

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“CARACTERIZACIÓN DE LAS OLAS DE CALOR Y LA SALUD
HUMANA EN PIURA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO METEORÓLOGO**

WIL LUIS LAURA LAURA

LIMA - PERÚ

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

“CARACTERIZACIÓN DE LAS OLAS DE CALOR Y LA SALUD
HUMANA EN PIURA”

Presentado por:
WIL LUIS LAURA LAURA

Tesis para Optar El Título Profesional de:
INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Julio Alfonso Arakaki Kiyán
PRESIDENTE

Dr. Luis Shuseki Yoza Yoza
MIEMBRO

Maest. Oscar Enrique Tang Cruz
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes
ASESORA

Mg. Sc. Cristina Pamela Davila Arriaga
Co ASESORA

DEDICATORIA

A mis seres queridos por su incondicional y constante apoyo para seguir mejorando como persona y profesional, por demostrarme que hay bondad en las personas y que trabajamos para construir una mejor sociedad en favor de la tierra.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada en el marco del Proyecto de Apoyo Gestión de Cambio Climático (AGCC) financiado por la Cooperación de desarrollo suizo (COSUDE), implementado por South South North (SSN) y Libélula Instituto para el cambio global, en conjunto con el Ministerio de ambiente (MINAM) y llevado a cabo por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Deseo expresar mi extensa gratitud hacia mi asesora Victoria Calle por brindarme la oportunidad de conocer un nuevo mundo en las ciencias de la atmósfera y a mi coasesora Cristina Davila por sus valiosos consejos, confianza e inspirarme a mejorar cada día como profesional. Un especial agradecimiento a la Subdirección de Predicción Climática de SENAMHI por darme la oportunidad de trabajar junto a ellos en los últimos años donde aprendí mucho de grandes profesionales.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Clasificación climática de Piura	4
2.2. Olas de calor	6
2.2.1. Olas de calor y su influencia en la salud a nivel mundial	6
2.3. Métricas para categorizar la ola de calor	7
2.4. Riesgo relativo de mortalidad.....	9
2.5. Patrones de circulación sinóptica	10
2.5.1. Mapas auto organizados	11
III. METODOLOGÍA	13
3.1. Materiales	13
3.1.1. Área de estudio.....	13
3.1.2. Datos	15
3.2. Métodos	15
3.2.1. Categorizar las olas de calor	16
3.2.2. Determinar la influencia de las olas de calor en la salud humana mediante el riesgo relativo de mortalidad	19
3.2.3. Determinar patrones sinópticos durante las olas de calor con influencia en la salud	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	25

4.1. Categorización de las olas de calor.....	25
4.1.1. Categorización de los treinta criterios de olas de calor para la provincia Piura - Estación San Miguel	25
4.1.2. Categorización de los treinta criterios de olas de calor para la provincia Sullana - Estación Mallares	28
4.2. Riesgo relativo de mortalidad por olas de calor	31
4.2.1. Riesgo relativo de mortalidad en la provincia Piura, departamento de Piura.....	31
4.2.2. Riesgo relativo de mortalidad en la provincia Sullana, departamento de Piura.....	32
4.2.3. Efecto de las olas de calor en la mortalidad en días posteriores	34
4.3. Patrones sinópticos durante las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad	36
4.3.1. Patrones sinópticos obtenidos del SOM.....	36
4.3.2. Evolución en el tiempo de las características sinópticas de los patrones más frecuentes de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad	41
4.3.3. Evolución en el espacio de los patrones más frecuentes de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad	46
V. CONCLUSIONES	85
VI. RECOMENDACIONES	87
VII. BIBLIOGRAFÍA	88
VII. ANEXOS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios analizados para categorizar las olas de calor.....	17
Tabla 2: Resumen de la categorización para la estación San Miguel. Número de eventos promedio, duración promedio y total de eventos.	25
Tabla 3: Resumen de la categorización para la estación Malleres. Número de eventos promedio, duración promedio y total de eventos.	29
Tabla 4: Datos de población y mortalidad a nivel provincial. Además de sus valores mensuales de temperaturas máximas, mínimas y medias del aire y de humedad relativa para el período de estudio durante la temporada cálida diciembre a abril (DEFMA).	34
Tabla 5: Frecuencias de los patrones de anomalía estandarizada de temperatura del aire .	39
Tabla 6: Resumen de características meteorológicas entre los patrones tres, cuatro y cinco.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de la clasificación climática para el departamento de Piura.	5
Figura 2: Funcionamiento del SOM.	11
Figura 3: Área de estudio en el departamento de Piura, delimitación de las provincias en rojo. Ubicación de estaciones meteorológicas convencionales en color turquesa.	14
Figura 4: Área de estudio para determinar patrones sinópticos.	14
Figura 5: Diagrama de síntesis metodológica para la investigación.	16
Figura 6: Serie de mortalidad general para la provincia de Piura, periodo desde el año 2003 al año 2017.	20
Figura 7: Distribución del grupo tratado (días con ola de calor) en color rosado y grupo control (días sin ola de calor) en color azul. Imagen izquierda sin aplicar el PSM e imagen derecha aplicando el PSM.	21
Figura 8: Área promediada en la evolución de las características meteorológicas delimitada por el cuadro rojo.	24
Figura 9: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo de un día, provincia Piura, departamento Piura. El círculo negro es el valor de RR significativo, el círculo tachado es el valor de RR no significativo y la línea negra es el Intervalo de confianza.	32
Figura 10: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo de un día, provincia Sullana, departamento Piura. El círculo negro es el valor de RR significativo, el círculo tachado es el valor de RR no significativo y la línea negra es el intervalo de confianza.	33
Figura 11: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo desde 1 a 20 días, provincia de Piura, departamento Piura. El área sombreada representa el intervalo de confianza y la línea gruesa representa el valor de RR.	35
Figura 12: Patrones de anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m de la superficie durante olas de calor con influencia en la salud.	37
Figura 13: Las olas de calor en Piura y su respectivo patrón en el tiempo.	40
Figura 14: Evolución media de la anomalía de la (a) temperatura máxima del aire, (b) divergencia en 200 hPa, (c) divergencia en 850 hPa, (d) velocidad vertical en 500 hPa, (e) humedad específica en 850 hPa, (f) radiación solar neta en	

superficie, (g) flujo de calor sensible en superficie, (h) viento meridional a 10 m durante el periodo desde 3 días antes y 3 días después de los eventos de OC en Piura para los 3 patrones más frecuentes. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó y así sucesivamente. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 42

Figura 15: Mapas de la evolución media de la anomalía de la temperatura máxima del aire con vientos en superficie antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor..... 50

Figura 16: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 200 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 55

Figura 17: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 850 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 60

Figura 18: Mapas de la evolución media de la anomalía de velocidad vertical a 500 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un

día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 64

Figura 19: Mapas de la evolución media de la anomalía de la temperatura máxima del aire con vientos en superficie antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor..... 69

Figura 20: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 200 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 74

Figura 21: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 850 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 78

Figura 22: Mapas de la evolución media de la anomalía de velocidad vertical a 500 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor. 83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Metadatos de las estaciones meteorológicas utilizadas	93
Anexo 2. Patrones de anomalía estandarizada de temperatura máxima del aire durante las olas de calor	94

RESUMEN

En la presente investigación se analizó las características de las olas de calor con un enfoque en la salud humana sobre Piura. El propósito fue determinar si existe una influencia de las olas de calor en la salud humana seleccionando los criterios más adecuados para categorizar estos eventos por intermedio de la mortalidad general sobre la zona de estudio, de ser así, saber cuánto podría durar esta influencia y describir sus características climáticas y sinópticas de las variables meteorológicas en la tropósfera para la ocurrencia de estas olas de calor. Se categorizó estos eventos en cuanto a frecuencia y duración de todo su registro climático considerando treinta criterios de olas de calor en función de la métrica, el umbral y el número de días. Mediante la metodología de riesgo relativo aplicado a datos de mortalidad general se halló los criterios más adecuados para categorizar una ola de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad. Las características climáticas de las variables meteorológicas asociadas a la generación de estos eventos se investigaron a través de patrones sinópticos utilizando la técnica mapas auto organizados. Se encontró que, en las provincias de Piura y Sullana existe un riesgo de mortalidad por las olas de calor, las cuales son definidas a través de la temperatura máxima del aire, con un percentil 95 y una duración mínima de dos días. Normalmente, las olas de calor ocurren de uno a dos eventos por periodo cálido del año y tienen una duración media de tres días. Existen dos patrones sinópticos más frecuentes para la generación de estos eventos, el primero asociado a un calentamiento local en superficie sobre la costa norte de Perú y el segundo asociado a un calentamiento regional a escala sinóptica, cada uno presentando un comportamiento particular en la tropósfera.

Palabras clave: Ola de calor, salud humana, mortalidad, patrones sinópticos, riesgo relativo, mapas auto organizado

ABSTRACT

In this research, the characteristics of heatwaves were analyzed with a focus on human health over Piura. The purpose was to determine if there is an influence of heatwaves on human health by selecting the most appropriate criteria to categorize these events through general mortality over the study area, if so, to know how long this influence could last and describe its climatic and synoptic characteristics of the meteorological variables in the troposphere for the occurrence of these heatwaves. These events were categorized in terms of frequency and duration of their entire climate record considering thirty criteria of heatwaves based on the metric, the threshold and the number of days. Using the relative risk methodology applied to general mortality data, the most appropriate criteria were found to categorize a heat wave with an effect on mortality risk. The climatic characteristics of the meteorological variables associated with the generation of these events were investigated through synoptic patterns using self-organized maps. It was found that in the provinces of Piura and Sullana there is a risk of mortality due to heatwaves, which are defined through the maximum air temperature, with a 95th percentile and a minimum duration of two days. Normally, heat waves occur from one to two events per hot period of the year and last for an average of three days. There are two more frequent synoptic patterns for the generation of these events, the first associated with local surface warming on the north coast of Peru and the second associated with regional warming on a synoptic scale, each one presenting a particular behavior in the troposphere.

Keywords: Heat wave, human health, mortality, synoptic patterns, relative risk, self-organized maps

I. INTRODUCCIÓN

En el planeta tierra existe una variabilidad climática propia de cada lugar, en esta variabilidad se presentan eventos climáticos pocos frecuentes, considerados como extremos que pueden generar un impacto en la salud humana. Es innegable que, frente al cambio climático, las olas de calor son un emergente problema de salud pública a nivel mundial ya que suponen una amenaza creciente para la vida en términos de muerte y destrucción que no siempre son directas en su influencia (Pezza et al., 2012; WMO y WHO, 2015; UNISDR, 2018; Min et al., 2019). Un reciente estudio reveló que, entre 1998 y 2017, más de 166.000 personas murieron debido a las olas de calor en el mundo (UNISDR, 2018) clasificándolas entre los eventos naturales más peligrosos pero rara vez reciben la atención adecuada ya que las muertes asociadas a estos eventos no siempre son evidentes en el corto plazo.

La ola de calor es considerado como aquel período de tiempo inusualmente caluroso seco o húmedo que tiene un comienzo y un cese sutil con una duración de al menos dos o tres días y un impacto perceptible en las actividades humanas (WMO y WHO, 2015), a su vez, la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) entre otras fuentes de referencia resaltan la importancia de determinar los criterios para categorizar una ola de calor en función del sector de interés, como lo es el sector salud en esta investigación y en función del lugar de estudio.

