días calurosos ($T_{\text{max}} > P95$) en cada punto de malla y estación, calculada con respecto a la frecuencia total de falsas alarmas.	21
Fig. 3.3 Serie temporal de los días calurosos registrados en las observaciones (naranja) e identificados por el algoritmo (azul). En verde el número de aciertos (fechas coincidentes entre observaciones y el algoritmo).	22
Fig. 3.4 Serie temporal de la frecuencia de aciertos y errores de días calurosos en el algoritmo. En naranja los falsos negativos (días calurosos no detectados por el algoritmo), en azul las falsas alarmas (días erróneamente clasificados como calurosos por el algoritmo) y en verde el número de aciertos (fechas coincidentes entre observaciones y el algoritmo).	23
Fig. 4.1. Duración (en días) de las 130 HW que pasaron por el centro de México. Las líneas naranja y azul corresponden a la duración completa del evento y a la duración de la fase CM (HD), respectivamente.	26

Fig. 4.2 Serie de la temperatura máxima a 700 hPa (T700) en el centro de México en la primavera (marzo-mayo) para el periodo de 1979-2021. La línea roja indica la tendencia (recta de la regresión) con la magnitud (m) y significatividad (p) que se indican en el título.	27
Fig. 4.3 Como la Fig. 4.2 pero para el número de olas de calor (HW) en el centro de México.	28
Fig.4.4. Tendencias mensuales de la frecuencia de HW (eventos/mes) para el periodo 1979-2021 en los meses de marzo, abril y mayo.	29
Fig. 4.5. Como la Fig. 4.2 pero para la frecuencia de HD en el centro de México.	30
Fig. 4.6. Como la Fig. 4.2 pero para la duración individual (HD) de cada HW sobre la región CM.	30
Fig.4.7. Mapas de densidad de frecuencia total (en días) y tendencia (en días / década) de HD para el periodo 1979-2021 y: (a,b) primavera; (c,f) marzo; (d,g) abril; (e-h) mayo. Los puntos verdes indican tendencias significativas al 90% ($p < 0.10$).	31
Fig. 4.8. Frecuencia relativa de olas de calor en las fases previa (Pre-CM, días [-3,-1]), simultánea (CM) y posterior (Post-CM, días [1,3]) al centro de México (en tanto por uno relativo al número de HW que afectan en cada fase en el periodo 1979-2021).	33
Fig. 4.9. Frecuencia relativa de olas de calor en días previos (panel superior) y posteriores (panel inferior) a la fase CM (en tanto por uno relativo al número total de HW que afectan al CM en el periodo 1979-2021). La fase pre-CM (post-CM) corresponde a los días anteriores al primer día (posteriores al último día) de la fase CM.	34
Fig. 4.10. Similar a la figura 4.8 pero para las HW del cluster1 (izquierda) y cluster2 (derecha) por separado. Las filas de paneles muestran la fase Pre-CM (panel superior), CM (panel central) y Post-CM (panel inferior).	36
Fig. 4.11. Frecuencia mensual de HW del Cluster1 (fila superior) y Cluster2 (fila inferior). Los diagramas muestran las frecuencias mensuales de eventos (en porcentaje con respecto al número total de HW detectadas en cada cluster y fase) para las fases Pre-CM (días [-3,-1]), CM y Post-CM (días [1,3]).	38
Fig. 4.12. Anomalías de T700 (°C) para cada día de las fases Pre-CM (días [-3,-1] anteriores a CM), CM y Post-CM (días [+1,+3] posteriores a CM). En negro se indica el dominio del CM.	41

Fig. 4.13. Compuestos de las anomalías de la altura geopotencial y viento a 200 hPa (paneles izquierdos) y 850 hPa (paneles derechos) en las tres fases del evento: Pre-CM (fila superior), CM (fila central) y Post-CM (fila inferior). Los contornos en gris corresponden a las anomalías de altura geopotencial. En color café se muestran las anomalías de la SST mayores a +2 °C.	42
Fig. 4.14. Similar a la Figura 4.13 pero para las anomalías de SST [°C] (panel izquierdo) y OLR [W/m ²] (panel derecho). Los valores negativos (positivos) de las anomalías de OLR representan un aumento (disminución) de la nubosidad.	44
Fig. 4.15. Climatología (1981-2010) de la temperatura a 2 metros [°C] para el mes de abril.	45
Fig. A1. Series temporal de las HW. En morado para el cluster1, verde el cluster2 y en líneas verticales rojas se indican las primaveras tras haberse registrado un evento El Niño fuerte (anomalías positivas entre 1.5-1.9 °C) o muy fuerte (anomalías positivas mayores a 2 °C) durante el invierno (1982-1983, 1987-1988, 1991-1992, 1997-1998, 2015-2016).	53
Fig. A2. Frecuencia de los eventos de ola de calor en el centro de México por mes (marzo, azul; abril, naranja; mayo, verde) y década (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020).	54
Fig.B1. Climatología (1981-2010) de la temperatura máxima a 700 hPa [°C].	55
Fig.B2. Similar a la Fig.B1 para la temperatura superficial del mar [°C].	55
Fig.B3. Similar a la Fig.B1 para la altura geopotencial [m] y el campo de viento a 200 hPa	56
Fig.B4. Similar a la Fig.B1 para la altura geopotencial [m] y el campo de viento a 850 hPa	56
Fig.B5. Similar a la Fig.B1 para la radiación de onda larga saliente (OLR) [W/m ²].	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Definiciones de ola de calor usadas en estudios para México.....	3
Tabla 3.1. Análisis comparativo de los días calurosos observados e identificados por el algoritmo. Aciertos en observaciones indica el porcentaje de los días calurosos observados que coinciden con los del algoritmo, aciertos del algoritmo a los identificados por el algoritmo que coinciden con las observaciones. Cada celda muestra la información correspondiente con una duración (dur) de los días calurosos de 1día / 3días.....	19
Tabla 4.1. Características de los eventos del catálogo de olas de calor del centro de México (1979-2021). HW se refiere a los eventos de ola de calor y HD a los días de olas de calor.	26
Tabla 4.2. Características de las HW por grupo (Cluster1 y 2). Cada celda muestra la información correspondiente a las fases Pre-CM / CM / Post-CM.	37

LISTA DE ACRÓNIMOS

	Acrónimo	Traducción al español
Centro de México	CM	
Estación meteorológica automática	EMA	
Heat wave days	HD	Días de ola de calor
Heat wave	HW	Ola de calor
Self-Organazing Maps	SOM	Mapas auto-organizados
Sea surface temperature	SST	Temperatura superficial del mar

Nota: En la mayoría de los casos se ha optado por utilizar el acrónimo en inglés

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 OLAS DE CALOR

Las olas de calor (HW, en sus siglas en inglés) son eventos extremos asociados a altas temperaturas. En los últimos años se ha observado un incremento de la temperatura global, tanto de la temperatura máxima como mínima. El cambio es especialmente marcado a partir de 1980 en las series de temperatura en superficie continental y oceánica (Sadhukhan et al., 2022). En el periodo de 1951-2012 la tendencia en la temperatura superficial continental fue de 0.18 °C/década, mientras que en el subperiodo de 1979-2012 fue de 0.25 °C/década (IPCC, 2013). En el 2020 se observó una anomalía de 1.26 °C de la temperatura media global en superficie respecto al periodo base de 1850-1900 (IPCC, 2021). Los datos son consistentes con un acelerado incremento de la temperatura en décadas recientes.

A su vez, se ha registrado un aumento de la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor en muchas regiones del planeta (IPCC, 2021). De acuerdo a los modelos de circulación global, estas tres características se acrecentarán en las próximas décadas, en especial bajo escenarios de cambio climático (Barriopedro et al., 2023; Domeisen et al., 2023).

Al ser eventos extremos tienen consecuencias adversas en distintos sectores, como son salud (García-Herrera et al., 2005), agricultura (ej. Chung et al., 2014; Brás et al., 2021), ganadería (ej. Morignat et al., 2014; Bishop-Williams et al., 2015) o la demanda energética (Larcom et al., 2019), resultando en impactos a la economía.

La exposición a altas temperaturas ocasiona estrés por calor, generando problemas de salud y en algunos casos la muerte (Kovats & Hajat, 2008). Los principales problemas están relacionados a enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares y respiratorias (Ebi & Meehl, 2007). El tiempo de exposición a altas temperaturas y la edad son factores de riesgo, pudiendo causar deshidratación, insuficiencia renal y septicemia, en especial en los adultos mayores (Bobb et al., 2014).

En latitudes medias, las olas de calor se asocian comúnmente con sistemas sinópticos de alta presión en la troposfera media y alta que se posicionan sobre la región afectada, dando como resultado cielo despejado que deja pasar directamente la radiación solar hacia la superficie, corrientes descendentes de aire que se calientan adiabáticamente y advección cálida de bajas latitudes; el calentamiento puede ser reforzado por flujos de calor sensible en presencia de sequedad del terreno (ej. Domeisen et al., 2023). En general, los mecanismos estudiados pueden agruparse en tres: sistemas sinópticos, interacción superficie-atmósfera y variabilidad climática (Perkins, 2015).

1.1.1 Definiciones

Las olas de calor no cuentan con una definición única; a grandes rasgos se entiende por ola de calor un episodio de altas temperaturas que permanece durante cierto periodo. Lo anterior permite que cada autor proponga su propia definición con base en el objetivo de su estudio, la escala espacial y temporal, o los efectos que pretendan abordarse. Por ejemplo, aunque suelen definirse en términos de temperatura, en aplicaciones en salud es común emplear ciertos índices de confort térmico que incluyen otras variables como humedad o radiación solar. La condición de ola de calor se establece mediante umbrales, que pueden ser absolutos o relativos (Robinson, 2001); estos últimos suelen estar basados en percentiles y son comúnmente usados por la comunidad científica.

Entre las definiciones más conocidas se encuentra la que ha dado la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), que define una ola de calor como un episodio en donde se sobrepasa al menos 5 °C la temperatura máxima promedio de 1961 a 1990 durante un periodo de 5 días o más. Así mismo, distintas instituciones han establecido sus propias definiciones. El Servicio Meteorológico del Reino Unido (MetOffice UK) la define como dos días o más en el que la temperatura promedio del día sobrepasa los 30 °C y la temperatura promedio de la noche los 15 °C. La Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) utiliza un periodo de al menos 3 días con temperaturas superiores al percentil 95 (P95) de la temperatura máxima de los meses de julio y agosto. La

Administración Meteorológica China (CMA, por sus siglas en inglés) utiliza un umbral fijo de 30 °C para la temperatura máxima y una duración de al menos 3 días.

Tabla 1.1 Definiciones de ola de calor usadas en estudios para México.

Autores	Variables	Umbral	Duración	Zona de estudio
Jáuregui (2009)	Tmax o Tmedia	30 °C (Tmax) o 24 °C (Tmedia)	3 días	Ciudad de México
García-Cueto et al. (2010)	Tmax	P90	2 días	Mexicali
Herrera (2012)	Tmax y Tmin	P90	2 días	República Mexicana
Espinoza (2013)	Tmax y Tmin	P90	2 días	Noroeste de México
Martínez-Austria et al. (2015)	Tmedia	P90	--	Mexicali
Navarro-Estupiñan et al. (2018)	Tmax	P90	2 días	Sonora

Así mismo existen definiciones basadas en índices, como es el caso de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y el Servicio Meteorológico Israelí (IMS), quienes utilizan un índice de calor en términos de la temperatura ambiente y de la humedad relativa. Los índices que incluyen una variable de humedad comúnmente están pensados en el confort térmico. A mayor humedad el cuerpo experimenta mayor dificultad para refrescarse, ya que la evaporación de la sudoración (el mecanismo natural de refrigeración) se obstaculiza en condiciones de alta humedad ambiental (Berglund, 1998).

En el caso de México no se cuenta con una definición establecida. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) da una descripción un tanto ambigua: “calentamiento importante del aire o invasión de aire muy caliente sobre una zona extensa que suele durar de unos días a una semana”. El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) considera tres días o más con temperaturas máxima y mínima por encima de su percentil 90. Los distintos estudios que se han realizado para la República Mexicana se han basado principalmente en un valor umbral de la temperatura de una región específica, en su mayoría para el norte del país, y gran parte de estos trabajos han utilizado un periodo de al menos dos días. En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de las definiciones empleadas en la bibliografía existente sobre olas de calor para México.

Si bien ha habido cierta discusión por parte de algunos científicos sobre la necesidad de definir a las olas de calor de la misma manera, hasta el momento esto no se ha logrado. Una de las ventajas en unificar la definición de dichos eventos es el poder comparar los estudios que se realizan. Por otra parte, esto ocasionaría que se abordaran siempre desde una misma perspectiva, lo que no resulta factible dada la diversidad de impactos que ocasionan.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En México se han realizado diversos estudios de extremos de temperatura desde un punto de vista de su frecuencia, duración, intensidad, tendencia o proyecciones futuras del comportamiento de esta variable. Estos coinciden en un aumento en los últimos años y en

que seguirá dicha tendencia en las proyecciones futuras (García-Cueto et al., 2019; Martínez-Austria et al., 2015).

Por ejemplo, en la Ciudad de México las olas de calor en la década de 1990 casi se duplicaron respecto a los años 1970, y casi triplicaron la de la década de 1950 (Jauregui, 2009). El aumento de temperatura junto con el cambio en otros factores como la cobertura del suelo o el régimen de precipitación traerán consigo un aumento en el número de eventos de olas de calor a corto y mediano plazo (Navarro-Estupiñan et al., 2018).

El estudio de olas de calor también es importante en México debido a sus impactos en salud. Tan solo de 2004-2007 se registraron 43 muertes debidas a golpes de calor en el municipio de Mexicali (Contreras-Navarro, et al., 2016). Además, la exposición a altas temperaturas tiene efectos negativos a largo plazo (Agüero, 2014), por lo que resulta complicado cuantificar los impactos en salud y mortalidad. Así, predecir y emitir advertencias de estos eventos es crucial para mitigar sus impactos (IPCC, 2012).

1.3 OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo consiste en caracterizar climáticamente las olas de calor que afectan a la región centro de México a través de un análisis semi-lagrangiano.

Objetivos específicos

1. Generar un catálogo para el periodo de 1979-2021 con las olas de calor que afectaron al centro de México.
2. Estudiar la tendencia de los eventos de olas de calor.
3. Analizar la evolución de las olas de calor.
4. Relacionar patrones sinópticos a la ocurrencia de las olas de calor.

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos. En este primer capítulo se introducen las definiciones de los eventos de olas de calor y la importancia de estudiar dichos eventos con la finalidad de que el lector adquiera una idea general del tema.

En el segundo capítulo se describe la zona de estudio, los datos que se usaron y la metodología empleada para el desarrollo del trabajo.

El tercer capítulo está dedicado al proceso que se llevó a cabo para identificar las olas de calor y las características que deben cumplir estos eventos. Se describe el algoritmo de detección y los resultados del test de sensibilidad para su calibración.

En el cuarto capítulo se discuten los resultados del catálogo de olas de calor obtenido para la región de estudio, el análisis de la distribución temporal y espacial de los eventos, los patrones asociados a dichos eventos, y sus características más sobresalientes. Así mismo, se analiza un caso de estudio de la ola de calor más intensa para el año con mayor registro de eventos durante todo el periodo (1998).

Finalmente, en el capítulo cinco hay una discusión final en la que se resumen las conclusiones más importantes y una serie de recomendaciones para un trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra en la parte central de México, para la cual los estudios sobre olas de calor han sido escasos hasta el momento. Se usó el área continental del dominio [19-21 °N, 257-263 °E] (Fig. 2.1), que cuenta con una extensión aproximada de 230,000 km². La elección del dominio se basó principalmente en tres criterios:



Fig. 2.1 Zona de estudio (morado), con un total de 20 píxeles a una resolución espacial de 1°x1° posicionada sobre el área continental comprendida entre [19-21 °N, 257-263 °E].

1. Selección de regiones homogéneas:

La orografía en México es compleja y cuenta con elevaciones importantes. En su mayoría es un país montañoso, y en la zona de estudio se ubican varias de estas (Fig. 2.2). Entre las

principales en cuanto a su elevación se encuentra el Pico de Orizaba (5610 m), el Popocatepetl (5432 m), el Iztaccíhuatl (5230 m) y el Nevado de Toluca (4680 m). Así mismo cuenta con profundos Valles, entre los que destaca el valle de México con una extensión de 9,600 km².



Fig. 2.2. Orografía de México, en negro el dominio de la región de estudio. Valores en [m]. Datos de hipsometría, CONABIO.