Examinar la relación de altas temperaturas y salud humana en una región particular es imperativo para generar planes efectivos en el ámbito de la salud pública y del clima, para así prevenir problemas de salud durante las olas de calor (Heo y Bell, 2018). Asimismo, la mitigación de los impactos de las futuras olas de calor requiere abordar cuestiones fundamentales, es decir si se puede predecir y detectar las olas de calor. Por ello, es importante hacer investigaciones sobre la relación entre las olas de calor y la circulación atmosférica, más aún cuando existe una limitante al haber escasa literatura enfocada en los efectos de las olas de calor sobre la salud en climas tropicales y en países de ingresos bajos y medios (Sfica et al., 2017; Nori-Sarma et al., 2019), como es el caso de Perú.

En esta investigación se priorizó como zona de estudio el departamento de Piura, ya que existen reportes periodísticos que indican la muerte de ocho niños debido a la presunta presencia de una ola de calor en el mes de febrero del 2016, además, por la disponibilidad de información que se obtuvo sobre este lugar y por sus características climáticas y eventos extremos asociados que podrían generar un riesgo para la población.

Al realizar la caracterización de las olas de calor con una influencia en la salud humana en Piura se buscó determinar los criterios más adecuados para categorizar este tipo de olas de calor, por ello se analizaron treinta criterios que varían en función de la métrica, el umbral y el número de días, además se buscó comprobar si existe un efecto de estos eventos extremos en la mortalidad y determinar cuánto podría durar su influencia en los días posteriores a la ocurrencia del evento a través del cálculo del riesgo relativo de mortalidad general en las provincias de Piura y Sullana, por último, se analizó los patrones sinópticos asociados a la ocurrencia de las olas de calor con un efecto en la mortalidad sobre Piura a través de la aplicación de una técnica de machine learning llamado mapas auto organizados, sobre un área que abarca desde 10°N-130°W a 20°S-60°W.

Los resultados de este estudio son de utilidad para los tomadores de decisión al brindar un sustento técnico de la influencia de olas de calor en la población y generar una concientización de sus impactos, asimismo será una herramienta importante en el monitoreo de eventos extremos en los servicios de meteorología y eventualmente permitirá el desarrollo de sistemas de alerta por olas de calor con la finalidad de preservar la calidad de la salud.

Objetivo principal:

- Analizar las características de las olas de calor en la salud humana en el departamento de Piura para el periodo desde el año 2003 al año 2017.

Objetivos específicos:

- Categorizar los eventos de olas calor por estación meteorológica utilizando treinta criterios en función de la métrica, el umbral y el número de días.
- Analizar la influencia de las olas de calor en la salud humana mediante el riesgo relativo de mortalidad.

- Identificar los patrones sinópticos asociados a las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad para el periodo desde el año 1981 al año 2017 mediante los mapas autos organizados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Clasificación climática de Piura

Conocer los tipos de climas que son propios de la zona de estudio es necesario para determinar el área de representatividad al relacionar la influencia de una ola de calor y la mortalidad general de la población.

Los climas en el departamento de Piura están conformados por once tipos. El de mayor extensión es el árido, que va desde el litoral hasta los 500 m s. n. m. y abarca en gran medida las provincias de Talara, Sullana, Paita, Piura, Sechura y parte de Morropón, siendo cálido o templado, con deficiencia de humedad todo el año, E(d)A' y E(d)B'. Entre los 500 y 1 000 m s. n. m., en la provincia de Huancabamba y zonas altas de las provincias de Piura y Morropón, se presenta el clima semiárido y cálido, con deficiencia de humedad en invierno y primavera, D(i,p)A', versión preliminar (SENAMHI, 2020).

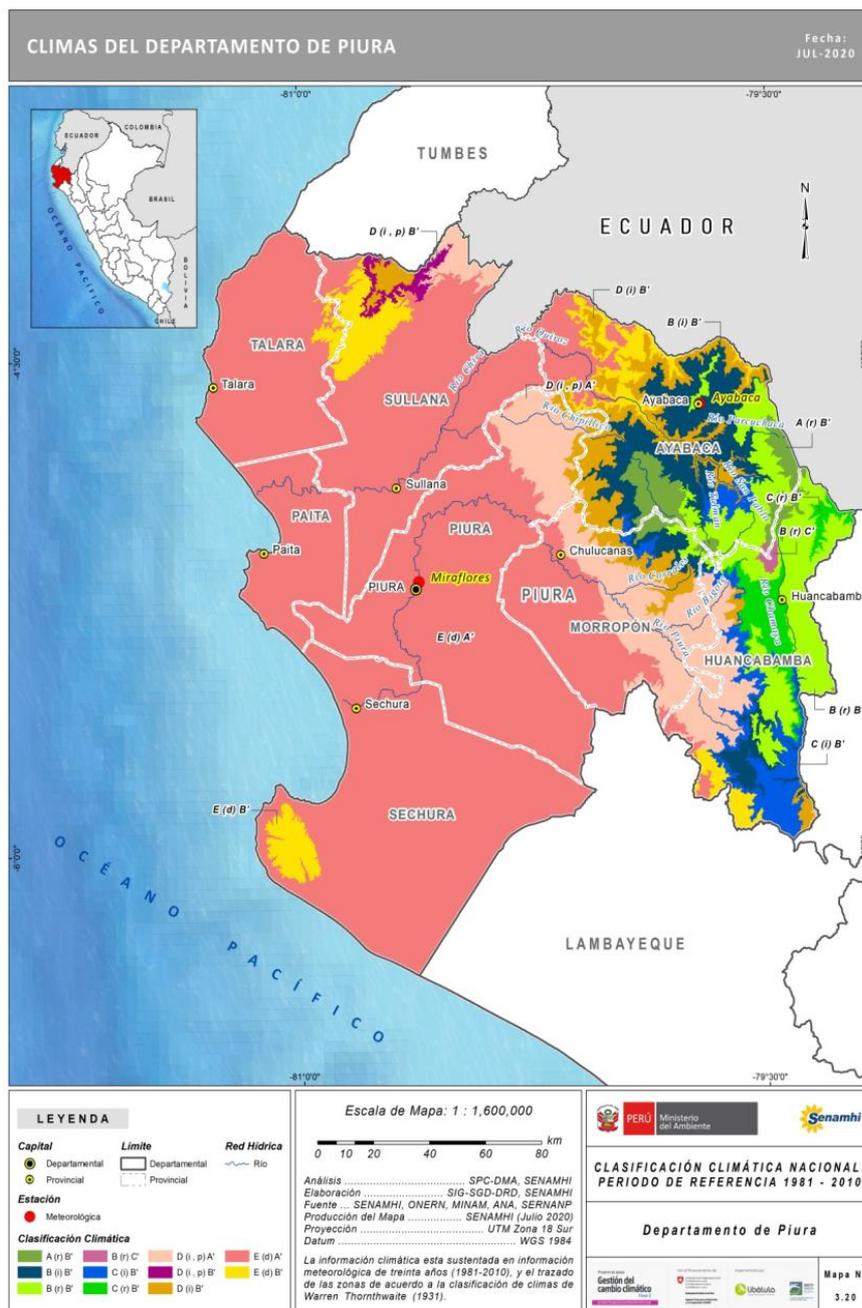


Figura 1: Mapa de la clasificación climática para el departamento de Piura.

FUENTE: SENAMHI (2020)

Una gran extensión del departamento de Piura presenta un clima árido, cálido y con deficiencia de humedad durante el año, como se observa en la Figura 1. Este clima abarca desde el litoral hacia el oriente, conforme se incrementa la elevación de la superficie. Es decir, esta área presenta un comportamiento térmico y pluviométrico semejante, de esta forma la presencia de altas temperaturas que se registra en esta zona está influenciada bajo los mismos factores atmosféricos y topográficos. Lo cual ayuda a definir el área de estudio para asociar las olas de calor y su riesgo en la mortalidad humana.

2.2. Olas de calor

Se define a las olas de calor como aquellos periodos inusuales de tiempo atmosférico caliente, húmedo o seco, de inicio y término gradual de dos a tres días consecutivos mínimos que generan un impacto significativo en las actividades humanas (WMO y WHO, 2015). Los criterios para categorizar una ola de calor varían en función de la disponibilidad de fuentes de información y del sistema de pronóstico del tiempo, es así que varía por país y región analizada (Wang et al., 2015). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático clasifica la ola de calor como uno de los eventos climáticos extremos que está asociado al cambio climático y que tiene una serie de riesgos asociados a este, que por naturaleza son impredecibles, perturbadores y de periodos cortos. (Zuo et al., 2015).

Existe una variedad de criterios usando umbrales y duración mínima del evento para categorizar una ola de calor, a esto se le suma la variedad de métricas para monitorear estos eventos como pueden ser las temperaturas del aire y los índices termales (Heo y Bell, 2019). Los índices pueden ser aplicados dependiendo del sector de estudio, ya sea a la salud humana, incendios, agricultura, transporte, entre otros; además dependerá del lugar de estudio (Perkins, 2013). En gran parte, estos son estimados a partir de la variedad de niveles de temperatura, humedad, velocidad del viento, entre otras variables.

2.2.1. Olas de calor y su influencia en la salud a nivel mundial

Las olas de calor son un emergente problema de salud pública a nivel mundial debido a que suponen una amenaza muy importante (creciente) para la vida y la propiedad en tiempos de crecimiento demográfico acelerado y cambio climático (Pezza et al., 2012; WMO y WHO, 2015). Sin embargo, existe poca literatura enfocada en los efectos de la salud por olas de calor ocurridos en climas tropicales y en países de ingresos bajos y medios, a pesar que las poblaciones en estas regiones pueden ser particularmente vulnerables al calor y menos capaces de adaptarse al cambio climático (Nori et al., 2019).

Entender los efectos de las olas de calor en la salud es fundamental para preparar a las comunidades vulnerables ante estos eventos y para estimar los impactos del cambio climático en la salud, ya que se prevé que aumente la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor (Nori et al., 2019).

Sólo algunas muertes y enfermedades son directamente causadas por el calor debido a las elevaciones en la temperatura corporal central por periodos prolongados, llamadas muertes debido a golpes de calor; mientras que muchas más son relacionadas al empeoramiento de

condiciones existentes de salud, como condiciones pulmonares crónicas, condiciones cardíacas, trastornos renales y enfermedades psiquiátricas (WMO y WHO, 2015).

Los efectos adversos en la salud debido a las olas de calor son en gran parte prevenibles. La prevención requiere de intervenciones a diferentes niveles, desde la preparación del sistema de salud coordinado con sistemas de alerta meteorológicas temprana para asesorar oportunamente al cuerpo médico y público en general, así como mejoras a las viviendas y la planificación urbana (WHO, 2011).

2.3. Métricas para categorizar la ola de calor

Las métricas en este presente estudio hacen referencia a la variable que sirve para cuantificar el calor en el aire. Existen diferentes métricas para categorizar y monitorear las olas de calor, entre ellas se tienen las temperaturas del aire e índices termales que emplean una combinación de variables meteorológicas (Rennie et al., 2021; Cheng et al., 2019)

2.3.1. Temperaturas del aire

La temperatura del aire es una medida de la energía cinética promedio, en otras palabras, un promedio de la velocidad de las moléculas, lo que podemos interpretar como la cantidad que nos indica que tan caliente o frío está el aire en relación a valores estándares (Ahrens, 2012). En las estaciones meteorológicas se registran las temperaturas del aire durante las 24 horas y existen diversas temperaturas del aire, entre ellas se distinguen la temperatura máxima del aire durante un día, la temperatura mínima del aire durante un día, la temperatura del aire registrada a cierta hora, entre otras (Senamhi, 2013).