La elección del dominio tiene en cuenta que en el centro de México (CM) la temperatura está fuertemente relacionada con el régimen de precipitación. Los meses más cálidos son los previos a la temporada de lluvia, debido a que la precipitación tiende a disminuir la temperatura (Fig. 2.3). La precipitación en México avanza latitudinalmente de sur a norte con el transcurso del verano. Es por ello que el dominio es más estrecho en latitud que en longitud; de esta manera se incluyen regiones con un régimen de lluvia similar. Por lo tanto, las zonas del dominio son homogéneas en cuanto a su temporada de cálidas y secas, que corresponde a la temporada de primavera (marzo, abril y mayo). Bajo estas condiciones

hidro-climáticas es mucho más probable presenciar eventos intensos de olas de calor y los efectos que traen consigo.

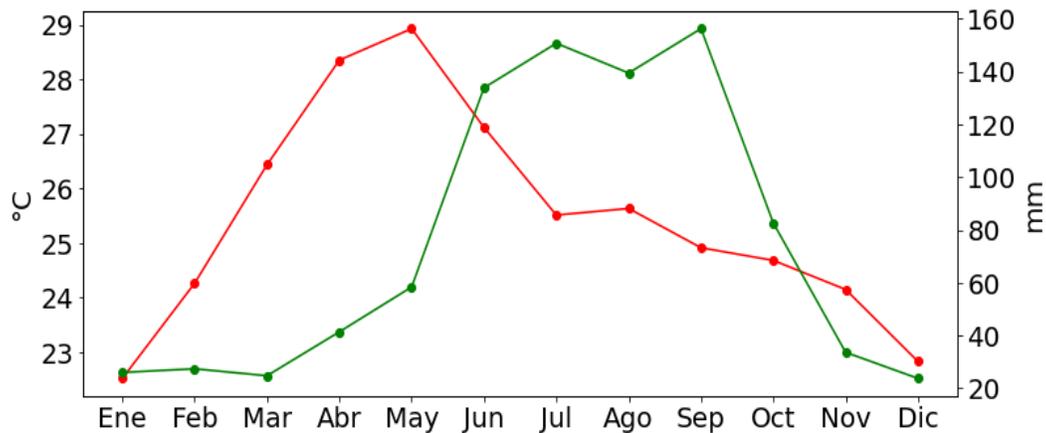


Fig. 2.3 Promedios climatológicos (1979-2021) mensuales de la temperatura a 2m [°C] (línea roja) y precipitación total [mm] (línea verde) sobre la región de estudio. Datos obtenidos del reanálisis de ERA5.

2. Alta densidad poblacional:

En CM se encuentra la mayor densidad poblacional (Fig. 2.4), tan solo en la Ciudad de México es de 6,163 hab/km² (INEGI, 2020)¹ y en todo el Valle de México habitan más de 20 millones de personas que representan alrededor del 17% de la población nacional, por lo tanto, constituye el centro económico, financiero, político y cultural de México (OECD, 2015). Centrarse en una zona densamente poblada permite abordar los riesgos en la salud que se pueden presentar en la población.

¹ Densidad poblacional con base en el censo poblacional 2020, INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P#:~:text=De%20acuerdo%20con%20el%20Censo,64%20habitantes%20por%20kil%C3%B3metro%20cuadrado.> Consultado el 1 de diciembre de 2022.

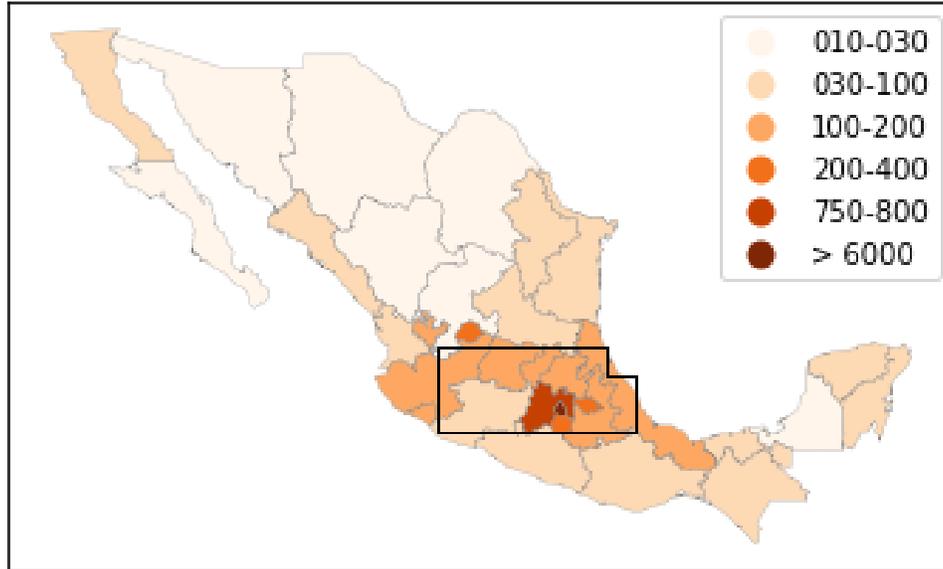


Fig. 2.4. Densidad poblacional en México, en negro el dominio de la región de estudio. Valores en [hab/km²]. Datos del censo 2020, INEGI.

3. Disposición de datos observados:

La distribución de las estaciones meteorológicas y climáticas en México no es homogénea. Las observaciones son necesarias para evaluar la eficiencia del algoritmo de detección en la zona de estudio y realizar una correcta calibración. De esta forma el dominio se eligió de tal manera que todos sus píxeles (a una resolución de $1^\circ \times 1^\circ$) cuenten con estaciones (Fig. 2.5) para poder realizar una comparación de los eventos de ola de calor detectados por el algoritmo y registrados en las estaciones. A pesar de ello, la densidad de estaciones es variable a lo largo del dominio (más información respecto a la calibración del algoritmo se encuentra en la sección 3.2).

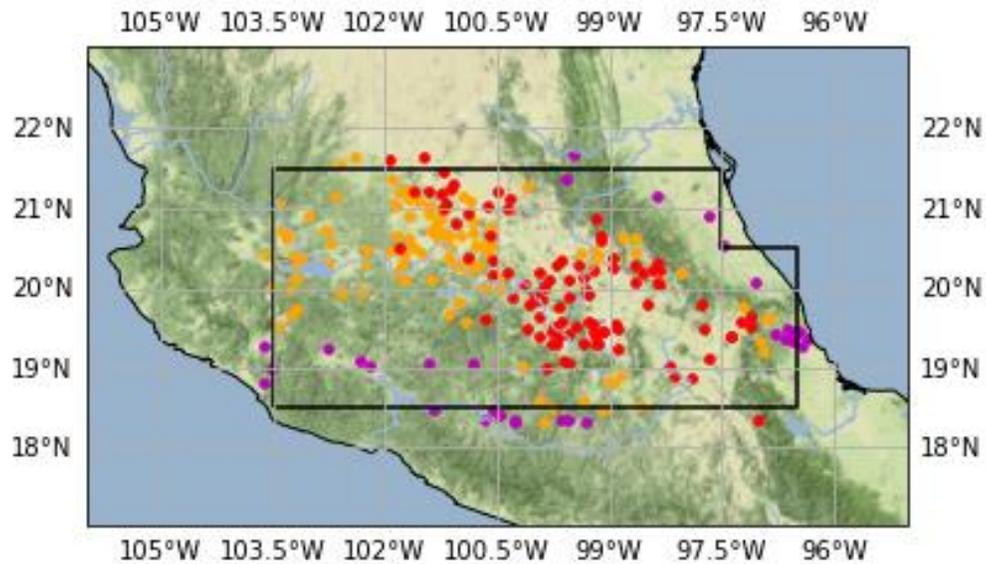


Fig. 2.5. Ubicación de las 237 EMAs utilizadas. Las estaciones en morado se encuentran a una altitud menor a 1000 m, en naranja entre 1000-2000 m y en rojo a más de 2000 m. En negro se resalta el dominio de la zona de estudio.

2.2 DATOS

Se usaron dos tipos de datos, procedentes de un reanálisis y de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) pertenecientes a la red de estaciones del SMN.

2.2.1 Datos de reanálisis

Los datos del reanálisis representan una combinación de datos observados y salidas de modelos y actualmente proporcionan la imagen más completa posible del tiempo y clima pasado. Entre las ventajas de usar reanálisis se encuentra el tener datos globales ordenados en una malla regular y series históricas continuas. Los reanálisis usan técnicas de asimilación

de datos para incorporar las observaciones a las corridas de los modelos, las cuales son previamente tratadas con un control de calidad.

La base de datos ERA5 (Hersbach et al., 2018) es la quinta generación de reanálisis del centro europeo ECMWF² y está disponible con una cobertura global³. La variable usada para la detección de los eventos de olas de calor e identificación de sus patrones fue la temperatura máxima diaria en el nivel de 700 hPa (T700), para el periodo de 1979-2021 y con una resolución espacial de 1°x1°. Para analizar el evento del caso de estudio, además de usar T700, se usó el geopotencial y el campo de viento a 200 y 850 hPa.

2.2.2 Datos observados

Los datos observados corresponden a datos diarios de la temperatura máxima de 237 EMAs de la red de estaciones del SMN⁴, distribuidas a lo largo de la región de estudio (Fig. 2.5), con un periodo de registros de 1979-2017. En la figura 2.4 se muestra su localización geográfica y los colores representan el rango de altitud al que se encuentran, que oscila entre 19 y 3290 m.

Los datos in situ pueden presentar errores intrínsecos de las mediciones, por ejemplo, una mala instalación de los instrumentos, ubicación poco favorable o falta de mantenimiento, además de saltos en las series debido a cambios de ubicación. Por lo tanto, los datos fueron previamente tratados con un control de calidad y pasaron por un proceso de homogeneización. El examinar todo el conjunto de datos que genera una EMA es bastante difícil y los errores pueden pasar inadvertidos a menos que se definan procesos de control de

² Información de los datos de reanálisis del modelo europeo ECMFW
<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/focus/2020/fact-sheet-reanalysis>.
Consultado el 26 de septiembre de 2022.

³ Base de datos de ERA5 en niveles de presión
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>.
Consultado el 26 de septiembre de 2022.

⁴ Red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional
<https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>.
Consultado el 23 de agosto de 2022.

calidad (Araya, 2008). Con base en los trabajos de Reek et al. (1992) y Mahmood et al. (2016) se aplicó un control de calidad a los datos de las 237 EMAs, el cual consistió en cinco sencillos test:

1. Test de consistencia interna:

La temperatura máxima debe ser mayor a la temperatura mínima del mismo día y de un día anterior ($Tmax_o > Tmin_o$ y $Tmax_o > Tmin_{-1}$)

2. Test de persistencia:

La Tmax y Tmin no deben permanecer iguales durante 5 días consecutivos o más.

3. Test de rango diurno:

La diferencia entre la Tmax y Tmin de un día no debe ser mayor a 30 °C. Dicho rango es bastante permisivo considerando que el CM cuenta con elevaciones importantes donde la oscilación diaria de la temperatura suele ser mayor que en altitudes bajas.

4. Test de valores atípicos:

Para identificar y eliminar valores atípicos, se hizo uso del método de Turkey o rango intercuartil, ya que a diferencia de los métodos de desviación estándar este es menos sensible a los extremos.

$$\text{extremo máximo} = Q3 + 2IQR$$

$$\text{extremo mínimo} = Q1 - 2IQR$$

5. Test de valores vacíos:

Se seleccionan únicamente las estaciones que contienen al menos el 85% de los datos durante el periodo de 1979-2017.

Posterior al control de calidad, los datos pasaron por un proceso de homogeneización con la paquetería CLIMATOL del software R, que utiliza el *Standard Normal Homogeneity Test* (SNHT) (Guijarro, 2018). El SNHT desarrollado por Alexandersson (1986) identifica puntos de quiebre (T_{max}) comparando los promedios del periodo previo y posterior a la observación

en cierto tiempo (a) del total de pasos de tiempo (n). El valor máximo de T se define de la siguiente manera:

$$T_{max} = Max\{T_0\} = Max\{a\bar{Z}_1^2 + (n - a)\bar{Z}_2^2\}$$

Donde Z_1 y Z_2 son el promedio de las series normalizadas de la diferencia (Q) entre la estación analizada y de referencia:

$$Z_1 = \frac{1}{a} \frac{\sum_{i=1}^a (Q_i - \bar{Q})}{\sigma_Q} \quad \text{y} \quad Z_2 = \frac{1}{n-a} \frac{\sum_{i=a+1}^n (Q_i - \bar{Q})}{\sigma_Q}$$

2.3 METODOLOGÍA

2.3.1 Tendencias

El trabajo analiza las series de frecuencia de olas de calor y sus cambios a largo plazo. Las tendencias fueron calculadas por medio de la pendiente de la regresión lineal simple, la cual describe la relación lineal entre dos variables, una dependiente y otra independiente (tiempo). Los datos se ajustan por medio del método de mínimos cuadrados con la finalidad de minimizar las distancias entre la recta y los datos (Wilks, 2006). La pendiente de la regresión proporciona una medida de la tendencia.

2.3.2 Prueba de significancia

La significancia de las tendencias fue testada con la prueba de hipótesis F. Una de las medidas utilizadas en regresión es el estadístico F, el cual está dado por la siguiente relación:

$$F = \frac{MSR}{MSE}$$

Donde MSR y MSE corresponden a los residuos cuadráticos medios y el error cuadrático medio de la regresión. Si se asume que los residuos son independientes y siguen una

distribución Gaussiana, la hipótesis nula es que no existe una relación lineal real. La distribución muestral de F es aplicable en el caso de la regresión lineal simple (Wilks, 2006) y permite evaluar la significancia de la regresión y el valor p de la prueba (Draper & Smith 1993).

2.3.3 Clasificación de las olas de calor

Entre las técnicas más comunes de *clustering* o agrupamiento de datos se encuentra la llamada *Self-Organizing Maps* (SOM) o *Kohonen maps* (Kohonen, 1982).

El SOM trabaja por medio de un algoritmo de red neuronal con los datos de entrenamiento en cada iteración para identificar patrones espaciales. Puede ser inicializado aleatoriamente o usando una función ortogonal empírica (EOF) de los datos. El método SOM se ha empleado en este trabajo para identificar grupos o *clusters* de eventos de ola de calor en base a la evolución espacio-temporal de sus patrones de temperatura. Para ello, se calcularon los patrones medios de anomalía estandarizada de T700 (con respecto a la climatología base 1981-2010) sobre la región [-10-50 °N, 230-290 °E] para tres fases de cada evento de ola de calor: la fase previa (pre-CM), simultánea (CM) y posterior (post-CM) a que el evento afecte la región CM.

La fase CM incluye todos los días consecutivos en los que el evento afecta la región CM, obteniendo un único patrón por cada evento. Similarmente, las fases pre-CM y post-CM de cada evento consideran el periodo de 3 días previos al primer día de la fase CM y los 3 días posteriores al último día de la fase CM, respectivamente. De esta forma, cada evento viene caracterizado por tres patrones (pre-CM, CM y post-CM) y el SOM permite agrupar eventos en base a la similitud de su ciclo de vida.

CAPÍTULO 3. DETECCIÓN DE LAS OLAS DE CALOR

En el presente trabajo se utilizó el algoritmo desarrollado por Sánchez-Benítez et al. (2020) para detectar olas de calor, con la finalidad de identificar los eventos que afectaron a la región CM (Fig. 2.1) en su temporada cálida y seca, es decir, la primavera (marzo, abril y mayo) durante el periodo de 1979-2021. Dichos eventos conforman el primer catálogo de olas de calor para el centro de México.

3.1 ALGORITMO DE DETECCIÓN

El catálogo se generó a través de un algoritmo semi-lagrangiano, que detecta la evolución espacio-temporal de los patrones de olas de calor. La metodología que sigue el algoritmo para identificar las olas de calor se encuentra de manera esquemática en la Figura 3.1. Trabaja con datos diarios de temperatura en malla para identificar los días y puntos de la malla en los que la temperatura sobrepasa cierto umbral (P). El umbral se define localmente (para cada punto de malla) y varía con el ciclo estacional. El algoritmo puede ser implementado a nivel global y permite modificar la climatología base ($clim$, en este caso definida para el periodo 1981-2010).

El patrón de una ola de calor consiste en un conjunto de puntos con una separación máxima entre ellos (sep_max) que cumplen las condiciones locales anteriores ($T_{max} > P$) y cubren en total una extensión espacial mínima (ext_min). De acuerdo con Sánchez-Benítez et al., (2020) las condiciones locales de ola de calor no necesariamente deben darse en puntos de malla vecinos para pertenecer al mismo patrón, sino pueden estar separados por cierta distancia máxima (sep_max). Si el patrón persiste durante un número mínimo de días (dur) se considera un evento de ola de calor, de lo contrario es descartado. El patrón de ola de calor puede perdurar de un día al siguiente, bajo condiciones cuasi-estacionarias o transitorias. Para las cuasi-estacionarias los patrones detectados en días consecutivos deben superponerse al menos un 50%; en el caso de las transitorias se permite cualquier solape no nulo siempre

y cuando el centro de masa del evento no se haya desplazado más de 1000 km respecto del día anterior.

Los valores usados para el umbral de la temperatura (P), la climatología base (clim), la extensión espacial mínima (ext_min), separación máxima entre máximos locales (sep_max) y persistencia mínima del evento (dur) fueron seleccionados con base en una calibración previa en la región de estudio, siendo los siguientes:

- P: Percentil 95 (P95) de la temperatura máxima a 700 hPa, calculado localmente y para cada día del calendario con una ventana móvil de 31 días.
- clim: Climatología base de 1981-2010.
- ext_min: 250,000 km², coherente con la extensión del dominio.
- sep_max: 500 km
- dur: 4 días

Todas aquellas olas de calor identificadas por el algoritmo que tocaron algún punto de la zona de estudio durante los meses de marzo, abril o mayo se consideran como olas de calor de la región CM (referidas a partir de ahora como HW) y constituyen el catálogo de eventos para el periodo 1979-2021. Las HW se conforman únicamente del día o días en los que la ola de calor afectó al CM. Si una ola de calor detectada por el algoritmo duró más días de los que estuvo sobre el CM, dichos días son considerados como fases pre-CM o post-CM según sean anteriores o posteriores a la fase CM.

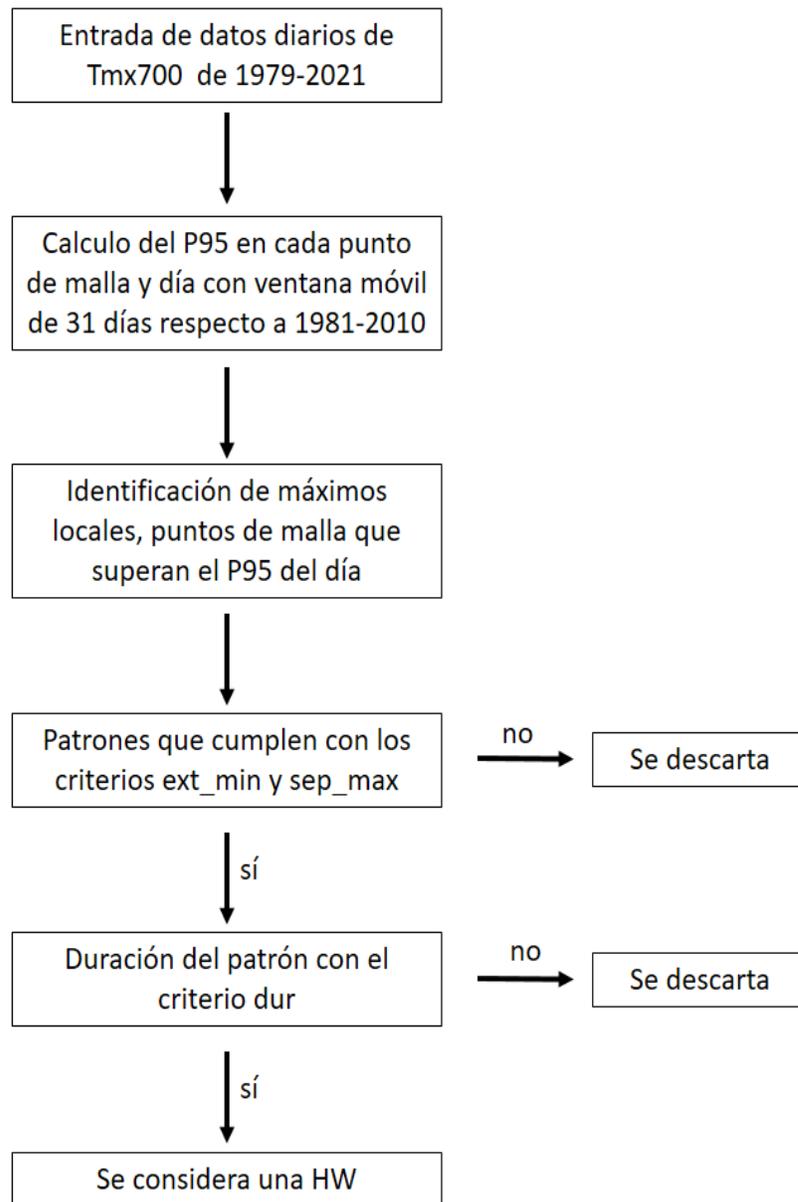


Fig. 3.1 Metodología del algoritmo para la identificación de las HW. Modificada de Sánchez-Benítez et al. (2020).

3.2 TEST DE SENSIBILIDAD

Para comprobar que los umbrales adoptados en el algoritmo de detección son robustos y adecuados para la zona de estudio, se procedió a realizar un test de sensibilidad el cual consistió en un análisis comparativo de los eventos que identifica el algoritmo contra los eventos observados. Dado que en México no se cuenta con un registro de olas de calor, para poder contrastar las salidas del algoritmo se usaron los datos de observaciones de Tmax de EMAs (Fig. 2.5) con registros de 1979-2017.

Tabla 3.1. Análisis comparativo de los días calurosos observados e identificados por el algoritmo. Aciertos en observaciones indica el porcentaje de los días calurosos observados que coinciden con los del algoritmo, aciertos del algoritmo a los identificados por el algoritmo que coinciden con las observaciones. Cada celda muestra la información correspondiente con una duración (dur) de los días calurosos de 1 día / 3 días.

	Marzo	Abril	Mayo
No. días observados	106 / 79	135 / 104	145 / 117
No. días del algoritmo	127 / 105	125 / 115	142 / 131
Fechas coincidentes	84 / 65	94 / 72	113 / 101
Aciertos en observaciones (%)	79 / 82	70 / 69	78 / 86
Aciertos del algoritmo (%)	66 / 62	75 / 63	80 / 67

La comparación entre el algoritmo y las observaciones se llevó a cabo en base a los días calurosos (días con $T_{max} > P95$) que se registran en el CM en ambos casos, sin imponer ninguna condición de persistencia ($dur = 1$ en el caso del algoritmo).

Al tratarse de eventos regionales, se considera un día caluroso observado cuando al menos el 15% de las estaciones (mínimo 36 estaciones) registran condiciones extremas ($T_{max} > P95$ de ese día), descartando así todos los posibles eventos ocasionados por efectos locales y no consistentes con el criterio de extensión mínima estipulado en el algoritmo de detección ($250,000 \text{ km}^2$). Al igual que en el algoritmo, el P95 de cada estación se calculó con una ventana de 31 días para cada día juliano, utilizando una climatología base de 1981-2010.

En la Tabla 3.1 se muestran los aciertos del algoritmo, los cuales corresponden al valor porcentual de los días en que el algoritmo identifica un día caluroso y este se ha registrado también en las observaciones. Existe una concordancia de alrededor del 70% entre el algoritmo y las observaciones, siendo el mes de mayo el que muestra mayores aciertos y marzo el de menores aciertos (esto último probablemente debido a que es un mes de transición). Los valores mostrados son satisfactorios y difíciles de mejorar debido a la distribución no homogénea de las estaciones. La mayor densidad se encuentra en el centro de la región, provocando que los mayores errores o discrepancias entre el algoritmo y las observaciones se registren en la periferia (Fig. 3.2). Por lo tanto, las falsas alarmas del algoritmo se deben en gran medida a eventos que afectaron a zonas aisladas o periféricas de CM, donde la densidad de estaciones es baja. Los resultados son similares tomando en cuenta los días calurosos observados y del algoritmo con una persistencia de 3 días.

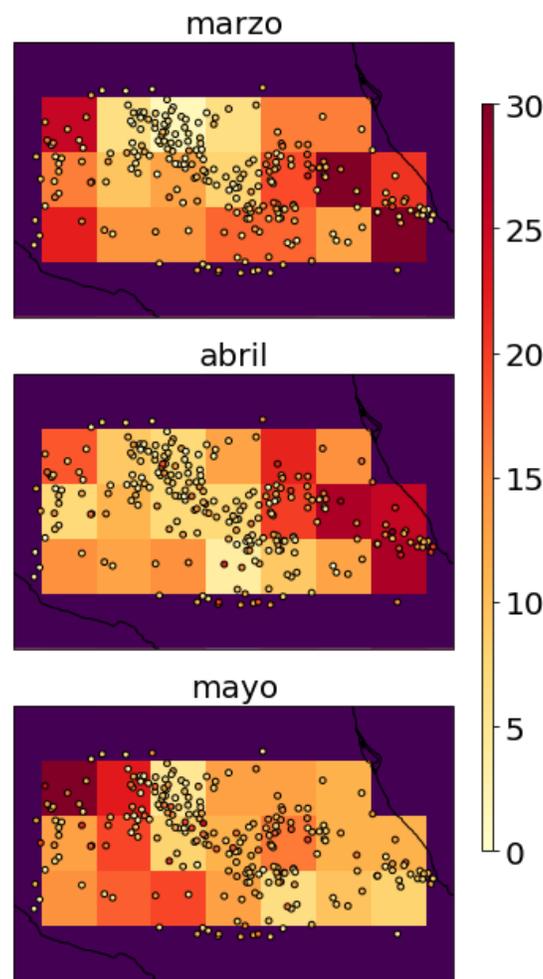


Fig. 1.2 Análisis de falsas alarmas (días calurosos detectados por el algoritmo pero no en las observaciones). Los colores indican la frecuencia relativa de días calurosos ($T_{max} > P95$) en cada punto de malla y estación, calculada con respecto a la frecuencia total de falsas alarmas

El análisis temporal de la Figura 3.3 muestra una fuerte correlación entre los eventos observados (línea naranja) y del algoritmo (línea azul), y un alto número de coincidencias (línea verde). Es notoria la fuerte influencia de los años El Niño en el número de días calurosos que se registran en ambos casos. Por lo que el algoritmo es capaz de reproducir los extremos en la serie temporal, aunque con cierta sobreestimación. Existen varios factores que

podrían explicar dicho comportamiento, es posible que varios registros de extremos de temperatura resultantes de eventos como El Niño hayan sido identificados como valores atípicos y descartados de las observaciones durante el control de calidad, o bien, que los días calurosos se registren sobre todo en la periferia sur de la región donde la densidad de estaciones resulta insuficiente (<15%) para catalogar un día caluroso observado.

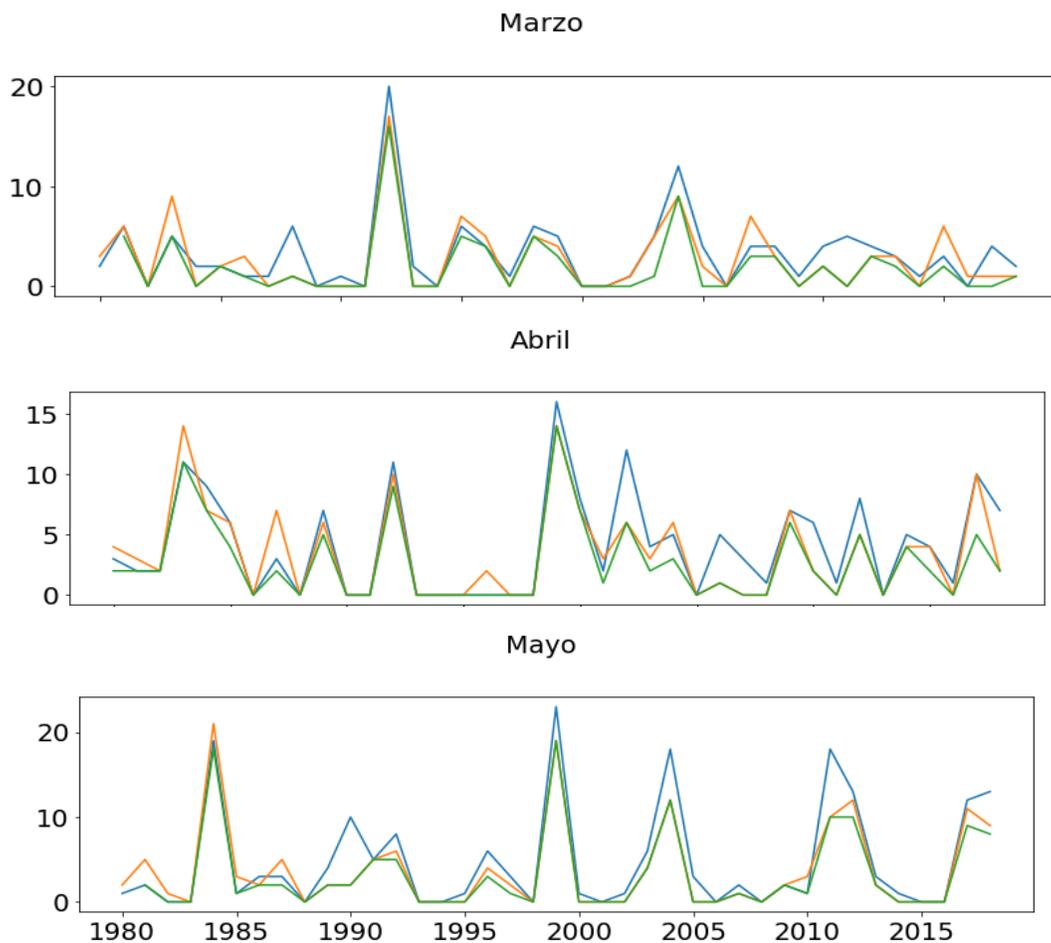


Fig. 3.3 Serie temporal de los días calurosos registrados en las observaciones (naranja) e identificados por el algoritmo (azul). En verde el número de aciertos (fechas coincidentes entre observaciones y el algoritmo).

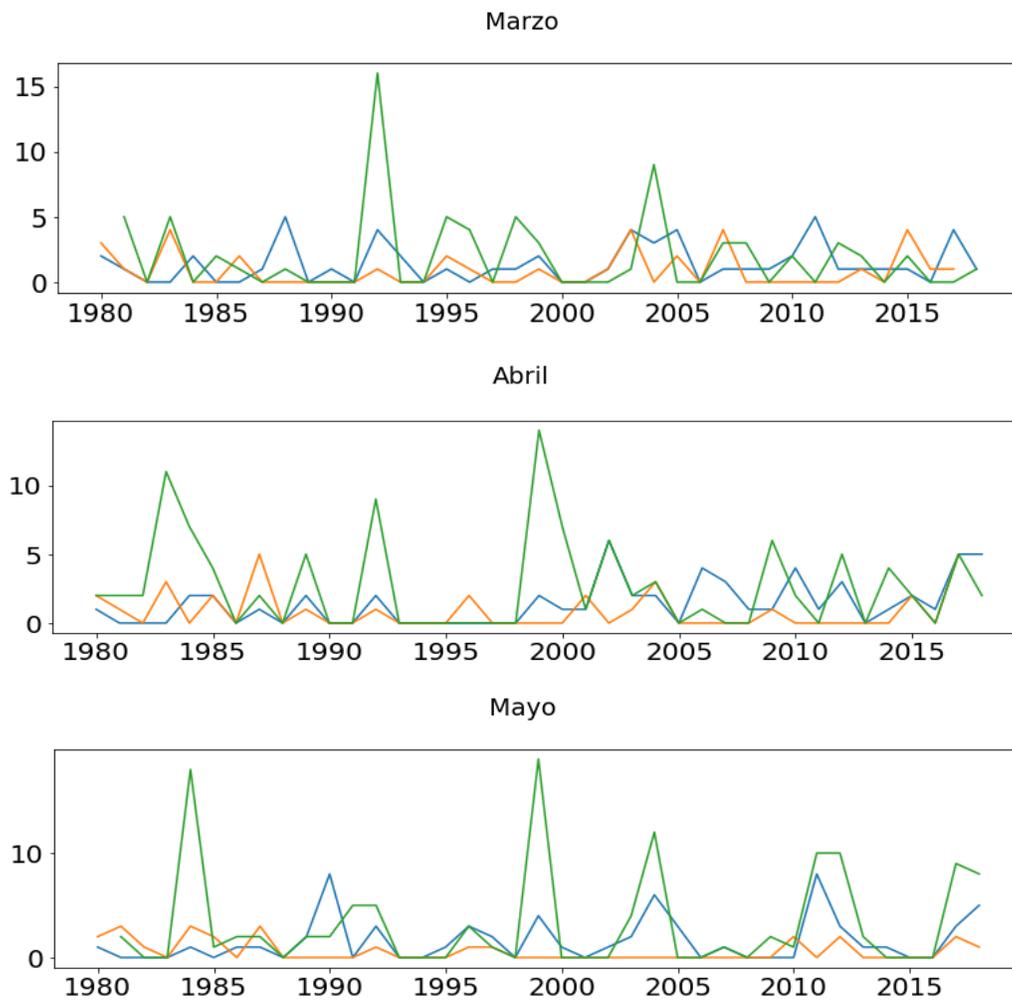


Fig. 3.4 Serie temporal de la frecuencia de aciertos y errores de días calurosos en el algoritmo. En naranja los falsos negativos (días calurosos no detectados por el algoritmo), en azul las falsas alarmas (días erróneamente clasificados como calurosos por el algoritmo) y en verde el número de aciertos (fechas coincidentes entre observaciones y el algoritmo).