2.3.2. Índices termales

Durante el último siglo, se ha realizado bastante investigación en cómo definir el confort termal y cómo clasificar el estrés termal; producto de estos esfuerzos se han generado varios modelos que intentan describir dichas interacciones (Blazejczyk et al., 2012). De todas las metodologías, la utilización de una métrica única de temperatura o una forma modificada de la temperatura aparente es probablemente el tipo de sistema más común para evaluar olas de calor y salud (WMO y WHO, 2015).

Existe un grupo de índices termales que ilustran el efecto combinado del organismo humano bajo diferentes variables meteorológicas, como la temperatura del aire, la

velocidad del viento y la humedad del aire; entre estos índices se encuentran el Heat Index, Apparent Temperature, Wet Bulb globe temperature (Blazejczyk et al., 2012).

La elección del índice dependerá de los recursos humanos y de información, incluyendo experiencia técnica y evidencia científica que indique cuál es el mejor índice por la situación específica (WMO y WHO, 2015).

2.3.3. Métricas utilizadas

A. Temperatura del aire a las 13 horas

La temperatura del aire se mide a través de un termómetro de bulbo seco, su unidad de medida es el grado Celsius, durante las observaciones meteorológicas en ciertas horas preestablecidas (07, 10, 13, 16, 19 horas) en estaciones convencionales. Para el presente estudio, se utilizarán las mediciones a las 13 horas.

B. Temperatura máxima del aire

La temperatura máxima diaria indica el valor de la temperatura del aire más alta que se registró durante el día (WMO, 1992), utilizando un termómetro de máximas, usualmente medido en grados Celsius. Generalmente, se obtienen estos valores durante la tarde, cuando existe un máximo calentamiento diurno.

C. Índice de calor

También llamado Heat Index (HI), es un índice que combina la temperatura del aire y la humedad relativa para determinar la temperatura aparente (Blazejczyk et al, 2012). Fue propuesto por Rothfusz en el año 1990, derivado de la temperatura aparente realizada por Steadman's en el año 1979. El HI es el resultado de estudios biometeorológicos. Este modelo es resumido como una relación entre la temperatura del aire a diferentes grados de humedad y la resistencia de la piel a la transferencia de calor y humedad (Rothfusz, 1990).

$$HI = -8.784695 + 1.61139411 \cdot T + 2.338549 \cdot HR - 0.14611605 \cdot T \cdot HR - 1.2308094 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 - 1.642483 \cdot 10^{-2} \cdot HR^2 + 2.211732 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \cdot HR + 7.2546 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot HR^2 - 3.582 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \cdot HR^2 \quad \text{Ec.1}$$

Ecuación 1, donde T es la temperatura del aire en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), HR es la humedad relativa en porcentaje y HI en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para su cálculo se utilizaron los valores registrados a las 13 horas.

D. Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo

También llamado Simple Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), es el índice de estrés térmico más utilizado a nivel mundial (Budd, 2007). Fue desarrollado en el año 1950 por la armada y el cuerpo de la Marina de los Estados Unidos. Las variables que se aplican en la ecuación original son obtenidas por instrumentos que no son fácilmente accesibles. Debido a ello, el Instituto Bureau realizó una simplificación utilizando parámetros meteorológicos de temperatura y humedad en el ambiente (Bureau of Meteorology, 2011).

$$WBGT = 0.567.T + 0.393.vp + 3.94 \quad \text{Ec.2}$$

Ecuación 2, donde T es la temperatura del aire en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), vp es la presión del vapor de agua en hPa y $WBGT$ en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para su cálculo se utilizaron los valores registrados a las 13 horas.

E. Índice de temperatura aparente

El índice de temperatura aparente (TA) o también conocido como Apparent Temperature, es entendido como un ajuste de la temperatura del aire basado en el nivel de humedad (Steadman, 1984). Fue desarrollado por Steadman en el año 1984 y tiene en cuenta el efecto enfriador del viento (Blazejczyk et al, 2012). Debido a la disponibilidad de información meteorológica, se utiliza el modelo de no radiación, esta versión incluye los efectos de la temperatura, humedad y vientos (BOM, 2011).

$$TA = T + 0.33.vp - 0.7.v - 4.0 \quad \text{Ec.3}$$

Ecuación 3, donde T es la temperatura del aire en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y vp es la presión del vapor de agua en hPa, v es la velocidad del viento en m.s^{-1} y TA en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Para su cálculo se utilizaron los valores registrados a las 13 horas.

2.4. Riesgo relativo de mortalidad

La vulnerabilidad de la sociedad y ecosistemas ante eventos climáticos extremos dependen primordialmente del área afectada, la extensión temporal del evento climático y el tipo de ecosistema. Desde la perspectiva humana, esta vulnerabilidad se refleja en el incremento potencial del número de enfermos y muertes durante un tiempo dado (tasas de morbilidad y mortalidad, respectivamente). Estos impactos además dependen en el tipo de población

afectada, por grupo etario y adaptación general de la sociedad ante este tipo de eventos, como pueden ser, las temperaturas extremas (Geirinhas et al., 2017).

El riesgo relativo (RR) de un evento es la probabilidad de su ocurrencia después de estar expuesto a una variable de riesgo en comparación con la probabilidad de su ocurrencia en un grupo control. Cuando este término es igual a uno ($RR = 1$) significa que el riesgo del evento es idéntico ya sea ante las muestras de exposición o control, si es menor a uno ($RR < 1$) significa que el riesgo es menor durante las muestras de exposición o tratadas y si el RR es mayor a uno ($RR > 1$) significa que el riesgo es incrementado durante las muestras tratadas (Andrade, 2015).

El riesgo relativo de mortalidad por olas de calor compara días con ola de calor y días sin ola de calor. Determina el riesgo de exposición de las olas de calor sobre la influencia en incrementos de mortalidad general (Nori-Sarma et al., 2019).

En el Perú, si bien es cierto que las muertes relacionadas a olas de calor se pueden registrar en la Oficina General de Tecnología e Información del Ministerio de Salud, en la práctica esto no está implementado. Como sí lo es en Corea del Sur y China, con lo cual les permite hacer estudios que relacionen directamente los efectos en la salud y olas de calor (Min et al., 2019).

2.5. Patrones de circulación sinóptica

Los patrones de circulación (CP) pueden entenderse como la partición de estados atmosféricos recurrentes que pueden estar relacionados con algunas variables dependientes como la temperatura (Paccini, 2016). La WMO indica que un patrón de circulación es la configuración con características definidas de una circulación atmosférica sobre una región específica.

Un mejor entendimiento de las conexiones a gran escala de las variables climáticas es esencial para realizar pronósticos de olas de calor más precisos y que puedan ser relacionados con un efecto en la salud. Ya que, al determinar los patrones sinópticos se podría analizar qué factores atmosféricos contribuyen a la generación de las olas de calor, entendiendo los mecanismos físicos detrás de tales eventos. Por ello, la aplicación de los mapas auto organizados para determinar los patrones sinópticos se ha vuelto popular en la literatura de ciencias climáticas (Pezza et al., 2012), como es el caso de Gibson et al, en el año 2017, determina patrones de eventos extremos olas de calor para Australia, Paccini en el año 2016, determina patrones intraestacionales en la cuenca amazónica y Cassano et al,

en el año 2006 determina patrones sinópticos sobre Alaska, entre otros; ya sean latitudes tropical o medias, la técnica es ampliamente usada para determinar patrones.

2.5.1. Mapas auto organizados

La técnica de mapas auto organizados (SOM, por sus siglas en inglés) es un algoritmo de proceso de aprendizaje no supervisado que codifica grandes conjuntos de datos multivariados en una matriz bidimensional (mapa) o vectores de referencia (centroides de conglomerados) que tienen una organización espacial que corresponde a una retícula bidimensional (Gutierrez et al., 2005; Cassano et al., 2006).

Los patrones de sinópticos obtenidos del SOMs son usualmente utilizados para entender las conexiones entre circulaciones regionales a gran escala y variables meteorológicas locales, p.ej. la variabilidad de temperatura (Gibson et al., 2017). Una de sus ventajas es obtener una clasificación no lineal basada en un proceso iterativo, que premia a la clase ganadora y sus vecinos más cercanos, mientras que inhibe a los más lejanos. El algoritmo de aprendizaje no supervisado del SOM conformado por un número arbitrario de agrupaciones busca descubrir patrones y clasificarlos, detectando rasgos significativos que caracterizan la circulación atmosférica diaria (Cavazos, 2000; Gutierrez et al., 2005).

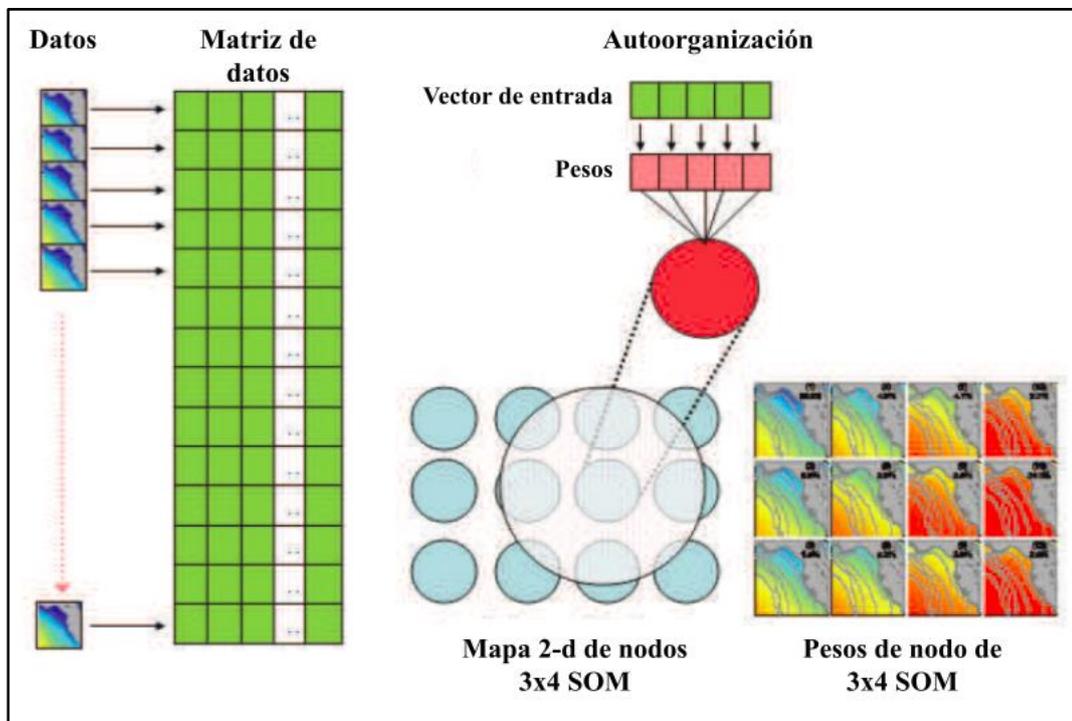


Figura 2: Funcionamiento del SOM.
FUENTE: Liu et al. (2011)

En la Figura 2, se muestra en forma gráfica el proceso para generar los patrones utilizando el algoritmo SOM. Las series de tiempo de datos espaciales (variables meteorológicas) se reorganizan en una matriz bidimensional (2-d) de modo que los datos en cada paso de tiempo se reestructuran como un vector de fila. En cada paso de tiempo, el vector de fila se usa para actualizar el peso del SOM a través de un algoritmo de aprendizaje no supervisado, proceso denominado como autoorganización. Los vectores de ponderación como resultados de los nodos del SOM se reconfiguran en patrones de datos espaciales.