Durante todo el periodo de estudio y durante los tres meses, el número de coincidencias entre las observaciones y el algoritmo es similar al de casos observados, lo que quiere decir que el algoritmo identifica la gran mayoría de los días calurosos observados (alto número de aciertos). Además, muestra mayor predisposición a las falsas alarmas que a los casos

perdidos. Estos errores se observan en la Figura 3.4, donde la línea naranja se refiere a los días que se observó un día caluroso y el algoritmo no lo identificó (falsos negativos) y la línea azul a los días en que el algoritmo identificó un día caluroso ausente en las observaciones (falsos positivos). Se observa que en general los falsos negativos son bastante poco frecuentes y en muchas ocasiones nulos, mientras que las falsas alarmas suelen estar por debajo de los 5 días. Por lo tanto, se puede concluir que el algoritmo (con los umbrales previamente establecidos) es un buen indicador de las olas de calor en el CM.

Además de los resultados aquí mostrados, se han llevado a cabo otros test de sensibilidad del algoritmo (p.ej Tmax vs. Tmedia, etc). La T700 es la variable que mejores resultados obtuvo en el test de sensibilidad. Distintos niveles fueron testeados, entre ellos a una altura de 2m sobre la superficie y los niveles de 850, 600 y 500 hPa. Para el CM, el nivel de 700 hPa es coherente con la presión que se registra en superficie (en toda la región mayor o igual a 700 hPa). Por otra parte, la temperatura a 2m (T2m) mostró un menor porcentaje de aciertos que T700.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 CATÁLOGO DE LAS OLAS DE CALOR

El catálogo está constituido por todas aquellas HW que el algoritmo detectó en los meses de marzo, abril y mayo durante el periodo de 1979-2021 y que tocaron por lo menos un punto de la región de estudio durante un día. Incluye únicamente los días en los que las HW estuvieron sobre el CM (fase CM), dichos días aquí referidos como HD. Si un evento en su ciclo completo de vida se detecta durante días que no afectaron al CM, estos son considerados días pre-CM o post-CM según sea el caso.

Para la primavera se conforma de un total de 130 HW que corresponden a 379 HD, con una media de 2.9 HD/evento y una desviación estándar de 2.3 HD/evento (Tabla 4.1). Esto nos da una medida de la persistencia media de los eventos sobre el CM (alrededor de 3 días), aunque la desviación estándar indica una gran variabilidad en la duración de los eventos. Marzo es el mes en el que se presenta una mayor frecuencia de HW, pero estas se pueden considerar ligeramente más transitorias que los demás meses, siendo mayo el mes en el que ocurren los eventos con mayor persistencia. En media se presentan 3 eventos al año a lo largo de la primavera, lo que representa una ola de calor por mes.

Como se observa en la Figura 4.1, las HW muestran una persistencia variada a lo largo del periodo de estudio y es claro que la duración de una HW (línea naranja) no está ligada a su duración sobre el CM (línea azul). En la mayoría de los casos, pero no en todos, el ciclo de vida del evento es mucho mayor que la duración de su fase CM, por lo que las HW suelen ser eventos transitorios que afectan temporalmente al CM durante su ciclo de vida. Así mismo, CM no representa una región preferente de génesis o desaparición de HW.

Tabla 4.1. Características de los eventos del catálogo de olas de calor del centro de México (1979-2021). HW se refiere a los eventos de ola de calor y HD a los días de olas de calor.

	HW	HD	Media	Desviación estándar
Primavera	130	379	2.9	2.3
Marzo	52	140	2.7	1.9
Abril	42	117	2.8	2.3
Mayo	40	122	3.0	2.6

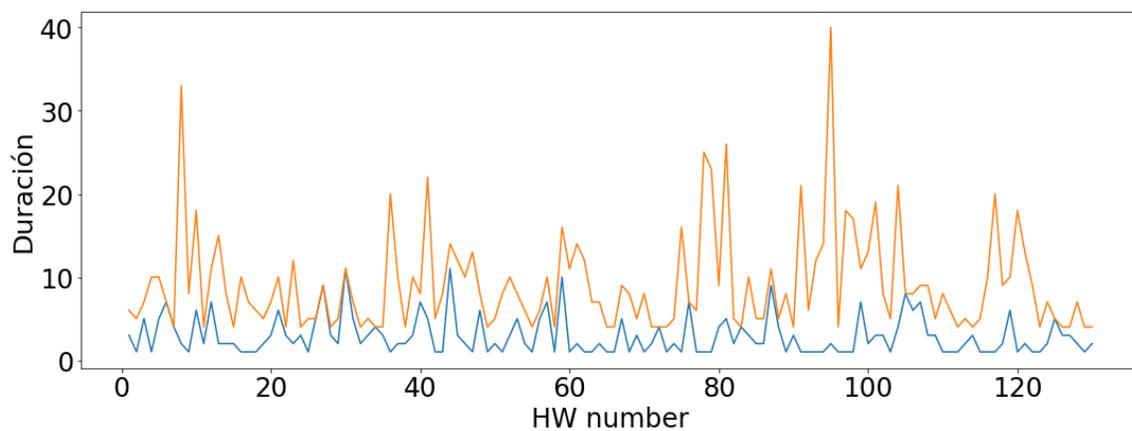


Fig. 4.1. Duración (en días) de las 130 HW que pasaron por el centro de México. Las líneas naranja y azul corresponden a la duración completa del evento y a la duración de la fase CM (HD), respectivamente.

4.2 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

De acuerdo con el incremento de la temperatura global, el CM ha experimentado una tendencia en la temperatura máxima a 700 hPa (T_{700}) de $0.2 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ ($p=0.02$) en la estación de primavera durante el periodo de 1979-2021 (Fig. 4.2). Esta tendencia aumenta a $0.25 \text{ }^\circ\text{C/dec}$ si se considera todo el año (no mostrado). La serie de frecuencias de HW muestra un comportamiento coherente al de la temperatura (mayor número de eventos en los años más cálidos) y su tendencia es de 0.76 HW/dec ($p<0.01$) (Fig 4.3), por lo que prácticamente se puede esperar una ola de calor más por cada década. Los años Niño muestran un claro aumento en el número de HW en el CM, entre los que se destacan el de 1983, 1992 y 1998.

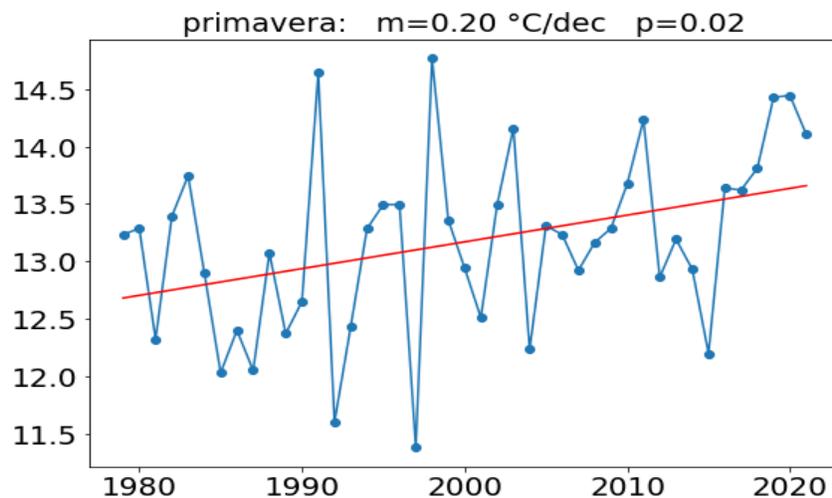


Fig. 4.2 Serie de la temperatura máxima a 700 hPa (T_{700}) en el centro de México en la primavera (marzo-mayo) para el periodo de 1979-2021. La línea roja indica la tendencia (recta de la regresión) con la magnitud (m) y significatividad (p) que se indican en el título.

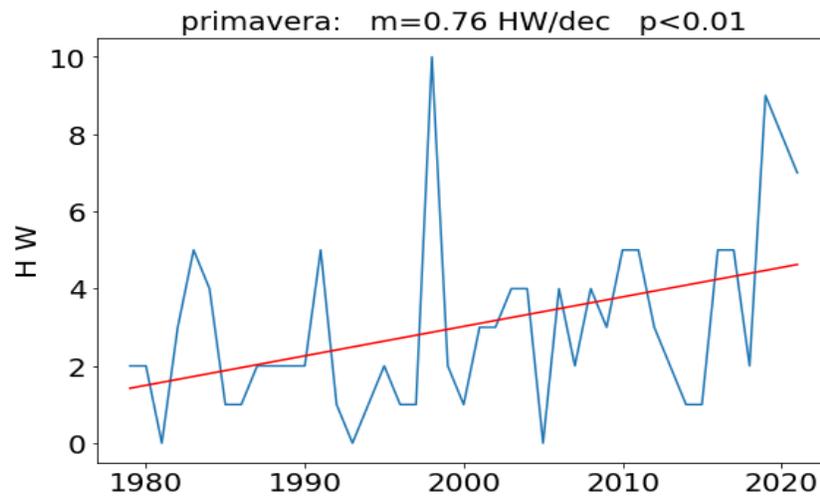


Fig. 4.3 Como la Fig. 4.2 pero para el número de olas de calor (HW) en el centro de México.

El aumento en la frecuencia de los eventos no es igual durante todos los meses de primavera (Fig. 4.4), siendo significativa ($p<0.05$) en los meses de marzo (0.42 HW/dec) y abril (0.3 HW/dec). Lo anterior podría estar indicando un comienzo cada vez más anticipado de la época de HW debido a que la tendencia del aumento de la temperatura al inicio de la primavera es mayor que al final de dicha estación (no mostrado). En la Fig. A2 del Apéndice A se observa una mayor contribución por parte de los eventos que se desarrollan a principio de primavera en el aumento de la frecuencia de olas de calor por década. Marzo tiene la peculiaridad de ser el mes más seco de la estación, lo que junto al aumento de su temperatura forma la combinación perfecta para intensificar los eventos cálidos. Sin embargo, el bajo nivel de humedad del suelo no es el único precursor de estos eventos, pues la configuración sinóptica presente en la atmósfera es de suma importancia para desarrollar olas de calor.

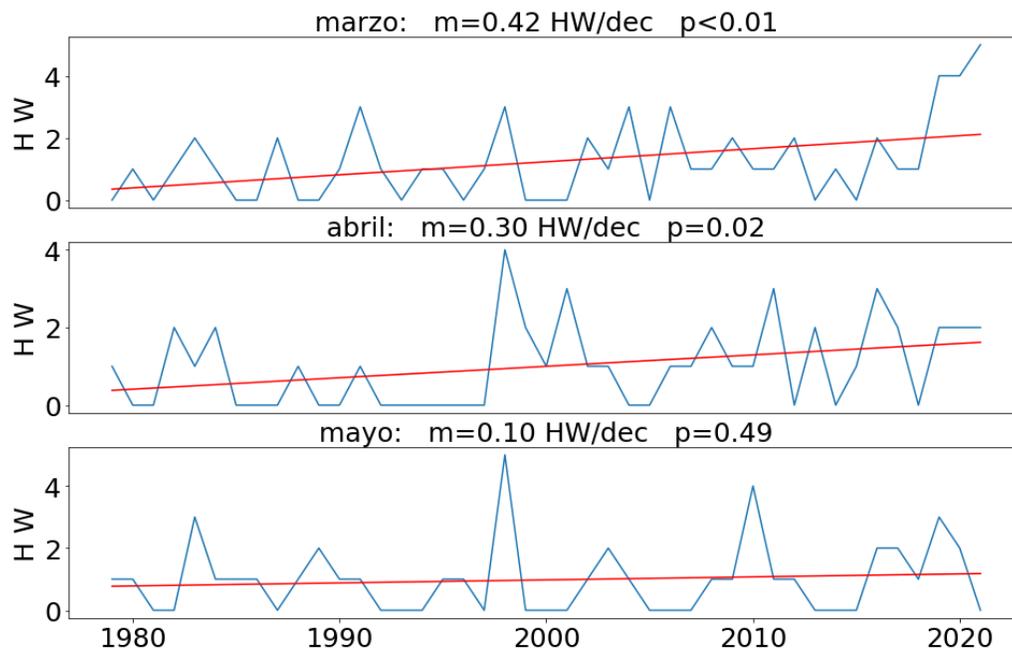


Fig.4.4. Tendencias mensuales de la frecuencia de HW (eventos/mes) para el periodo 1979-2021 en los meses de marzo, abril y mayo.

Al igual que para el número de eventos, la frecuencia anual de HD en CM muestra una tendencia positiva (1.9 HD/dec), pero no significativa (Fig. 4.5). Contrario a lo que se encuentra en otras regiones el aumento en la frecuencia de olas de calor en CM no ha venido acompañado de un aumento significativo de días cálidos, lo que sugiere cambios no significativos en la duración de los eventos. En primera aproximación, la frecuencia de días en un año concreto y , $HD(y)$, puede expresarse como el producto del número de eventos $HW(y)$ por su duración media $D(y)$, de forma que, en ausencia de cambios en duración, un aumento en HW se traduciría en un aumento equivalente en HD. El hecho de que la tendencia en HD no es significativa sugiere que el aumento en HW se está viendo compensado por un descenso en su duración sobre CM, y por lo tanto que los eventos podrían estarse volviendo cada vez más transitorios. La Figura 4.6 confirma una tendencia decreciente de la duración individual (HD) de los eventos en CM, aunque no significativa.

Por lo tanto, los eventos de olas de calor han tenido un claro aumento en el CM, afectando a la región sobre todo a principios de la temporada cálida cuando las condiciones secas siguen estando muy presentes. De continuar las tendencias observadas, las HW se volverían más frecuentes y transitorias sobre el CM.

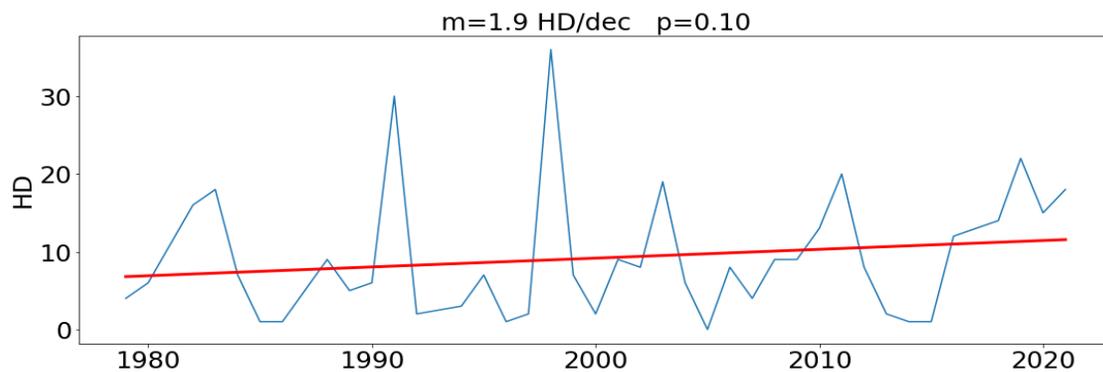


Fig. 4.5. Como la Fig. 4.2 pero para la frecuencia de HD en el centro de México.