III. METODOLOGÍA

3.1. Materiales

3.1.1. Área de estudio

La investigación consideró 2 áreas de estudio según los objetivos específicos planteados:

- El área de estudio para determinar las características de las olas de calor y su influencia en el riesgo de mortalidad es la costa del departamento de Piura debido a la disponibilidad de información climática y de mortalidad que dicha zona presenta, y a la existencia de antecedentes de personas afectadas por incrementos de temperaturas extremas (MINSA, 2016). Las provincias analizadas en el departamento de Piura son: Piura y Sullana. Figura 3.
- El área de estudio para determinar patrones sinópticos asociados a las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad abarca una escala regional desde 10°N-130°W a 20°S-60°W, ya que se desea analizar las circulaciones atmosféricas que puedan provenir de otras regiones en una escala horizontal que abarque más de miles de kilómetros. Figura 4.

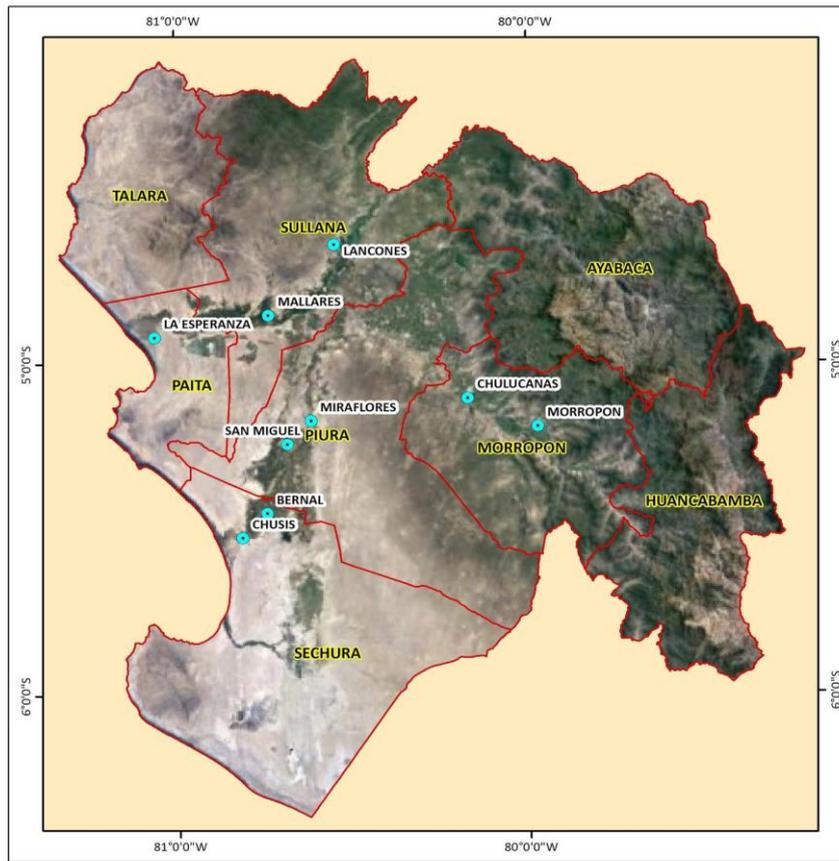


Figura 3: Área de estudio en el departamento de Piura, delimitación de las provincias en rojo. Ubicación de estaciones meteorológicas convencionales en color turquesa.

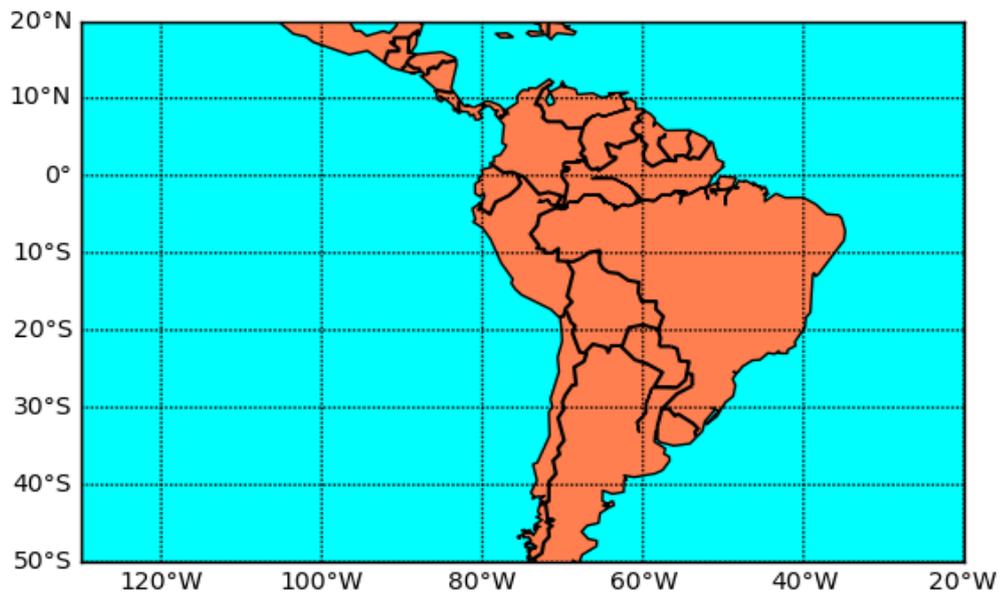


Figura 4: Área de estudio para determinar patrones sinópticos.

3.1.2. Datos

Se utilizaron 3 tipos de datos para desarrollar la investigación:

- Para categorizar las olas de calor a partir de treinta criterios se utilizaron los datos meteorológicos diarios de temperatura máxima, bulbo seco, bulbo húmedo y velocidad de vientos con un periodo de registros desde el año 1964 al año 2017 de 2 estaciones meteorológicas convencionales, las estaciones San Miguel y Mallares ubicadas en las provincias de Piura y Sullana respectivamente, Figura 3, pertenecientes a la red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI-PERÚ). Estos datos presentan un control de calidad realizado por la institución, además, se verificó la coherencia del dato mediante un análisis de variabilidad en base a su climatología y ciclo anual previo a la asociación con los datos de mortalidad por provincia. Metadatos de las estaciones meteorológicas utilizadas en la sección de anexos.
- Para analizar la influencia de las olas de calor en la salud humana mediante el riesgo relativo de mortalidad se utilizaron datos de mortalidad diaria a nivel distrital en el departamento de Piura desde el año 2003 al año 2017, obtenidos de la fuente Oficina General de Tecnología e Información (OGTI) del Ministerio de Salud (MINSa). Cabe señalar que se excluyó el año 2015 por falta de datos de mortalidad y que se seleccionaron los datos de mortalidad por lugar de fallecimiento. Los cálculos se realizaron durante los meses del periodo cálido del año que comprende desde diciembre a abril.
- Para identificar los patrones sinópticos asociados a las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad se utilizaron datos diarios de reanálisis modelo atmosférico ERA5 (Hersbach et al., 2020) proveído por el Servicio de cambio climático de Copernicus (C3S) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés), con un periodo desde el año 1981 al año 2017 para la región tropical y latitudes medias correspondiente a Sudamérica.

3.2. Métodos

Se detalla a continuación, los procedimientos para el desarrollo de los objetivos planteados. Se muestra el esquema general de los procesos que se siguieron en la investigación, ver Figura 5.

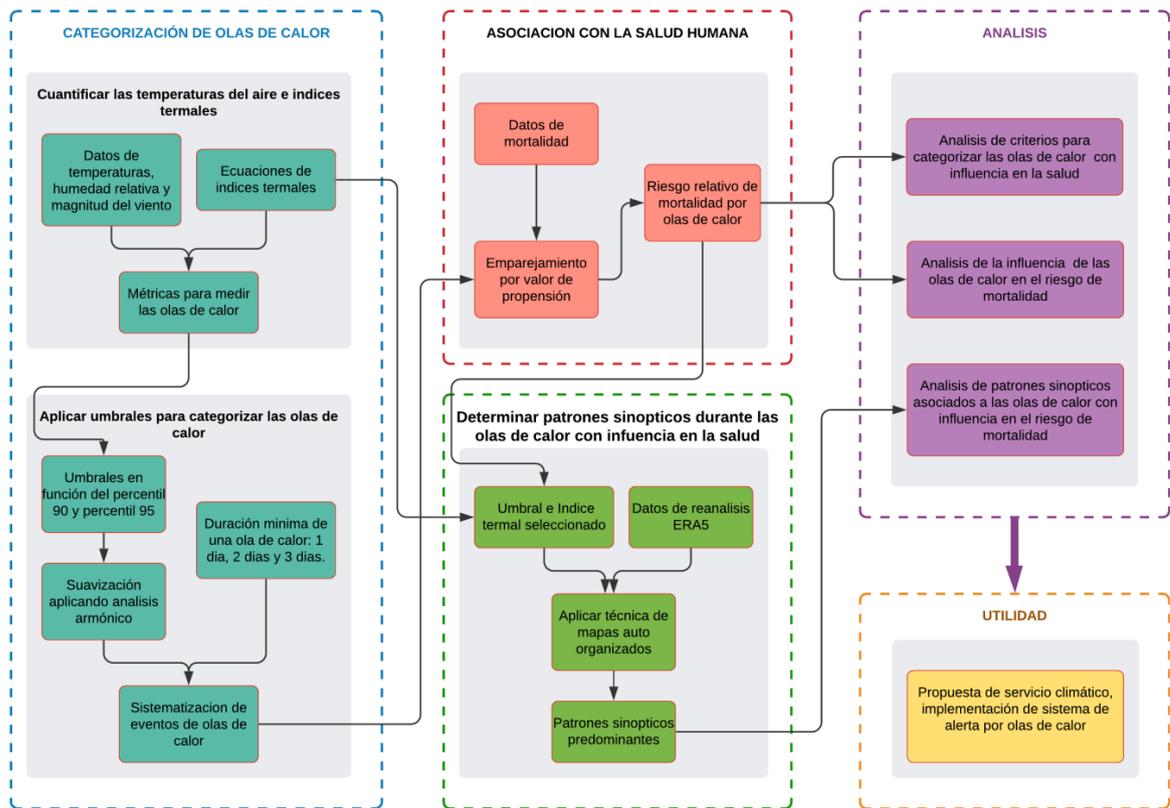


Figura 5: Diagrama de síntesis metodológica para la investigación.

3.2.1. Categorizar las olas de calor

La categorización de las olas de calor se realizó basándose en treinta criterios, que varían en función de la métrica (temperatura del aire o índices termales), el umbral (percentiles 90 o 95) y el número de días (uno, dos o tres días), ver Tabla 1. Por ello, el primer paso consistió en la recopilación de las temperaturas del aire y estimación de los índices termales por punto de estación meteorológica convencional. Posterior a ello, se calcularon los umbrales diarios de las métricas utilizadas. Los umbrales, tras aplicarles un análisis armónico, se utilizaron para poder cuantificar los días que superaron dicho umbral y de acuerdo al número de días continuos, se clasificaron los eventos de ola de calor.

Tabla 1: Criterios analizados para categorizar las olas de calor

Etiqueta de los criterios de olas de calor	Métrica	Umbral aplicado (percentil)	Duración mínima de días
P90_1D/TMAX	Temperatura máxima del aire	90	1
P90_2D/TMAX	Temperatura máxima del aire	90	2
P90_3D/TMAX	Temperatura máxima del aire	90	3
P95_1D/TMAX	Temperatura máxima del aire	95	1
P95_2D/TMAX	Temperatura máxima del aire	95	2
P95_3D/TMAX	Temperatura máxima del aire	95	3
P90_1D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	90	1
P90_2D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	90	2
P90_3D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	90	3
P95_1D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	95	1
P95_2D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	95	2
P95_3D/Tbs_13	Temperatura del aire a las 13 horas	95	3
P90_1D/HI	Índice de calor a las 13 horas	90	1
P90_2D/HI	Índice de calor a las 13 horas	90	2
P90_3D/HI	Índice de calor a las 13 horas	90	3
P95_1D/HI	Índice de calor a las 13 horas	95	1
P95_2D/HI	Índice de calor a las 13 horas	95	2
P95_3D/HI	Índice de calor a las 13 horas	95	3
P90_1D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	90	1
P90_2D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	90	2
P90_3D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	90	3
P95_1D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	95	1

Continuación...

P95_2D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	95	2
P95_3D/WBGT	Índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo a las 13 horas	95	3
P90_1D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	90	1
P90_2D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	90	2
P90_3D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	90	3
P95_1D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	95	1
P95_2D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	95	2
P95_3D/TA	Temperatura aparente a las 13 horas	95	3

A. Cuantificación de las métricas

La cuantificación de las métricas comprende la recopilación de los datos registrados de la temperatura del aire a las 13 horas y la temperatura máxima del aire del día, asimismo, comprende la estimación de los índices termales (índice de calor, índice de temperatura simple del globo de bulbo húmedo e índice de temperatura aparente) a partir de variables meteorológicas utilizando ecuaciones ya establecidas descritos en la sección métricas utilizadas dentro de la revisión de literatura (sección 2.3.3). La cuantificación se realizó para cada estación meteorológica convencional utilizada.

B. Aplicación de umbrales para determinar las olas de calor

Se probaron diversos criterios para definir una ola de calor en función de umbrales calculados mediante percentiles y periodos de tiempo desde uno a tres días, utilizando una variedad de índices termales y temperaturas del aire.

En base a los valores diarios de temperatura del aire e índices termales, se calcularon los percentiles 90 y 95 a escala diaria para un periodo de referencia desde el año 1964 al año 2017, en cada estación meteorológica convencional. Puesto que, el cálculo de los percentiles fue a escala diaria, la serie obtenida presenta una alta variabilidad por lo que es conveniente aplicar un método de suavizado. En este caso, se usará la técnica de análisis armónico, basado en la metodología aplicada por Arguez y Applequist en el año 2013. Para obtener el suavizado de la serie de percentiles diarios mediante la ecuación de armónicos

(Ec.4), primero se estiman los percentiles de temperatura a escala diaria, luego, se van acoplando las ondas en función del número de armónicos. El número de armónicos a utilizar son 8, ya que representan mejor la serie de percentiles sin ajuste, comprobado en función del error cuadrático medio al probar diferentes números de armónicos, actividad detallada en el informe de sistematización de eventos climáticos extremos (Laura et al., 2020).

$$y(t) = A_0 + \sum_{k=1}^M [A_k \cos(w_k t) + B_k \sin(w_k t)] \quad \text{Ec.4}$$

En la ecuación 4, t es el rango de días que varía desde 1 a 366, donde N es el valor máximo que ocupa el valor de 366, $w_k = 2k\pi/N$ y M es el número de armónicos usados, A y B son los coeficientes, los ángulos de medida varían en radianes, $y(t)$ es una serie ajustada reconstruida a partir de la suma de los armónicos.

Aplicando los umbrales diarios a la serie histórica de temperaturas e índices termales, se obtuvieron aquellos días que superaron los umbrales, generando una base de datos que clasifica a los eventos extremos en función de la duración de cada evento, así como su fecha de inicio y término. Este proceso cuantifica los eventos de olas de calor en función de los días que superen los umbrales pudiendo ser de uno, dos o tres días consecutivos como mínimo.

3.2.2. Determinar la influencia de las olas de calor en la salud humana mediante el riesgo relativo de mortalidad

Con los resultados del primer objetivo, se realizó una comparación de los valores de riesgo relativo utilizando la variedad de criterios para categorizar las olas de calor para poder determinar si existe una influencia en la salud humana a través del incremento en el riesgo de mortalidad general. Esta diversidad de criterios para las olas de calor se resume en la Tabla 1.

Producto de esta comparación, aquel criterio para categorizar las olas de calor que presente un mayor valor de riesgo relativo y sea estadísticamente significativo indicando la influencia en la mortalidad, serviría para establecer los criterios más adecuados en la categorización de una ola de calor asociado a la salud humana a través de un efecto en el incremento de riesgo de mortalidad general.

A. Asociación de las olas de calor con la salud humana

Se calculó el emparejamiento por valor de propensión (propensity score matching, PSM) para determinar el efecto causal de las olas de calor en la mortalidad. El PSM busca alcanzar un equilibrio de muestras con respecto a las covariables medidas que varían en el tiempo para reducir el potencial de confusión (Nori-Sarma et al., 2019; Austin, 2011). En este proceso, los días catalogados bajo olas de calor fueron considerados como el grupo tratado y días sin olas de calor como el grupo control.

Se realizó un control de los datos de mortalidad eliminando posibles períodos de gran porcentaje de datos faltantes que pudieran influir en los resultados como el año 2015. (Figura 6)

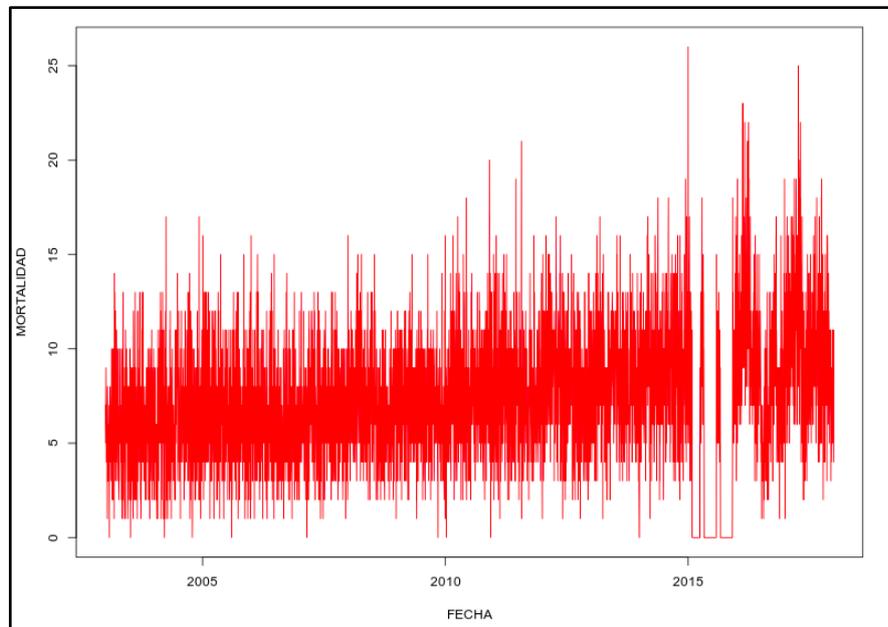


Figura 6: Serie de mortalidad general para la provincia de Piura, periodo desde el año 2003 al año 2017.

$$\text{logit}[\text{dia}_{OC} = 1|X] = \beta_0 + \beta_1(\text{año}) + \beta_2(\text{mes}) + \beta_3(\text{temp. } A) \quad \text{Ec.5}$$

Ecuación 5, donde dia_{OC} es clasificado como día con ola de calor cuando es igual 1 y clasificado como día sin ola de calor cuando es igual 0, y $\text{temp. } A$ es la temperatura en grados Celsius.

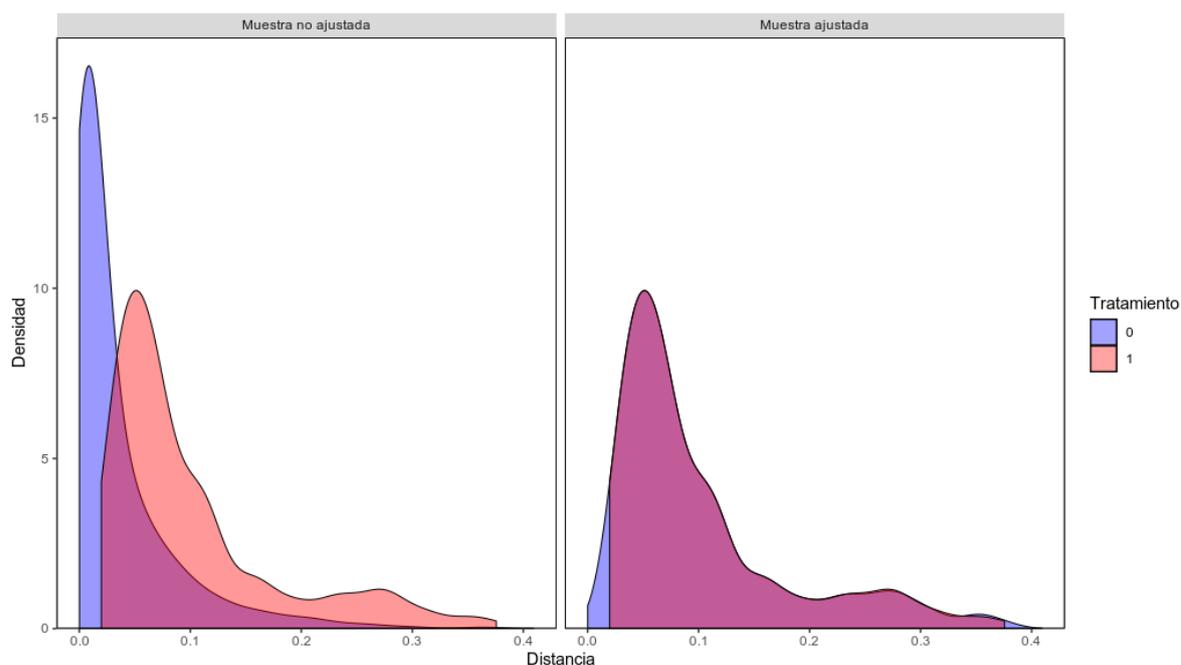


Figura 7: Distribución del grupo tratado (días con ola de calor) en color rosado y grupo control (días sin ola de calor) en color azul. Imagen izquierda sin aplicar el PSM e imagen derecha aplicando el PSM.

La Figura 7 representa el tratamiento de datos con el PSM, las muestras del grupo control y grupo tratado se ajustan en base a las características similares que pueda tener una muestra control con una muestra tratada, de esta forma, se filtran las muestras control que no presentan un emparejamiento con una muestra del grupo tratado debido al valor asignado en el PSM.