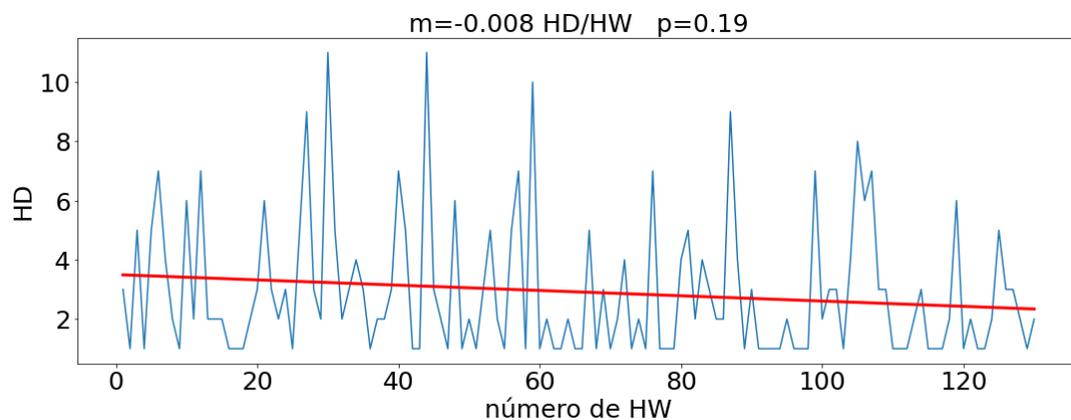


Fig. 4.6. Como la Fig. 4.2 pero para la duración individual (HD) de cada HW sobre la región CM.

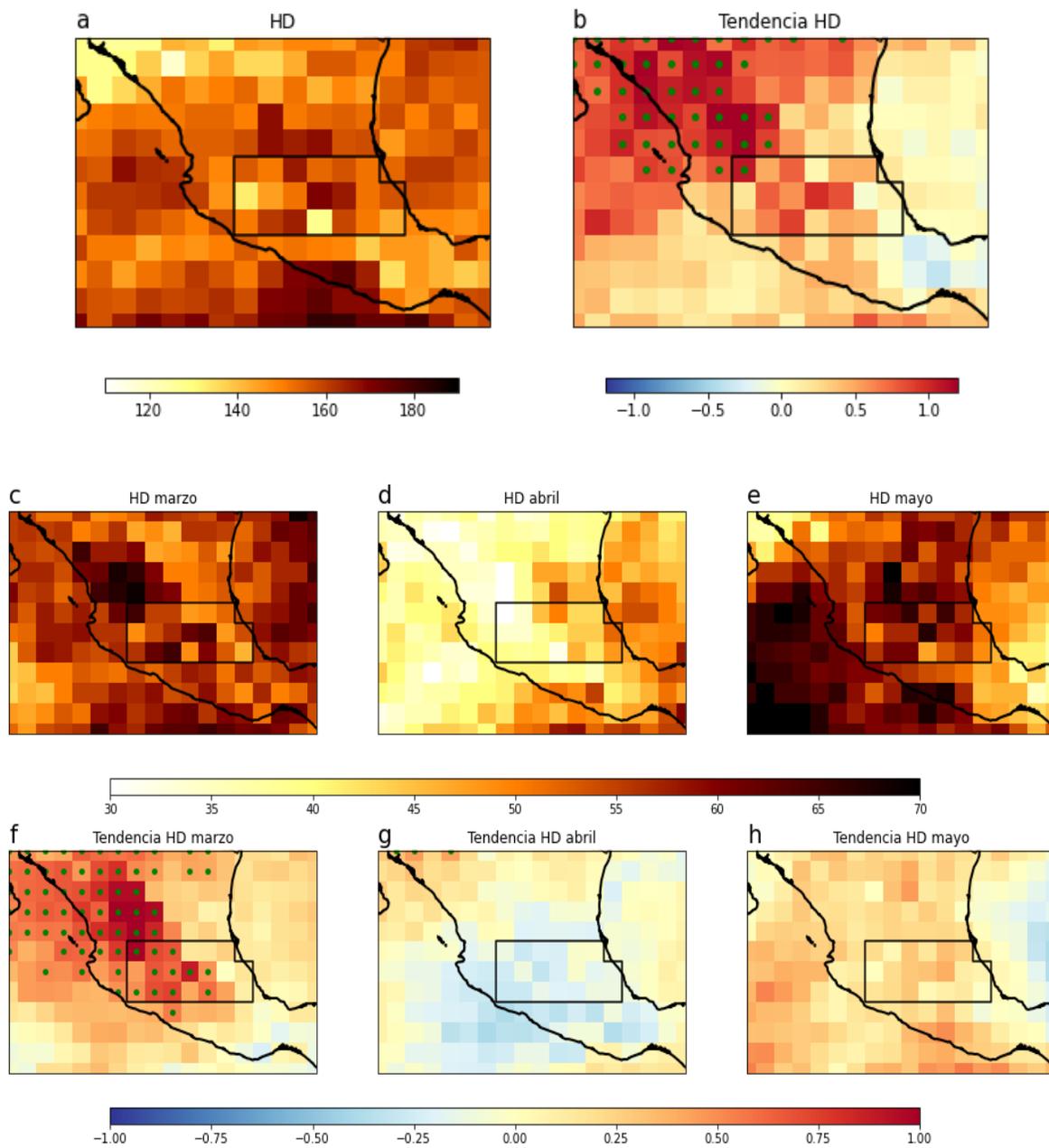


Fig.4.7. Mapas de densidad de frecuencia total (en días) y tendencia (en días / década) de HD para el periodo 1979-2021 y: (a,b) primavera; (c,f) marzo; (d,g) abril; (e-h) mayo. Los puntos verdes indican tendencias significativas al 90% ($p < 0.10$).

Para el periodo completo de primavera la densidad de HD es más o menos homogénea a lo largo del CM, con valores ligeramente más altos en la zona centro del dominio (Fig. 4.7a). Su tendencia local no es significativa en prácticamente ningún punto del CM (Fig. 4.7b) de acuerdo con la Fig. 4.5. En general, los patrones mensuales de HD (Fig. 4.7c-h) son similares a los de HW (no se muestran). Al igual que para HW, el aumento de HD es significativo ($p < 0.10$) únicamente para el mes de marzo (Fig. 4.7f), y contrasta con las tendencias negativas (no significativas) del mes de abril (Fig. 4.7g). Estas últimas contribuyen a la falta de significatividad de los cambios de HD de primavera sobre el CM (Fig. 4.7b). Los resultados sugieren que las zonas donde se concentra la mayor densidad de HD (p.ej. centro de CM) no necesariamente muestran un mayor aumento en su frecuencia. Por lo demás, el patrón de tendencias de HD de primavera es similar al de marzo, lo que también se observa en HW (no se muestra).

4.3 PATRONES DE LAS OLAS DE CALOR

Con la finalidad de estudiar la evolución de las HW que afectan el CM, se generaron mapas de su frecuencia para los periodos anterior, simultáneo y posterior a la fase CM, en la que el evento afecta la región de estudio (Fig. 4.8). A diferencia de la fase CM, las frecuencias de los eventos no muestran un patrón bien definido para las fases Pre- y Post-CM.

En la fase Pre-CM se logran identificar ciertas zonas con mayor densidad como son los Estados Unidos (E.E.U.U.) y el océano Pacífico. Así mismo, la fase Post-CM muestra una mayor frecuencia sobre los océanos. Sin embargo, ambas fases se caracterizan por una nube dispersa de frecuencias que complica la identificación de patrones. Por tanto, las trayectorias que siguen los eventos no son claras y no se encuentran zonas preferentes de génesis y disipación.

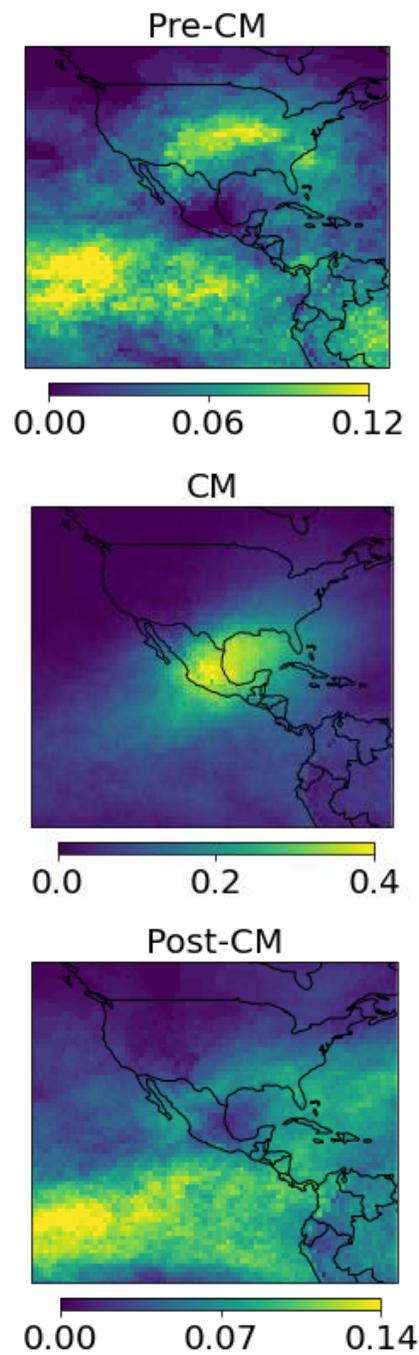


Fig. 4.8. Frecuencia relativa de olas de calor en las fases previa (Pre-CM, días [-3,-1]), simultánea (CM) y posterior (Post-CM, días [1,3]) al centro de México (en tanto por uno relativo al número de HW que afectan en cada fase en el periodo 1979-2021).

En un intento de encontrar patrones más definidos, se analizaron mapas de densidad de frecuencia desde 4 días previos hasta 4 días posteriores a la fase CM (Fig. 4.9). La información proporcionada por dichos mapas nuevamente no es clara, ya que no se observa una trayectoria definida, sobre todo para los días posteriores. Sin embargo, se observa una alta presencia de eventos sobre el océano Pacífico en los días previos a su llegada al CM. En el día -4 el patrón está bien definido sobre el Pacífico, mientras que los siguientes días se mezcla con otros patrones que podrían indicar eventos que provienen del norte.

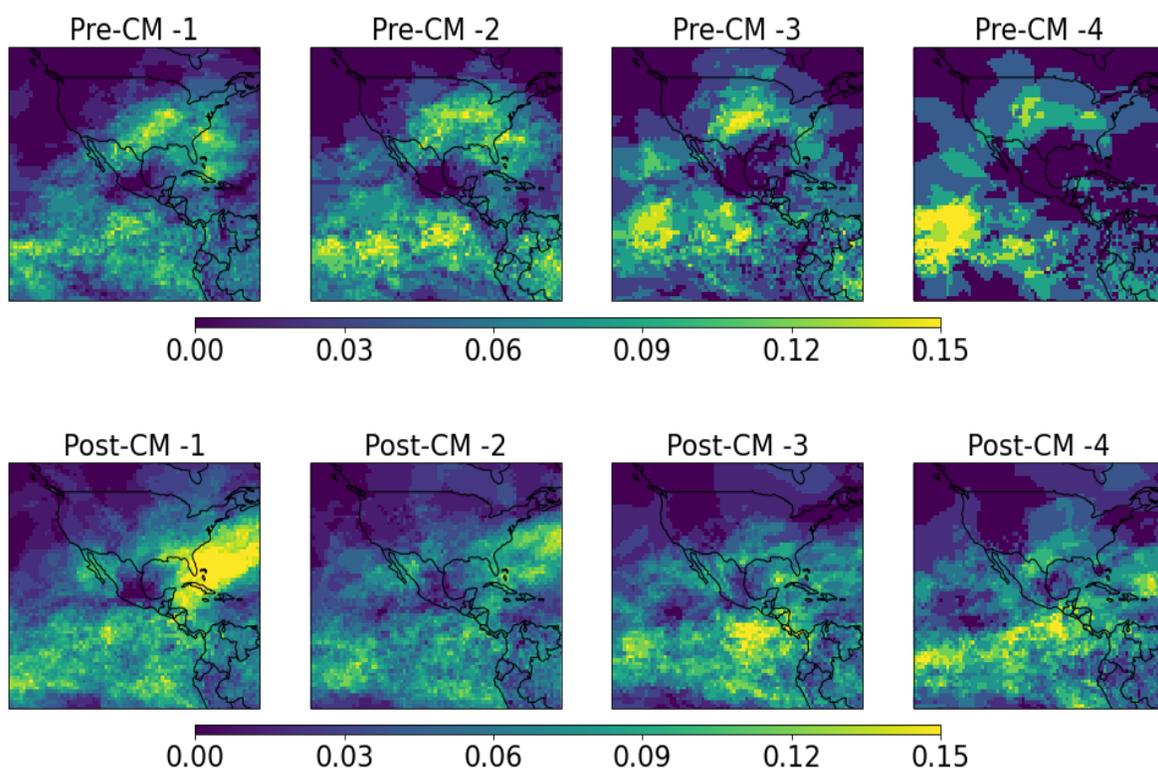


Fig. 4.9. Frecuencia relativa de olas de calor en días previos (panel superior) y posteriores (panel inferior) a la fase CM (en tanto por uno relativo al número total de HW que afectan al CM en el periodo 1979-2021). La fase pre-CM (post-CM) corresponde a los días anteriores al primer día (posteriores al último día) de la fase CM.

Dado que la evolución de los eventos no es posible reducirla a una sola trayectoria “común”, se prosiguió a agrupar a los eventos haciendo uso de la técnica de *clustering* SOM (ver sección 2.3.3). Se analizaron dos grupos de olas de calor, los cuales muestran patrones claros de su evolución en fases Pre-CM, CM y post-CM (Fig. 4.10). El primer grupo (cluster1) corresponde a eventos que en su mayoría se generan al norte del país sobre continente, y el segundo (cluster2) sobre el océano Pacífico. Las diferencias más importantes entre ambos grupos se encuentran sobre todo en las regiones preferentes de génesis y disipación.

Las características de ambos grupos se detallan en la Tabla 4.2. El primer grupo posicionado sobre el CM y el Golfo de México tiene una persistencia media de 3.3 días. La mayoría de estos eventos se genera directamente sobre el CM. Para aquellos con una fase Pre-CM, esta tiende a concentrarse el centro y este de E.E.U.U, y se extiende por el norte de México. Por lo tanto, las HW del cluster1 con fase Pre-CM definida son eventos que tienen su génesis al norte de la zona de estudio y se desplazan hacia el sur hasta llegar al CM. Se han observado patrones de frecuencia similares a los de la fase Pre-CM en estudios de olas de calor sobre E.E.U.U., donde identifican la mayor frecuencia de estos eventos en la zona central este del país (Teng et al., 2013).

El segundo grupo tiene su génesis al sur del CM, principalmente sobre el océano Pacífico. Si bien estos eventos se generan en el océano Pacífico, en su trayectoria se desplazan hacia el este llegando a costas mexicanas y afectando gran parte del centro y sur del país. Una característica importante es que suelen regresar a su lugar de origen (océano Pacífico) una vez que dejan de afectar al CM. De hecho, la fase CM es la más corta de las tres fases, teniendo una persistencia media de 2.6 ± 2.2 días, frente a los 3.7 ± 3.5 y 5.7 ± 5.4 días de las fases Pre-CM y Post-CM, respectivamente (Tabla 4.2). Aunque el ciclo de vida de estos eventos es mayor que el de los del primer grupo, su duración en la región de estudio es menor.