Se aplicó un modelo de regresión Quasi-Poisson para estimar el riesgo relativo de mortalidad por olas de calor. Una de las ventajas del modelo de Quasi-Poisson es que permite una dispersión excesiva en el comportamiento de la variable dependiente, datos de mortalidad (Nori-Sarma, 2019). Se utiliza como variable predictora los valores de probabilidad de ocurrencia de día con ola de calor o día normal, resultado de aplicar el PSM. Si los valores de riesgo relativo obtenidos son mayores a 1, nos indicaría que existe una influencia de las olas de calor sobre la salud humana, incrementando el riesgo de número de muertes generales.

$$\text{Log}(\text{mortalidad}) = \beta_0 + \beta_1(\text{dia}_{OC}) \quad \text{Ec.6}$$

Ecuación 6, donde dia_{OC} es el día catalogado con ola de calor o día normal y la mortalidad es la cantidad de muertes generales ocurridas para el día analizado. La función Quasi-Poisson utiliza un logaritmo neperiano. Esta relación de variable dependiente e independiente se calculó desde un desfase de un día hasta 20 días, con el fin de analizar la influencia de la ola de calor en el número de muertes generales en los siguientes días. Se

aplicó el uso del test error estándar robusto, en la estimación de los parámetros para controlar la distribución cuando la varianza no es igual a la media, recomendado por Cameron y Trivedi en el año 2009, al aplicar modelos de Poisson.

3.2.3. Determinar patrones sinópticos durante las olas de calor con influencia en la salud

El tercer objetivo específico del estudio consistió en determinar patrones sinópticos de la anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire durante las olas de calor en Piura con un efecto en el riesgo de mortalidad. Se utilizó el criterio P95_2D/TMAX para categorizar las olas de calor con efecto en el riesgo de mortalidad, resultado del segundo objetivo específico. Posterior a ello se realizó el análisis de las condiciones atmosféricas promedias asociadas a los patrones sinópticos.

A. Patrones sinópticos calculados a partir de la técnica mapas auto organizados

Los patrones sinópticos se determinaron mediante un algoritmo de redes neuronales artificiales llamado SOM. La aplicación de esta técnica hacia eventos extremos fue planteada por Gibson en relación a las olas de calor en Australia para determinar patrones y sus respectivas frecuencias (Gibson et al., 2017). Cabe resaltar que en la actualidad la aplicación de esta técnica de machine learning en el campo de la climatología sinóptica es cada vez más frecuente.

El proceso para desarrollar los patrones consistió primero en el cálculo de la anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire diaria utilizando la información de reanálisis ERA5 sobre el área a escala sinóptica desde 20°N - 130°W a 50°S - 20°W, Figura 4. La anomalía estandarizada se obtuvo a partir de restar el promedio climático de la temperatura máxima del aire a lo registrado en dicho día y dividirlo por su desviación estándar para eliminar perturbaciones en la dispersión de los datos, este proceso se aplicó para toda la información grillada de reanálisis. De esta manera, al analizar espacialmente las áreas de anomalías positivas y negativas en los patrones se puede inferir que estos valores en las anomalías tienen un mismo significado independiente del régimen climático que presenten diferentes locaciones involucradas en el espacio de estudio (Reynolds et al., 2002).

El siguiente paso consistió en filtrar los días con olas de calor. La información filtrada de anomalías de temperatura se utilizó como información inicial necesaria en el SOM para generar los patrones durante olas de calor asociadas a la mortalidad. Se generaron seis

patrones sinópticos, número de patrones establecidos en el algoritmo del SOM y su decisión para optar por esa cantidad de patrones dependió del nivel de complejidad del estudio y del poder computacional que se tenga para procesar la información espacial.

Obtenidos los patrones sinópticos de anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire durante las olas de calor se analizó la frecuencia de cada patrón y las diferencias entre los patrones.

B. Evolución en el tiempo de las características sinópticas de los patrones más frecuentes durante las olas de calor

El análisis de la evolución en el tiempo de las características sinópticas consistió en seleccionar los tres patrones sinópticos más frecuentes de olas de calor con influencia en el riesgo de mortalidad, generar un promedio de las condiciones atmosféricas de los días con olas de calor correspondiente a cada patrón. La descripción de las características sinópticas asociadas a las olas de calor se realizó en tres niveles geopotenciales.

La evolución temporal consistió en seleccionar los eventos de olas de calor correspondientes a los tres patrones más frecuentes. Se realizó un promedio diario de los eventos de olas de calor desde tres días antes del inicio de los eventos hasta tres días después de haber finalizado, en cada patrón. Se analizaron las anomalías de las variables meteorológicas sobre un área que abarca parte de Piura (Ver Figura 8). Las variables meteorológicas analizadas fueron la temperatura máxima del aire a dos metros de la superficie, divergencia en 200 y 850 hPa, velocidad vertical en 500 hPa, viento meridional a diez metros de la superficie, humedad específica en 850 hPa, Radiación solar en superficie y flujo de calor sensible en superficie.

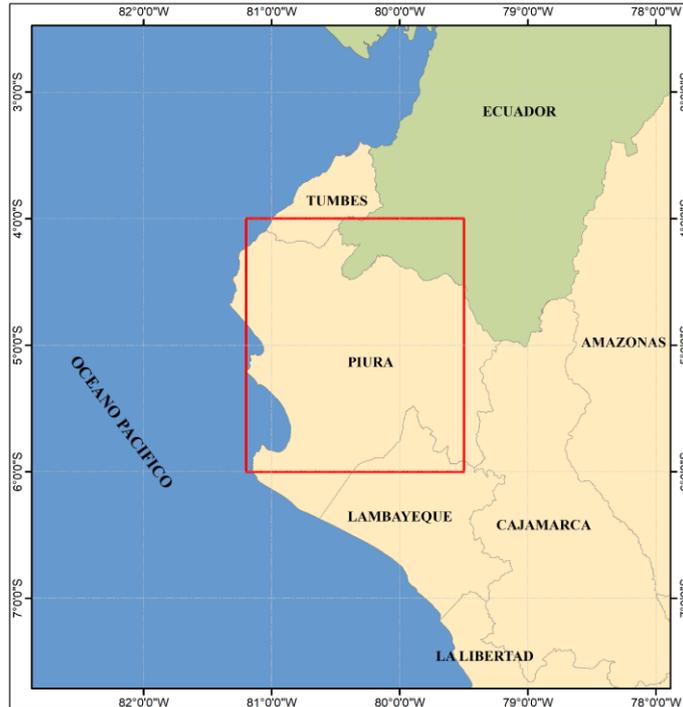


Figura 8: Área promediada en la evolución de las características meteorológicas delimitada por el cuadro rojo.

C. Evolución en el espacio de los patrones más frecuentes de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad

Se analizó espacialmente el comportamiento sinóptico de las variables asociadas a la ocurrencia de los eventos de ola de calor con influencia en el riesgo de mortalidad, resultado de la sección 3.2.2.

El análisis se realizó para los dos patrones sinópticos más frecuentes de olas de calor, desde tres días antes de que comiencen las olas de calor hasta dos días después de que finalicen los eventos para las anomalías de la temperatura máxima del aire a dos metros de la superficie, divergencia en 200 y 850 hPa, velocidad vertical en 500 hPa, viento meridional y zonal a diez metros de la superficie, 200 y 850 hPa sobre un área delimitada en la Figura 4.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Categorización de las olas de calor

4.1.1. Categorización de los treinta criterios de olas de calor para la provincia Piura - Estación San Miguel

Tras realizar la categorización de las olas de calor en la estación meteorológica San Miguel (Tabla 2), se puede observar que dependiendo de los criterios de olas de calor el número de eventos registrados varía. La mayor cantidad de eventos durante el periodo cálido utiliza la temperatura del aire a las trece horas, usando el umbral de percentil 90 y con un día como mínimo para categorizar la ola de calor, se contabilizó un máximo de 291 eventos. Por otro lado, la menor cantidad de eventos de olas calor se obtiene al utilizar el índice TA con un umbral de percentil 95 y tres días como mínimo para categorizar la ola de calor registrando solo ocho eventos.

El número de olas de calor dentro del periodo cálido pueden variar desde uno a cuatro eventos por mes dependiendo de los criterios aplicados para categorizar las olas de calor y en la mayoría de estos criterios el mes de febrero presenta el mayor número de eventos. De igual modo, la duración promedio de un evento de ola de calor puede variar desde uno a seis días, claro está que estas características climáticas de la ola de calor varían en función de los criterios aplicados.

Tabla 2: Resumen de la categorización para la estación San Miguel. Número de eventos promedio, duración promedio y total de eventos.

Etiqueta	DICIEMBRE		ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		TOTAL
	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	
P90_1D/HI	2.8	2	4.2	2	3.7	2	3.4	2	3.5	2	232
P90_2D/HI	1.6	3	2.8	3	2.4	4	2	3	2.1	3	96
P90_3D/HI	1.5	5	1.7	4	1.2	6	1	6	1.2	4	35
P95_1D/HI	2.8	2	4	2	2.9	2	4	1	2.3	2	147
P95_2D/HI	2.7	3	2.1	3	2.2	3	1.8	3	1.7	3	53
P95_3D/HI	1	6	1.7	4	2	5	1.5	4	1	4	19
P90_1D/TA	3.3	2	4.5	1	3.6	2	4.1	1	2.9	1	259
P90_2D/TA	2.1	3	1.7	2	1.9	3	1.6	3	1.4	3	84
P90_3D/TA	1.4	4	1.7	3	1.6	4	1.7	4	1.5	4	28
P95_1D/TA	2.7	1	3.1	1	3.5	1	3.2	1	2.4	1	185
P95_2D/TA	1.5	3	1.7	2	1.8	2	1.4	2	1	2	39
P95_3D/TA	1.5	4	1	3	1	4	1	3	1	3	8
P90_1D/Tbs_13	4.3	2	4.7	2	4.5	2	4.4	2	4.1	2	291
P90_2D/Tbs_13	2.4	3	3.1	3	2.6	3	2.3	4	2.2	4	140
P90_3D/Tbs_13	1.4	4	2.1	5	2	4	2.2	5	1.4	5	65
P95_1D/Tbs_13	4	1	4	2	3.4	2	2.9	2	3.5	2	210
P95_2D/Tbs_13	1.8	2	2.5	3	1.7	3	2	4	1.8	3	79
P95_3D/Tbs_13	1.3	3	2	4	1.4	4	1.6	5	1.5	4	35

Continuación...

P90_1D/TMAX	4.1	1	4.6	2	4.3	2	2.9	3	3.3	2	253
P90_2D/TMAX	2.3	2	2.5	3	2.2	3	2.1	4	2	3	97
P90_3D/TMAX	1.3	4	1.3	5	1.1	4	1.8	6	2	4	39
P95_1D/TMAX	3.1	1	4.5	1	3.6	1	3.4	2	3.1	2	187
P95_2D/TMAX	1.5	2	1.9	3	2	2	2	3	1.3	3	57
P95_3D/TMAX	1	4	2	4	1	4	2	5	1	4	14
P90_1D/WBGT	2.8	2	3.6	2	2.8	3	3.8	2	2.8	2	190
P90_2D/WBGT	1.6	4	2.6	3	2.3	5	2.2	3	1.5	3	82
P90_3D/WBGT	1.8	5	2.2	4	2	6	2	5	1	4	39
P95_1D/WBGT	3.3	2	4.4	2	3.4	2	4	1	2.4	2	136
P95_2D/WBGT	3.3	3	1.8	3	2.2	3	2	2	1.6	3	48
P95_3D/WBGT	1.5	6	1	4	1.5	4	1	4	1	4	14

4.1.2. Categorización de los treinta criterios de olas de calor para la provincia Sullana - Estación Mallares

Tras realizar la categorización de las olas de calor en la estación meteorológica Mallares (Tabla 3), la mayor cantidad de eventos de olas calor durante el periodo cálido se obtuvo al utilizar la temperatura máxima del aire, usando el umbral percentil 90 y con un día como mínimo para categorizar la ola de calor, se contabilizó un máximo de 243 eventos. Por otro lado, solo se registraron nueve eventos al utilizar el índice TA o WBGT a las trece horas con umbral de percentil 95 y tres días como mínimo para categorizar la ola de calor.