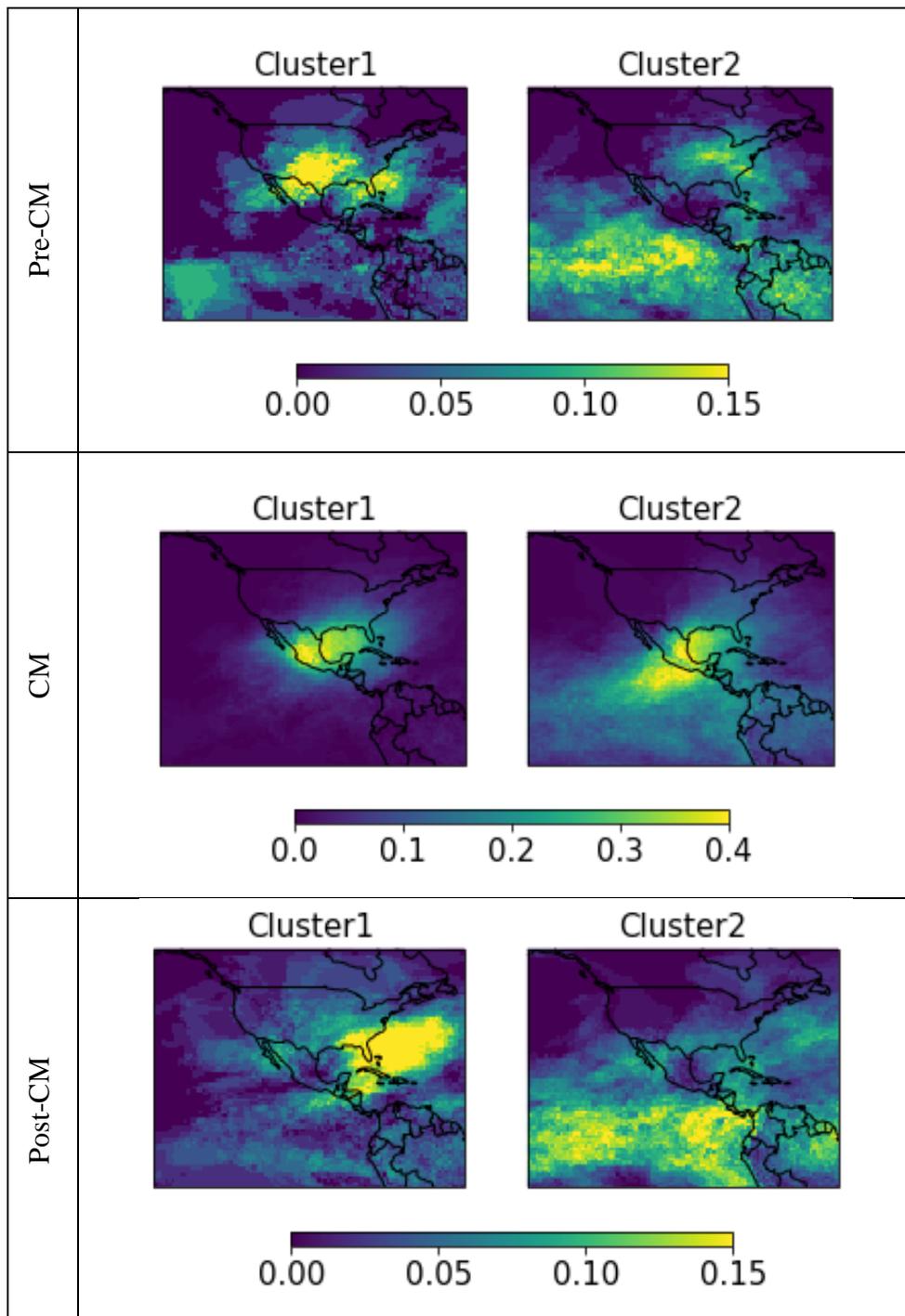


Fig. 4.10. Similar a la figura 4.8 pero para las HW del cluster1 (izquierda) y cluster2 (derecha) por separado. Las filas de paneles muestran la fase Pre-CM (panel superior), CM (panel central) y Post-CM (panel inferior).

Tabla 4.2. Características de las HW por grupo (Cluster1 y 2). Cada celda muestra la información correspondiente a las fases Pre-CM / CM / Post-CM.

	No. de eventos	Media ± Desviación estándar
Cluster1	26 / 61 / 42	2.5 ± 2 / 3.3 ± 2.4 / 4.5 ± 4
Cluster2	47 / 69 / 60	3.7 ± 3.5 / 2.6 ± 2.2 / 5.7 ± 5.4

En todos los casos la fase CM está bien definida (paneles fila central Fig. 4.10), pero sus frecuencias de ocurrencia se extienden más allá de la región de estudio. En las tres fases las HW que se generan en continente muestran patrones espaciales más pequeños que las que se generan sobre el océano. Estos resultados sugieren que los mecanismos que generan los eventos del Cluster1 están asociados a sistemas atmosféricos que los mantienen bien confinados espacialmente, mientras que los patrones extensos sobre el océano del Cluster2 pueden deberse a cambios en la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés), e incluso a distintos modos de variabilidad, como es el caso de El Niño. En el apéndice A (Fig. A1) se indican las primaveras posteriores a eventos El Niño considerados fuertes y muy fuertes⁵ (anomalías positivas máximas en la SST durante el invierno) con la serie temporal de los clusters. Como se observa, posterior a 3 de los 5 eventos del periodo de estudio hubo un gran número de eventos del segundo grupo (Fig. A1). Esto podría indicar una fuerte interacción entre el océano y la atmósfera ya que las anomalías de la SST en la

⁵ Clasificación de los años El Niño respecto a su intensidad:
<https://ggweather.com/enso/oni.htm> Consultado el 1 de abril de 2023.

fase Pre-CM muestran grandes anomalías positivas (no mostrado). Por tanto, los calentamientos en la SST podrían verse reflejados en la atmósfera, ocasionando las olas de calor del segundo grupo que afectan al CM.

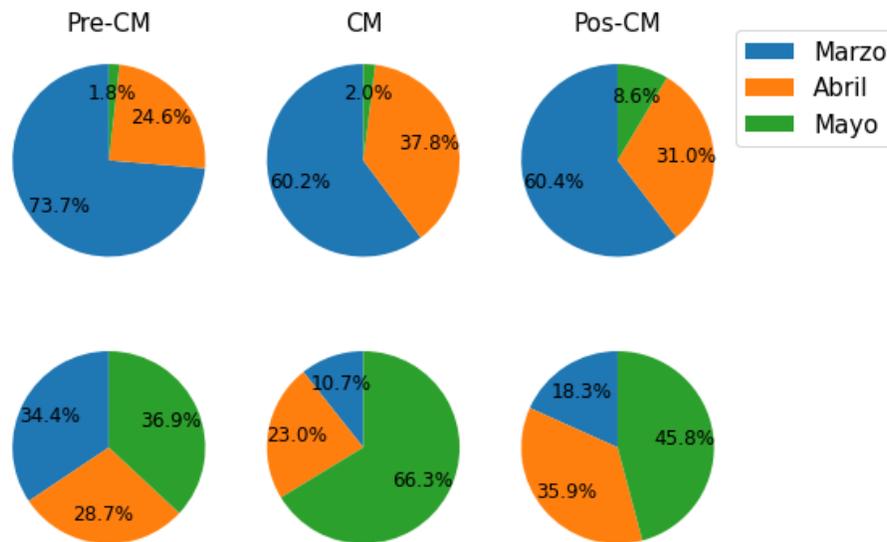


Fig. 4.11. Frecuencia mensual de HW del Cluster1 (fila superior) y Cluster2 (fila inferior). Los diagramas muestran las frecuencias mensuales de eventos (en porcentaje con respecto al número total de HW detectadas en cada cluster y fase) para las fases Pre-CM (días [-3,-1]), CM y Post-CM (días [1,3]).

Los clusters además de diferenciarse por su evolución y características estadísticas, difieren en su estacionalidad (Fig. 4.11). En marzo se presentan sobre todo eventos que corresponden al Cluster1, mientras que en mayo la mayoría de eventos son del Cluster2; en el mes de abril se tienen eventos de ambos grupos. La fuerte estacionalidad que muestran los eventos es consistente con sus patrones de evolución y sugiere diferentes tipos (continental/oceánica) de HW o mecanismos. En marzo, las condiciones secas aún están bastante presentes debido a que es el inicio de la primavera, lo que ayuda a que se formen olas de calor sobre continente (Cluster1). En mayo, la temperatura del aire es mayor que en los demás meses de primavera

debido a la radiación solar, y la SST presenta su máximo anual en el Pacífico del este (Misra, et al., 2016), lo que favorecería el desarrollo de las HW de carácter oceánico del segundo grupo.

4.4 CASO DE ESTUDIO

Con la finalidad de ejemplificar patrones concretos asociados con eventos de olas de calor en el CM y su evolución sinóptica, se eligió un caso de estudio para el que se analizan las tres fases del evento (Pre-CM, CM y Post-CM). El evento ocurrió en la primavera de 1998, debido a que fue el año en el que se identificó la mayor cantidad de HW (Fig. 4.3), con más de 30 HD, lo que significa que más de la tercera parte de la temporada experimentó condiciones de ola de calor.

Además, en 1998 se registró uno de los años El Niño (El Niño 1997-1998) más intenso, con valores extremos en el índice El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), tanto en el Índice Niño Oceánico⁶ (ONI, por sus siglas en inglés), como en el Índice ENSO Multivariado⁷ (MEI, por sus siglas en inglés). El evento de HW analizado fue el más intenso del año en cuanto a sus anomalías de T700 sobre el CM y afectó a dicha región durante 5 días. El periodo en cuestión es del 14-04-1998 al 18-04-1998 (fase CM), y se tomaron 3 días previos (11-04-1998 al 13-04-1998) y 3 días posteriores (19-04-1998 al 21-04-1998) como fases Pre-CM y Post-CM respectivamente para estudiar la evolución atmosférica.

El evento corresponde a una HW del Cluster2 (Sección 4.3), grupo asociado con calentamientos sobre el océano Pacífico previos a la fase CM. El análisis se realizó con base en las anomalías respecto al día del calendario, utilizando una ventana de 15 días con la

⁶ ONI

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Consultado el 18 de marzo de 2023.

⁷ MEI

<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>. Consultado el 18 de marzo de 2023.

climatología base de 1981-2010. En el apéndice B pueden encontrarse mapas de la climatología del mes de abril (1981-2010), mes del evento del caso de estudio.

En la Figura 4.12 se observa que en los días previos al evento las anomalías positivas de la T700 se encuentran al suroeste del territorio mexicano sobre el océano Pacífico y en la parte norte del país. Durante el evento (fase CM) las anomalías positivas más altas se observan sobre todo al este del CM y parte del Golfo de México. De hecho su afectación va más allá de la región de estudio, pues gran parte del territorio mexicano se encuentra bajo los efectos de la ola de calor. El evento se disipa hacia el este de México, específicamente hacia el océano Atlántico, conforme pasan los días (fase Post-CM), dejando al CM sin anomalías notables de T700 (Fig. 4.12) y por consiguiente dando fin a la HW.

Los patrones de las anomalías de T700 son consistentes con los de las anomalías de la altura geopotencial (ver como ejemplo el nivel de 200 hPa en los paneles de la izquierda de la Fig. 4.13). En la fase Pre-CM se observa una anomalía positiva de geopotencial, con su máximo posicionado al noroeste del país. En la fase CM, la alta se localiza justo sobre el CM, afectando directamente a la región de estudio y zonas adyacentes. Prácticamente todo el territorio mexicano se encuentra bajo la influencia de altas presiones en la tropósfera alta. En la fase Post-CM, la alta parece haberse particionado en dos por un sistema de baja presión que se desplaza hacia el sur y se posiciona sobre el norte de México debilitando al anticiclón previamente mencionado y por consiguiente sus efectos.

En el nivel de 850 hPa (panel derecho de la Fig. 4.13), se observan ligeras anomalías positivas de la altura geopotencial en la fase Pre-CM, que pasan a ser anomalías negativas en la fase CM. Las bajas presiones en superficie (o niveles bajos de la atmósfera) comúnmente se generan por temperaturas del aire más altas que sus alrededores (baja térmica). En la fase Pre-CM y CM se aprecia una situación ciclónica en niveles bajos (por debajo del anticiclón en el nivel de 200 hPa previamente discutido) al este de México sobre el océano Pacífico.

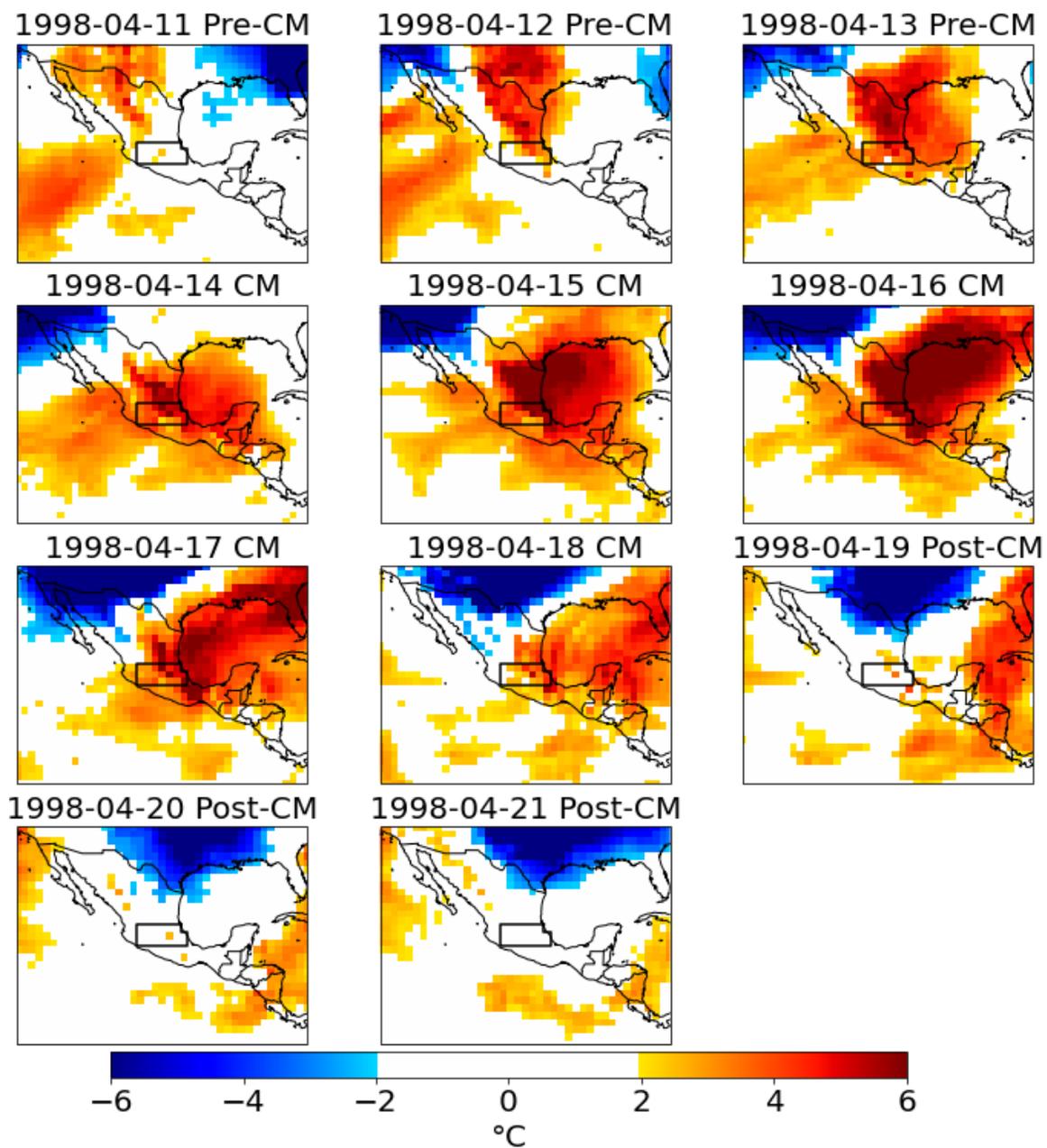


Fig. 4.12. Anomalías de T_{700} ($^{\circ}\text{C}$) para cada día de las fases Pre-CM (días [-3,-1] anteriores a CM), CM y Post-CM (días [+1,+3] posteriores a CM). En negro se indica el dominio del CM.