En cuanto al número de eventos en promedio dentro del periodo cálido varía desde cero a cuatro por mes y los meses de diciembre y febrero presentan el mayor número de eventos en la mayoría de los criterios aplicados para categorizar las olas de calor. La duración promedio de un evento de ola de calor puede variar desde uno a siete días.

Tabla 3: Resumen de la categorización para la estación Malleres. Número de eventos promedio, duración promedio y total de eventos.

Etiqueta	DICIEMBRE		ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		TOTAL
	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	Eventos	Duración	
P90_1D/HI	3	2	2.7	1	2.8	1	2	2	3.3	1	159
P90_2D/HI	3	3	1.7	3	1.3	2	2.4	3	1.8	3	52
P90_3D/HI	2.3	4	1	5	1	3	1.8	4	1	4	22
P95_1D/HI	4	2	1.8	1	2.2	1	2.4	2	3.7	1	100
P95_2D/HI	3	3	1.2	3	1	2	2	2	1.5	2	26
P95_3D/HI	2	4	1	5	0	0	1.3	3	1	3	10
P90_1D/TA	3.4	1	2.7	2	3.4	1	3.2	2	3.2	2	204
P90_2D/TA	2.4	2	1.5	3	1.6	2	1.9	3	2.2	3	62
P90_3D/TA	1.5	4	1	4	1	3	1.2	4	1	5	22
P95_1D/TA	2.8	2	2.1	1	2.3	1	2.3	2	4.1	1	120
P95_2D/TA	2.7	2	1.4	2	1.3	2	1.5	3	1.4	3	32
P95_3D/TA	2	4	1	4	0	0	1.3	4	1	6	9
P90_1D/Tbs_13	3.6	2	3.8	2	3.2	2	3.7	2	3.2	2	215
P90_2D/Tbs_13	2.7	3	2.2	3	2.3	3	2.5	3	1.9	3	89
P90_3D/Tbs_13	1.8	4	1.3	4	1.6	5	1.1	4	1.7	6	37
P95_1D/Tbs_13	3.1	2	3.2	1	2.9	2	2.7	2	3	1	168
P95_2D/Tbs_13	2.2	3	3	3	1.8	3	1.9	3	1.3	2	54
P95_3D/Tbs_13	1.3	4	1	4	1.4	4	1	4	1	6	21

Continuación...

P90_1D/TMAX	3.7	2	4	2	3.8	2	3.6	2	3.9	2	243
P90_2D/TMAX	3.3	3	2.4	3	2.2	3	2.9	4	2.8	3	106
P90_3D/TMAX	2	4	1.4	4	1.4	4	2.3	5	1.7	5	50
P95_1D/TMAX	3.2	1	3.8	2	3.4	2	3.1	2	3.1	2	179
P95_2D/TMAX	3	2	2.1	3	2.3	2	2.4	4	2	3	64
P95_3D/TMAX	1	3	1	4	1.2	3	2	4	1.2	5	24
P90_1D/WBGT	3	2	2.6	1	3.2	1	2.2	2	3	1	150
P90_2D/WBGT	4	4	1.2	3	1.3	2	3	3	1.6	3	43
P90_3D/WBGT	3	4	1	7	1	3	1.8	4	1.3	4	19
P95_1D/WBGT	3.5	2	1.7	1	2.1	1	2.7	2	3.3	1	85
P95_2D/WBGT	3	3	1	3	1	2	2	3	2	2	25
P95_3D/WBGT	2	3	1	4	0	0	1.3	3	0	0	9

A diferencia de la provincia de Piura, se observa que en la provincia de Sullana se registran una menor cantidad de eventos de olas de calor dentro del periodo cálido analizado. Lo cual demuestra que provincias relativamente cercanas pueden presentar diferencias en la categorización de las olas de calor. Las cuales pueden deberse a factores locales además de las condiciones sinópticas, estos factores pueden ser la topografía y condiciones de la superficie del suelo ya que tienen una influencia directa en la temperatura del aire (Yoon et al., 2018).

Si bien se muestra que existe una variación en la cantidad y en la duración de los eventos de olas de calor dependiendo de los criterios aplicados, ello no indica que una mayor cantidad de eventos de olas de calor estará proporcionalmente relacionada a un mayor efecto en la salud. Debido a ello, se procedió a desarrollar el segundo objetivo específico.

4.2. Riesgo relativo de mortalidad por olas de calor

4.2.1. Riesgo relativo de mortalidad en la provincia Piura, departamento de Piura

En la provincia de Piura (Figura 9), se observa que uno de los treinta criterios de olas de calor analizados presenta una influencia medible en la salud humana, al tener un valor de riesgo relativo mayor a uno, lo cual indica un incremento en el riesgo de mortalidad general durante los eventos de olas de calor.

Estas olas de calor tienen el siguiente criterio, P95_2D/TMAX, utilizar la temperatura máxima del día, umbrales diarios de percentil 95 y que la temperatura supere el umbral por dos días consecutivos como mínimo. El RR de mortalidad por ola de calor con un día de desfase es 1.13 [$\alpha = 0.05$, intervalo de confianza: 1.02 - 1.26].

Estos resultados implican que existe una influencia de las olas de calor en la salud humana en la provincia de Piura, analizando la relación de este tipo de evento extremo en el incremento del riesgo de muertes generales y que no se debe a una aleatoriedad en los resultados ya que son estadísticamente significativos al aplicar el test de error de robustez.

Las olas de calor con un criterio de P95_1D/WBGT, presentan un riesgo relativo de mortalidad menor a uno y es estadísticamente significativo, lo cual indicaría que los eventos de olas de calor presentarían un factor protector en la salud durante la ocurrencia de estos. Tal relación se debería investigar a mayor profundidad, la cual no forma parte de los objetivos planteados en esta investigación.

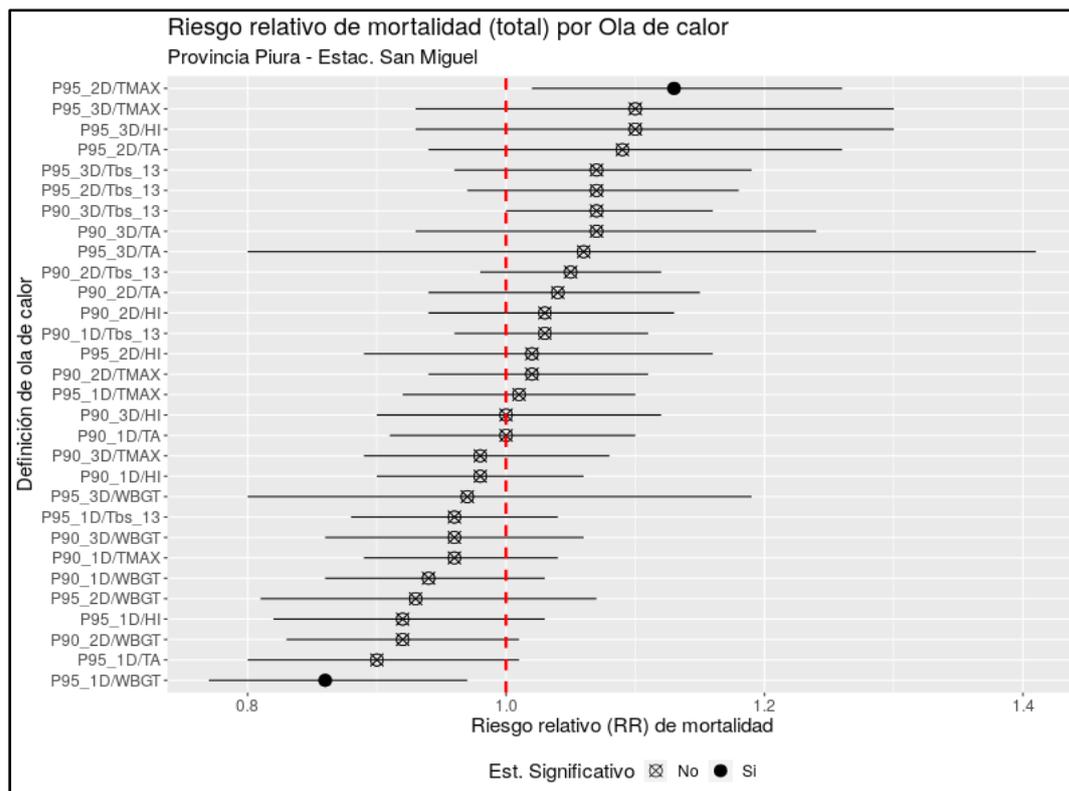


Figura 9: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo de un día, provincia Piura, departamento Piura. El círculo negro es el valor de RR significativo, el círculo tachado es el valor de RR no significativo y la línea negra es el Intervalo de confianza.

4.2.2. Riesgo relativo de mortalidad en la provincia Sullana, departamento de Piura

En Sullana (Figura 10), las olas de calor analizadas muestran una influencia medible en la salud incrementando el riesgo de mortalidad utilizando el criterio de ola de calor P95_3D/TMAX ya que existe una significancia estadística con riesgo relativo mayor a 1, obteniendo un p valor menor a 0.05 en el test estadístico de robustez.

Este criterio de ola de calor, utiliza la temperatura máxima del día, umbrales diarios de percentil 95 y que la temperatura supere el umbral por tres días consecutivos como mínimo. El RR de mortalidad por ola de calor con un día de desfase es 1.24 [$\alpha = 0.05$, intervalo de confianza: 1.01 - 1.55].

Los criterios de olas de calor, P90_2D/WBGT y P95_2D/WBGT, presentan un riesgo relativo de mortalidad menor a uno y son estadísticamente significativos, lo cual indicaría que los eventos de ola de calor usando dichos criterios presentarían un factor protector en la salud durante las olas de calor. Tal relación se debería investigar a mayor profundidad, la cual escapa de los objetivos planteados en esta investigación.

En ambas provincias, los criterios de olas de calor con un efecto en la salud tienen a la temperatura máxima del aire como métrica de medición y tienen como criterio de umbral el percentil 95. La diferencia entre los criterios para categorizar las olas de calor en Piura y Sullana radica en la duración mínima del evento, siendo de dos días en Piura y de tres días en Sullana. Los índices térmicos calculados como el HI, TA y WBGT, y la temperatura del aire a las trece horas resultaron no ser buenos indicadores para medir el efecto de las olas de calor en la salud en el área de estudio.