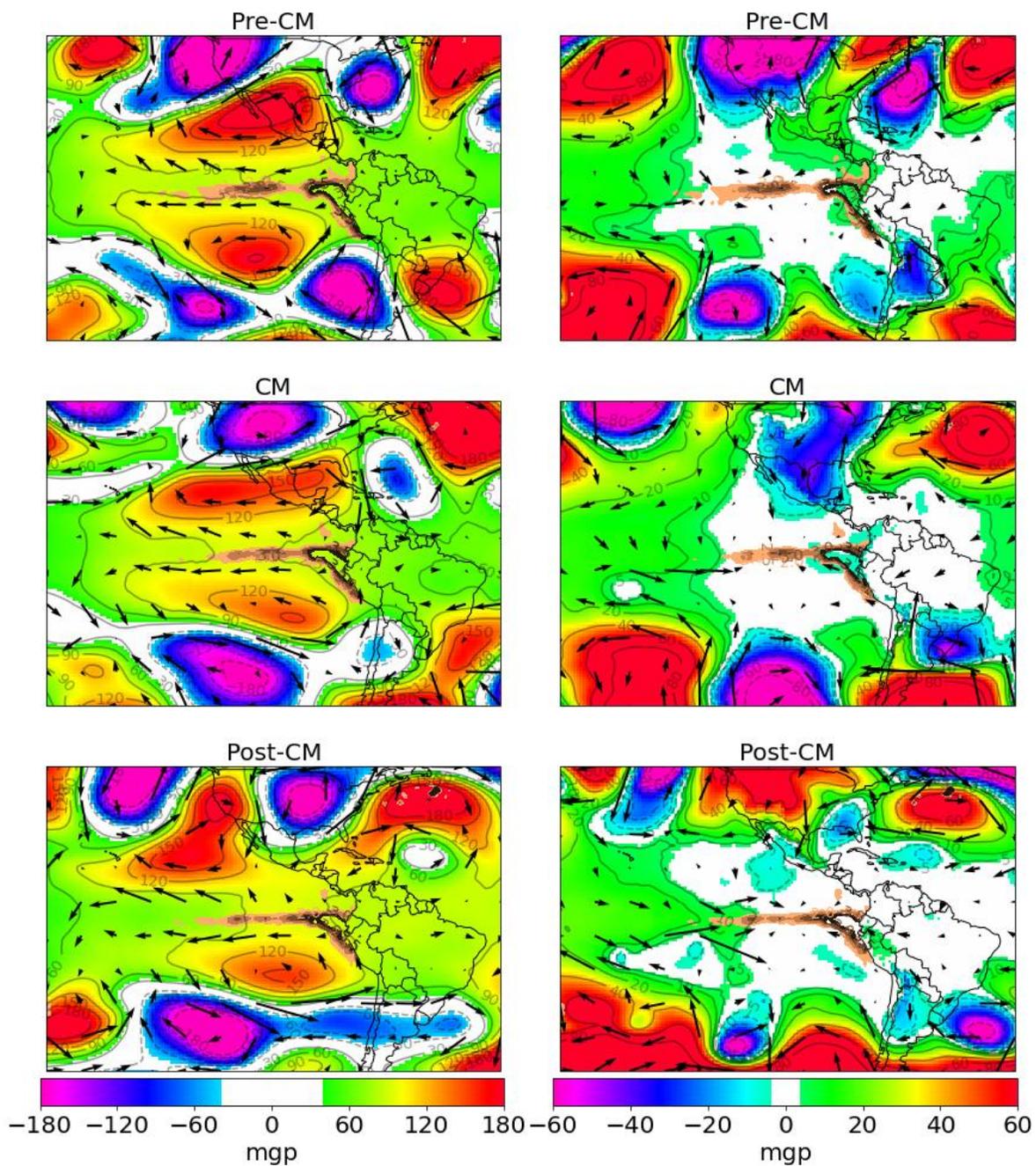


Fig. 4.13. Compuestos de las anomalías de la altura geopotencial y viento a 200 hPa (paneles izquierdos) y 850 hPa (paneles derechos) en las tres fases del evento: Pre-CM (fila superior), CM (fila central) y Post-CM (fila inferior). Los contornos en gris corresponden a las anomalías de altura geopotencial. En color café se muestran las anomalías de la SST mayores a +2 °C.

Por otro lado las anomalías de SST durante el evento (panel izquierdo de la Fig. 4.14) son realmente altas en la zona ecuatorial del Pacífico del este (típico de un evento El Niño), sobre todo en la zona conocida como El Niño 1+2, donde se alcanzan anomalías positivas de hasta 4°C. Este fuerte calentamiento actúa como una fuente de calentamiento convectivo que fuerza ondas de Rossby quasi-estacionarias, de acuerdo con el patrón de Gill (Gill, 1980) que se aprecia en la Fig. 4.13. Dicho patrón refleja la respuesta atmosférica a una fuente de calentamiento oceánico: las ondas de Rossby se muestran como “gemelos”, cada una en un hemisferio distinto. Durante los días del caso de estudio, la onda de Rossby inducida por la fuerte anomalía de SST en la zona de El Niño 1+2, se posiciona sobre territorio mexicano (al noroeste de la fuente de calor) y su “gemelo” en la contraparte del hemisferio sur.

De acuerdo al modelo de Gill, sobre la fuente de calor se encuentra el ascenso de aire debido a la convección (panel derecho de la Fig. 4.14), mientras que las zonas de subsidencia se encuentran en las regiones donde están posicionadas las ondas de Rossby, lo que genera una circulación en celda que refuerza el calentamiento en superficie debido a que las corrientes descendentes se calientan adiabáticamente. Por lo tanto, la onda de Rossby es la responsable del anticiclón en altura sobre el CM y el calentamiento anómalo en territorio mexicano durante el evento analizado, generando las condiciones idóneas de una típica ola de calor: alta presión en altura que provoca cielo despejado y deja pasar la radiación de onda corta hacia el suelo, además de un calentamiento adiabático por las corrientes descendentes. Esto es reforzado por el ciclón en niveles bajos que transporta aire cálido del océano Pacífico hacia territorio mexicano (Fig. 415).

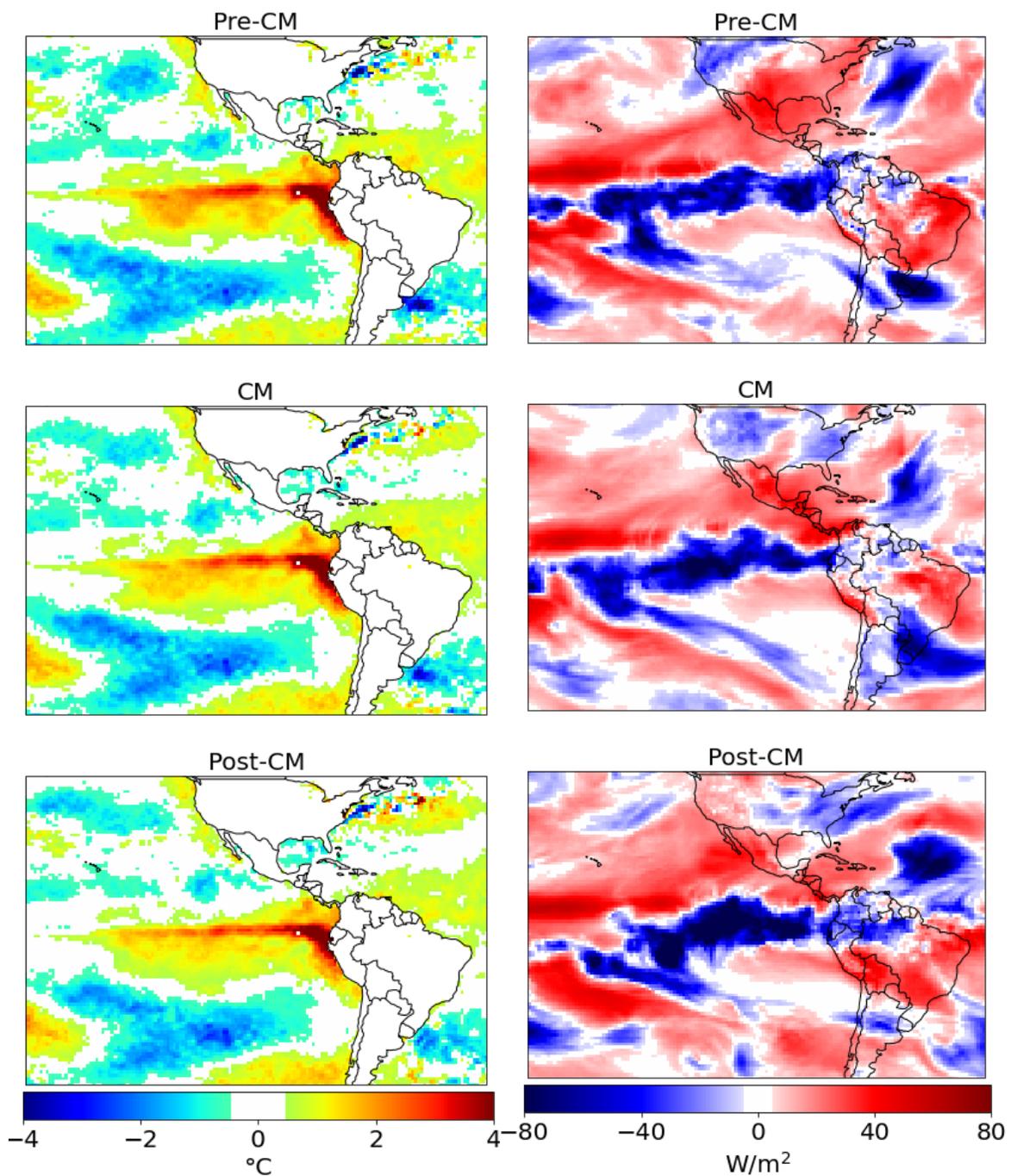


Fig. 4.14. Similar a la Figura 4.13 pero para las anomalías de SST [$^{\circ}\text{C}$] (panel izquierdo) y OLR [W/m^2] (panel derecho). Los valores negativos (positivos) de las anomalías de OLR representan un aumento (disminución) de la nubosidad.

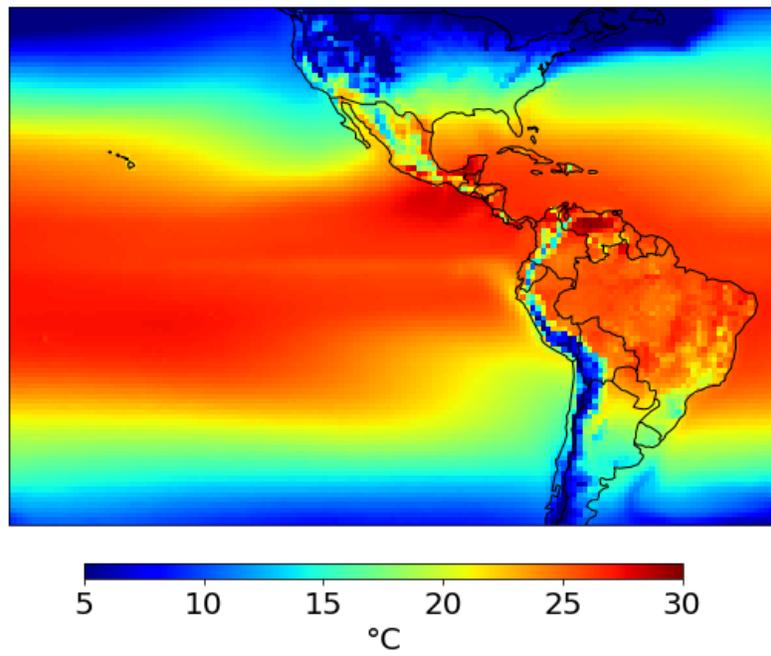


Fig. 4.15. Climatología (1981-2010) de la temperatura a 2 metros [°C] para el mes de abril.

CAPÍTULO 5. DISCUSIONES FINALES

5.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han identificado los eventos de ola de calor que afectaron el centro de México (CM) durante las primaveras (marzo-mayo) del periodo 1979-2021, lo que corresponde a la época de cálidas y secas para la región de estudio.

Se detectaron un total de 130 eventos de ola de calor sobre el CM (o HW, de su acrónimo en inglés), y 379 días de ola de calor (HD), lo que representa un promedio de tres eventos por año con una persistencia media en la región de estudio de 2.9 días.

El análisis de tendencias muestra un aumento significativo en la frecuencia de episodios (0.79 HW/dec). Marzo es el mes en que se registra una mayor frecuencia de HW, y a su vez el mes con mayor aumento de eventos. Además, mayo, el mes con menor frecuencia de eventos, no muestra un aumento significativo. Esto indica que en las últimas cuatro décadas se han producido cambios hacia una mayor frecuencia de eventos tempranos. El aumento en el número de HD que se registran anualmente (1.4 días/dec) se debe exclusivamente al aumento en el número de eventos, pero no es significativo debido a una cierta disminución en la persistencia de los eventos sobre el CM (tendencia en duración $\lesssim 0$ días / HW).

Las HW se pueden agrupar de acuerdo a su evolución espacio-temporal. Se identificaron dos grupos que muestran características específicas en cuanto a su zona de génesis y disipación. El primer grupo (61 HW y 201 HD) corresponde a eventos de carácter continental, la mayoría al norte del CM (norte de México y sobre E.E.U.U.), que tienden a disiparse sobre el océano Atlántico tras afectar a la región de estudio. Son más frecuentes al principio de la temporada (marzo) y, en media, afectan al CM durante 3.3 días. El segundo grupo (61 HW y 178 HD) corresponde a eventos que se generan sobre regiones marítimas, específicamente el océano Pacífico (hacia el suroeste de territorio mexicano) y tienden a disiparse en las mismas regiones. Aunque el ciclo de vida de estos eventos es mayor al del grupo continental,

su persistencia media en el CM es menor (2.6 días), y al igual que aquellos, muestran una fuerte estacionalidad, siendo mucho más frecuentes al final de la temporada (mayo).

En el caso de estudio que corresponde a un evento del grupo 2, se encontró que la fuerte anomalía de SST en la región de El Niño 1+2 actuó como una fuente de calor en los trópicos, generando una respuesta atmosférica (patrón de Gill) en forma de tren de ondas de Rossby quasi-estacionarias en cada uno de los hemisferios. La onda de Rossby del hemisferio norte se posiciona sobre territorio mexicano, afectando a gran parte del país y propiciando las condiciones idóneas para generar una ola de calor. El anticiclón en altura que corresponde a la onda de Rossby deja pasar la radiación hacia la superficie y calienta el aire que desciende adiabáticamente, mientras que el ciclón en superficie refuerza el calentamiento mediante advección cálida procedente del océano Pacífico.

5.2 RECOMENDACIONES FUTURAS

El presente trabajo ha mostrado resultados relevantes, que sería interesante analizar con más profundidad en un futuro trabajo. A continuación, se indican una serie de recomendaciones que podrían ayudar a mejorar el estudio con base a la experiencia adquirida durante el desarrollo de este trabajo.

- Dado que la extensión de la región de estudio es comparable a la extensión espacial mínima de los patrones de olas de calor, no se encontraron eventos simultáneos en el CM. Sin embargo, se detectaron algunos eventos continuos, es decir, que comenzaban un día después de que otro evento terminaba. Esto se debe a la distancia máxima que se estipuló entre dos puntos de malla con situación de ola de calor (500 km), la cual en determinadas circunstancias podría conducir a una detección intermitente de un mismo evento. Es recomendable llevar a cabo un estudio más exhaustivo sobre este parámetro y su influencia en la detección de olas de calor.

- La temperatura a 700 hPa (T700) fue la variable que mejores resultados tuvo en el test de sensibilidad para el CM. La región de estudio se encuentra en una zona con algunas de las principales elevaciones del territorio mexicano, por lo que usar el nivel de 700 hPa resultó ser un buen indicador para el CM. No obstante, esto podría cambiar si se usa el algoritmo para alguna otra región de México o para todo el territorio mexicano. Por ello, se sugiere probar con varios niveles según la zona de interés.
- Si bien el método de clusterización basado en anomalías estandarizadas de la temperatura proporcionó buenos resultados para la agrupación de eventos, se recomienda evaluar y contrastar estos resultados con los obtenidos de otras aproximaciones, como la excedencia de la temperatura sobre el umbral escogido (p.ej. percentil P95, relativo a cada punto de malla y día juliano), ya que podría mejorar la consistencia con el algoritmo de detección.

REFERENCIAS

1. Agüero, J. 2014. Long-Term Effect of Climate Change on Health: Evidence from Heat Waves in Mexico. IDB-WP-481. Inter-American Development Bank.
2. Alexandersson, H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *International Journal of Climatology*. 6:661-675.
3. Araya, J. L. & Alfaro, E.J. 2008. Prueba e implementación de algoritmos de control de calidad de datos de temperatura superficial del aire en un contexto operativo. *Tecnología en marcha*. 21(3):47-61.
4. Barriopedro, D., García-Herrera R., Ordóñez, C., Miralles, D. G., Salcedo-Sanz, S. 2023. Heat waves physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*. 61
5. Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. *Science*. 333:220–224
6. Berglund, L. G. 1998. Comfort and humidity. *ASHRAE journal*. 35-41.
7. Bishop-Williams, K. E., Berke, O., Pearl, D. L., Hand, K., Kelton, D. F. 2015. Heat stress related dairy cow mortality during heat waves and control periods in rural Southern Ontario from 2010-2012. *BMC Veterinary Research*. 11:291.
8. Bobb, J. F., Obermeyer, Z., Wang, Y., Dominici, F. 2014. Cause-specific risk of hospital admission related to extreme heat in older adults. *Journal of the American Medical Association*. 312:2659-2667.
9. Brás, T.A., Seixas, J., Carvalhais, N., Jägermeyr, J. 2021. Severity of drought and heatwave crop losses tripled over the last five decades in Europe. *Environmental Research Letters*. 16.
10. Chung, U., Gbegbelegbe, S., Shiferaw, B., Robertson, R., et al. 2014. Modeling the effect of a heat wave on maize production in the USA and its implications on food security in the developing world. *Weather and Climate Extremes*. 67-77.
11. Contreras-Navarro, E., García-Cueto, R., González-Navarro, F., Valenzuela-Palacios, E. 2016. Modelado de las temperaturas del aire a 850 milibares: un potencial

- indicador de las ondas cálidas en el noroeste de México. *Información tecnológica*. 27(2):141-152.
12. Domeisen, D., Eltahir, E., Fischer, E., et al. 2023. Prediction and projection of heatwaves. *Nature Reviews Earth and Environment*.4:36:50.
 13. Draper, N.R. & Smith, H. 1998. *Applied Regression Analysis*. Wiley. 706 pp.
 14. Ebi LK, Meehl AG (2007) Heatwaves & global climate change. The heat is on: climate change & heatwaves in the Midwest. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, p 14
 15. Espinoza tamarindo B. E. 2013. Variabilidad de las ondas de calor observadas en el Noroeste de México. [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada]. Repositorio Institucional – Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
 16. García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Biblioteca digital del Instituto de Geografía UNAM. 71 pp.
 17. García-Cueto, R., Tejeda-Martínez, A., Jáuregui, E. 2009. Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*. 54:335-345.
 18. García-Herrera, R., Díaz, J., Hernández, E. 2005. Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions. *Annales Geophysicae*. 23:239-251.
 19. García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R.M., Luterbacher, J., Fischer, E.M., 2010. A review of the European summer heat wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol*. 40:267–306.
 20. Gill, A. E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Society*. 106: 447-462.
 21. Guijarro, J.A. (2018). *Climatol: climate tools (series homogenization and derived products)*. R package version 3.1.1. <https://CRAN.Rproject.org/package=climatol>
 22. Herrera Alanís J. L. 2012. Análisis de las olas de calor en la República Mexicana. [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de México]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma de México.

23. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2018): ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < -26-09-2022 >), 10.24381/cds.bd0915c6
24. IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York, NY: Cambridge University Press, 1535 pp.
25. IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
26. Jáuregui, E. 2009. The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 70:71-76.
27. Kohonen, T., 2001. *Self-Organizing Maps*, Springer Series in Information Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg.
28. Kovats, R. S., Hajat, S. 2008. Heat stress and public health: a critical review. *Annual reviews of public health*. 29:41-55.
29. Larcom, S., She, P. W., van Gevelt, T. 2019. The UK summer heatwave of 2018 and public concern over energy security. *Nature climate change*. 9:370-373.
30. Mahmood, R., Jia, S. 2016, Quality control and homogenization of daily meteorological data in the trans-boundary región of the Jhelum River basin. *Journal of Geographical Sciences*. 26(12):1661-1674.
31. Martínez-Austria, P., Bandala, E., Patiño-Gómez, C. 2015. Temperature and heat waves trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*. 91:20-26.
32. Misra, V., Groenen, D., Bharadwaj, A., Mishra, A. 2016. The warm pool variability of the tropical northeast Pacific. *International Journal of Climatology*.

33. Morignat, E., Perrin, J. B., Gay, E., Vinard, J. L., Calavas, D., Hénaux, V. 2014. Assessment of the impact of the 2003 and 2006 heat waves on cattle mortality in France. *Plos one*. 9.
34. Navarro-Estupiñan, J., Robles-Morua, A., Vivoni, ER., Zepeda, JE., Montoya, JA., Verduso, VS. 2018. Observed trends and future projections of extreme heat events in Sonora, Mexico. *International Journal of Climatology*. 38:5168–5181. <https://doi.org/10.1002/joc.5719>.
35. OECD. 2015. OECD Territorial Reviews: Valle de México, Mexico, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264245174-en>.
36. Perkins, S.E. 2015. A review on the scientific understanding of heat waves -Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165: 242–267.
37. Reek, T., Doty, S. R., Owen, T. W. 1992. A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the cooperative network. *Bulletin of the American Meteorology Society*. 73(6):753-762.
38. Robinson, P. 2009. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*. 40:762-775.
39. Sadhukhan, B., Mukherjee, S., Samanta, R. K. 2022. A study of global temperature anomalies and their changing trends due to global warming. 14th IEEE International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. 660-666.
40. Sánchez-Benitez, A., Barriopedro, D., García-Herrera, R.. 2020. Tracking Iberia heatwaves from a new perspective. *Weather and Climate Extremes*. 28:1-12.
41. Teng, H., Branstator, G., Wang, H., Meehl, G. A., Washington, W. M. 2013. Probability of US heat waves affected by a subseasonal planetary wave pattern. *Nature geoscience*. 6:1056-1061.
42. Vidal-Zepeda, R. 2005. Las regiones climáticas de México. Biblioteca digital del Instituto de Geografía UNAM. 212 pp.
43. Wilks, Daniel S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Estados Unidos: Elsevier, 627 pp.

APÉNDICE A

A continuación, se presentan figuras de apoyo para el texto, que no implican resultados directos del análisis.

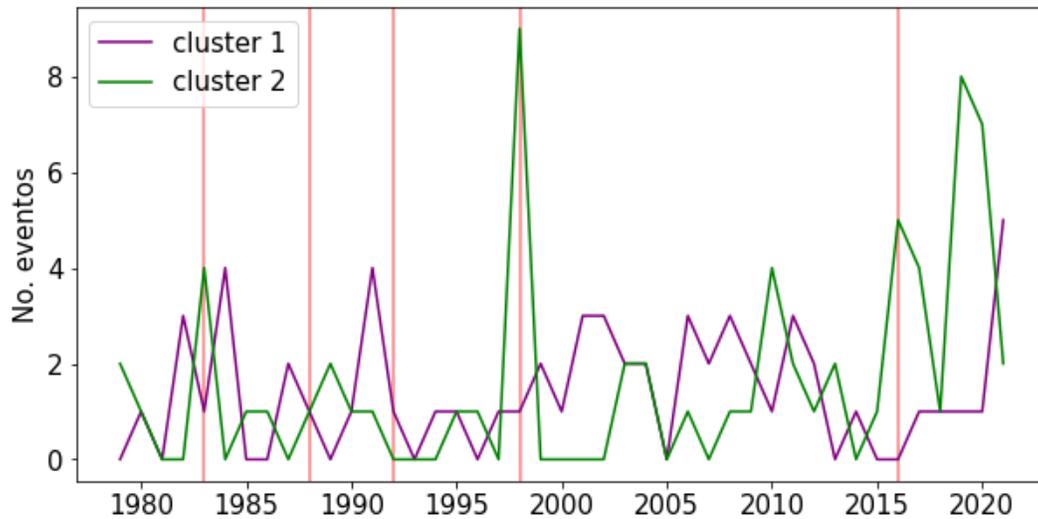


Fig. A1. Series temporal de las HW. En morado para el cluster1, verde el cluster2 y en líneas verticales rojas se indican las primaveras tras haberse registrado un evento El Niño fuerte (anomalías positivas entre 1.5-1.9 °C) o muy fuerte (anomalías positivas mayores a 2 °C) durante el invierno (1982-1983, 1987-1988, 1991-1992, 1997-1998, 2015-2016).

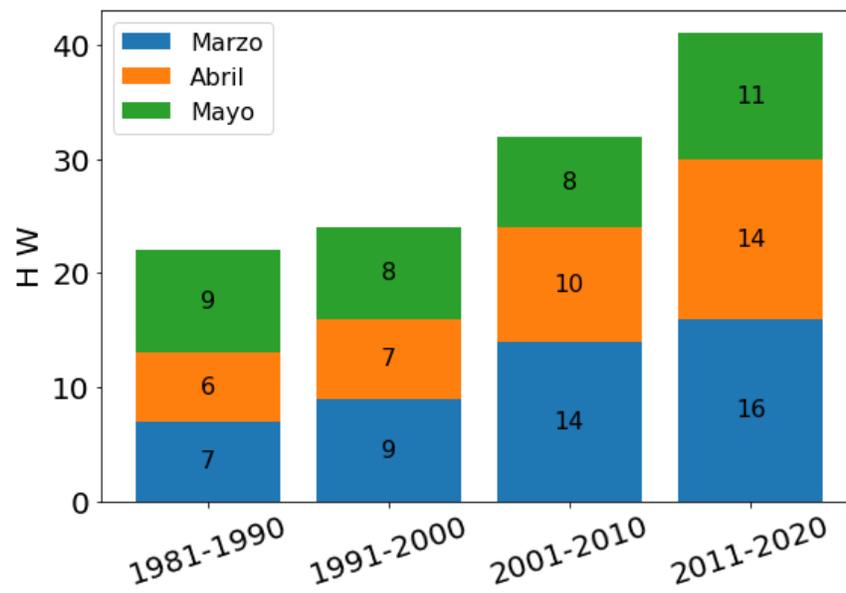


Fig. A2. Frecuencia de los eventos de ola de calor en el centro de México por mes (marzo, azul; abril, naranja; mayo, verde) y década (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020).

APÉNDICE B

Las siguientes figuras corresponden a mapas climatológicos del mes de abril.

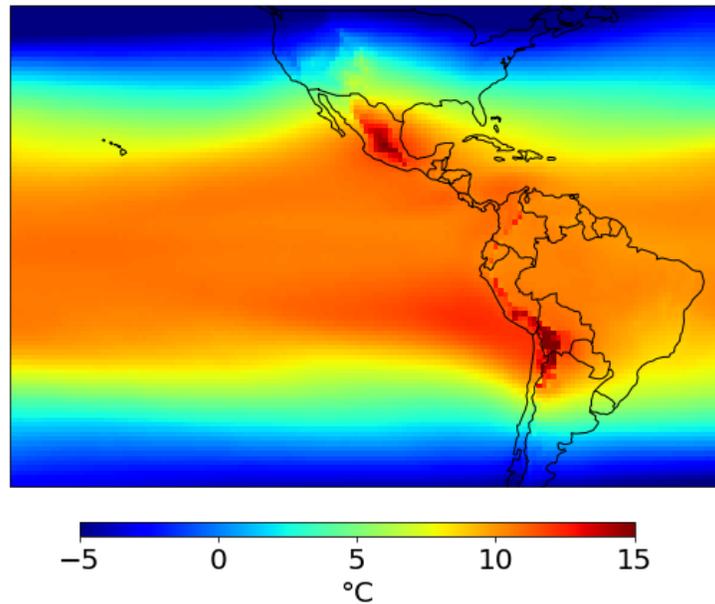


Fig.B1. Climatología (1981-2010) de la temperatura máxima a 700 hPa [°C].

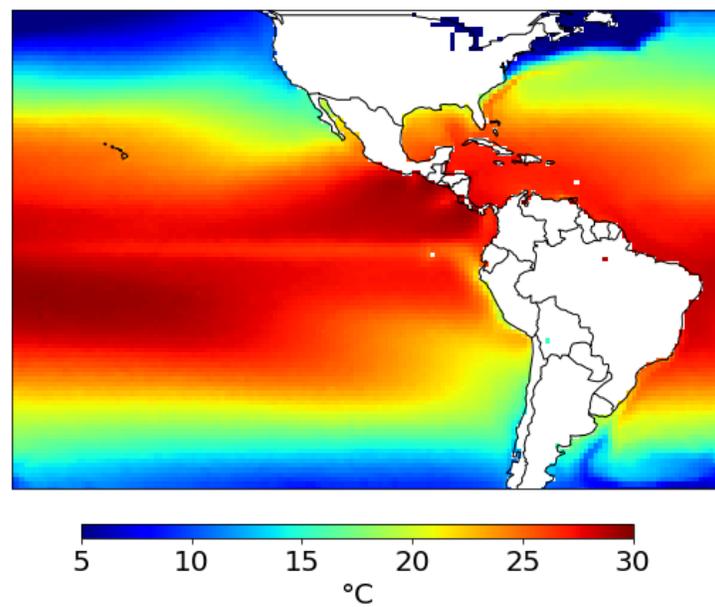


Fig.B2. Similar a la Fig.B1 para la temperatura superficial del mar [°C].

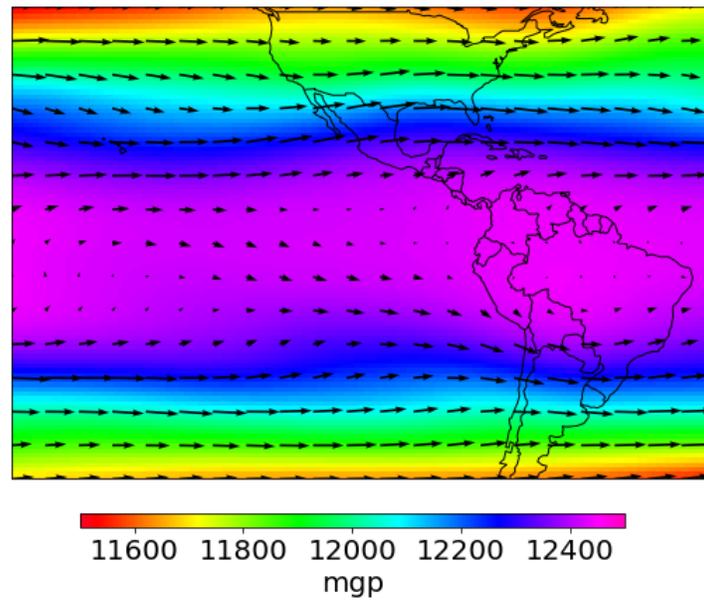


Fig.B3. Similar a la Fig.B1 para la altura geopotencial [mgp] y el campo de viento a 200 hPa

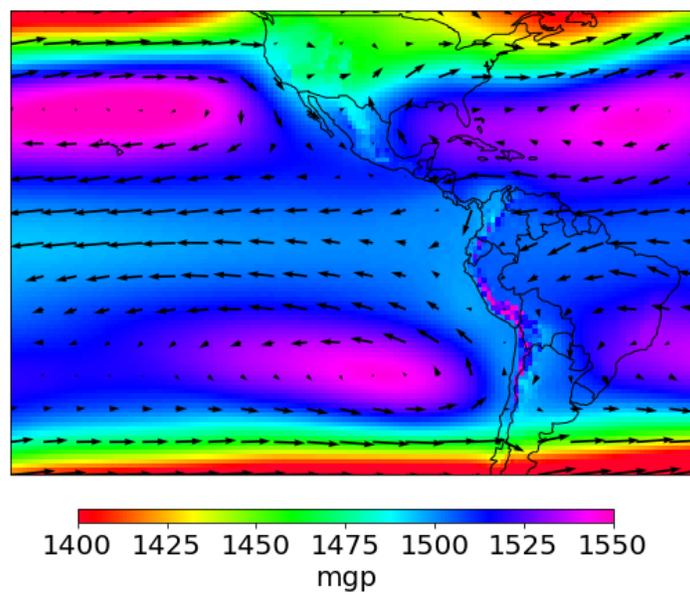


Fig.B4. Similar a la Fig.B1 para la altura geopotencial [mgp] y el campo de viento a 850 hPa

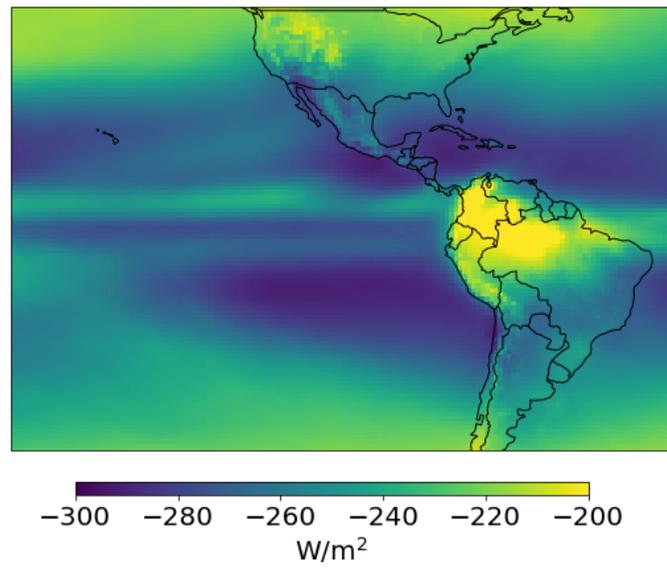


Fig.B5. Similar a la Fig.B1 para la radiación de onda larga saliente (OLR) [W/m^2].