Teniendo en cuenta los criterios de las olas de calor con influencia en la salud mediante un incremento en el riesgo relativo de mortalidad general, se puede indicar que el número promedio de eventos de olas de calor fluctúa entre 1 y 2, tanto para Piura, Sullana. En cuanto a la duración media, los valores varían para cada zona: en Piura, las olas de calor duran entre 2 y 3 días; en Sullana duran entre 3 a 5 días debido a que las temperaturas son levemente más altas, normalmente (Tabla 4).

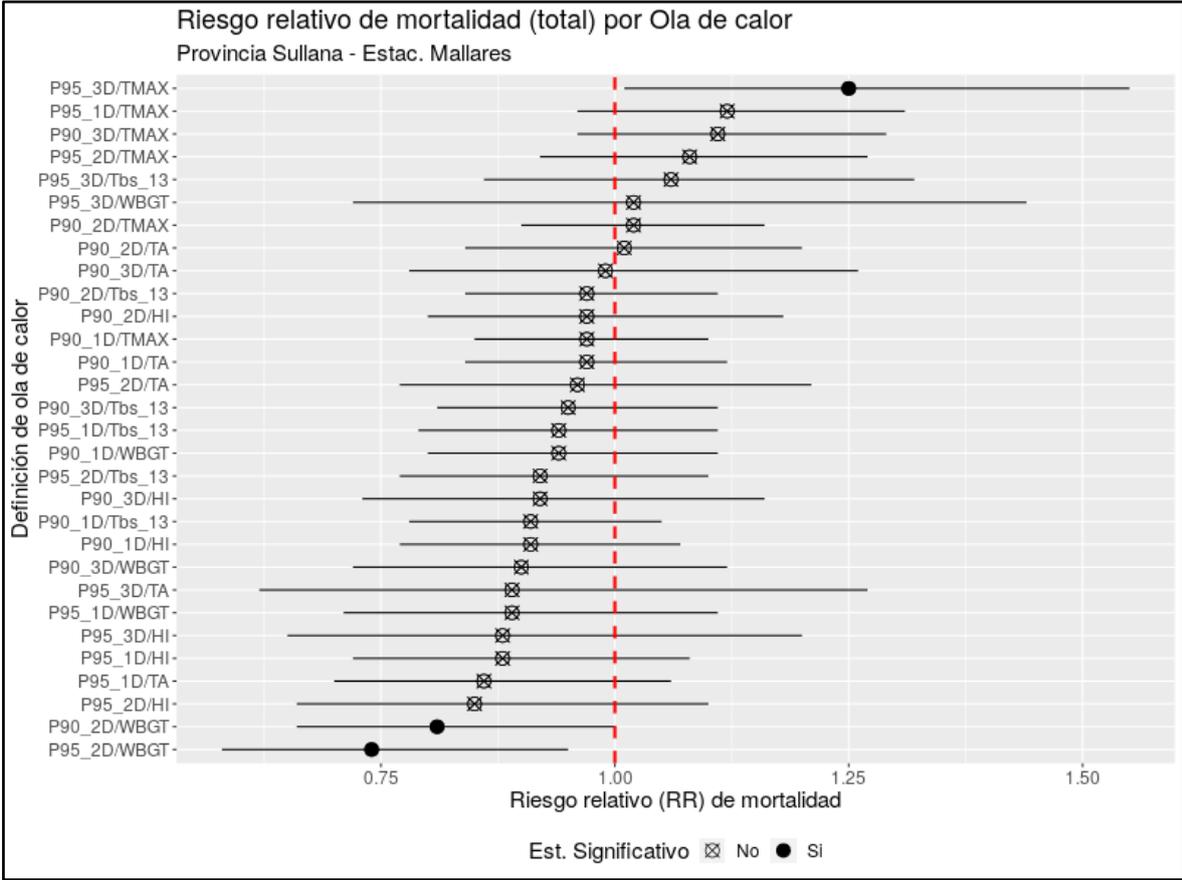


Figura 10: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo de un día, provincia Sullana, departamento Piura. El círculo negro es el valor de RR significativo, el círculo tachado es el valor de RR no significativo y la línea negra es el intervalo de confianza.

Tabla 4: Datos de población y mortalidad a nivel provincial. Además de sus valores mensuales de temperaturas máximas (Tmax), mínimas (Tmin) del aire y de humedad relativa (HR) para el período de estudio durante la temporada cálida diciembre a abril (DEFMA).

Provincia	Población censada (2017)	Número de muertes	Tmax máxima / media (°C) DEFMA	Tmin mínima / media (°C) DEFMA	HR máxima / media (%) DEFMA	HR mínima / media (%) DEFMA
Piura	799 321	38 356	35.1 / 34.0	18.7 / 21.0	90 / 89	53 / 55
Sullana	311 454	16 864	35.1 / 34.5	19.3 / 21.7	86 / 85	47 / 50

4.2.3. Efecto de las olas de calor en la mortalidad en días posteriores

De acuerdo a los resultados obtenidos en la sección anterior analizando las provincias de Piura y Sullana en el departamento de Piura, el análisis del efecto de las olas de calor en la salud en días posteriores tras haber ocurrido el evento fue evaluado utilizando sus respectivos criterios de olas de calor con una influencia en la salud confirmada.

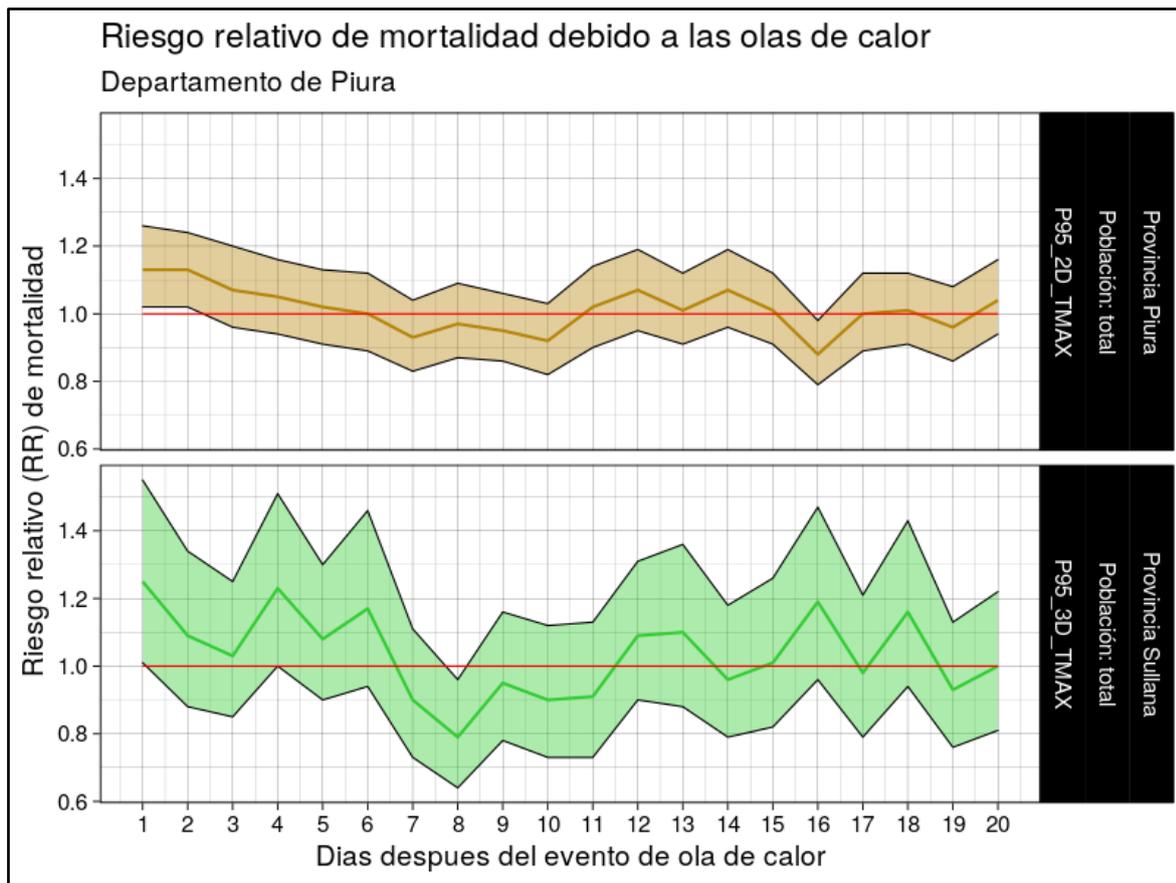


Figura 11: Riesgo relativo de mortalidad por ola de calor con desfase de tiempo desde 1 a 20 días, provincia de Piura, departamento Piura. El área sombreada representa el intervalo de confianza y la línea gruesa representa el valor de RR.

La Figura 11 muestra el efecto de las olas de calor sobre el riesgo de mortalidad de uno a 20 días después de la ocurrencia del evento de calor. La evaluación se realizó seleccionando los criterios para categorizar las olas de calor que muestran una fuerte señal de riesgo de mortalidad ($RR > 1$) en cada área de estudio, para toda la población.

En Piura, una ola de calor se categorizó como el período de al menos dos días en que la temperatura máxima del día supera el umbral del percentil 95 del día (P95_2D/TMAX). Según este índice, el efecto sobre la salud de las olas de calor dura hasta dos días después de que finaliza el evento de calor. En Sullana, una ola de calor se definió como el período de al menos tres días cuando la temperatura máxima del día excede el umbral del percentil 95 (P95_3D/TMAX), y en este caso el efecto de las olas de calor solo dura hasta un día después de que el evento ha terminado.

Estas diferencias en los resultados no son particularmente inusuales, ya que otros estudios informan un efecto ligeramente reducido de las olas de calor cuando se aplica un retraso a los días asociados (Hajat et al., 2006). También debe tenerse en cuenta que el efecto de las

olas de calor en la mortalidad y su durabilidad podría variar según el área de estudio debido a factores complejos e interactuantes que incluyen factores geográficos, ambientales, biológicos, médicos y socioeconómicos, así como la salud crónica preexistente (Ma et al., 2015; Gasparrini & Armstrong, 2011; Campbell et al., 2018). El área de estudio en Piura registró más defunciones que Sullana (Tabla 4), y registró valores levemente más bajos que Sullana. Sin embargo, Piura presenta valores de humedad más altos con respecto a Sullana. Por lo tanto, la combinación de características locales como temperatura y humedad en el aire en Piura podría producir un efecto más prolongado de olas de calor, resultando en una mayor frecuencia de muertes.

Por lo tanto, el criterio más adecuado para categorizar las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad para el departamento de Piura es el criterio P95_2D/TMAX, ya que la temperatura máxima del aire como métrica y el percentil 95 como umbral coinciden en las provincias analizadas, y el periodo mínimo de dos días sería el más adecuado ya que dicho tiempo es capaz de generar un efecto en el número de muertes. Dicho criterio se utilizará para continuar con el desarrollo del tercer objetivo específico, resultados mostrados en la siguiente sección.

4.3. Patrones sinópticos durante las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad

4.3.1 Patrones sinópticos obtenidos del SOM

Se obtienen seis patrones de anomalía estandarizada de la temperatura del aire sobre un área sinóptica que abarca parte del océano pacífico, atlántico y Sudamérica, Figura 12, dichos patrones ocurren durante las olas de calor asociadas a una influencia en el incremento de riesgo de muertes en la provincia de Piura utilizando el criterio P95_2D/TMAX, períodos de al menos dos días en que la temperatura máxima del día supera el umbral del percentil 95 del día, el criterio más adecuado para medir el efecto en la mortalidad sobre Piura.

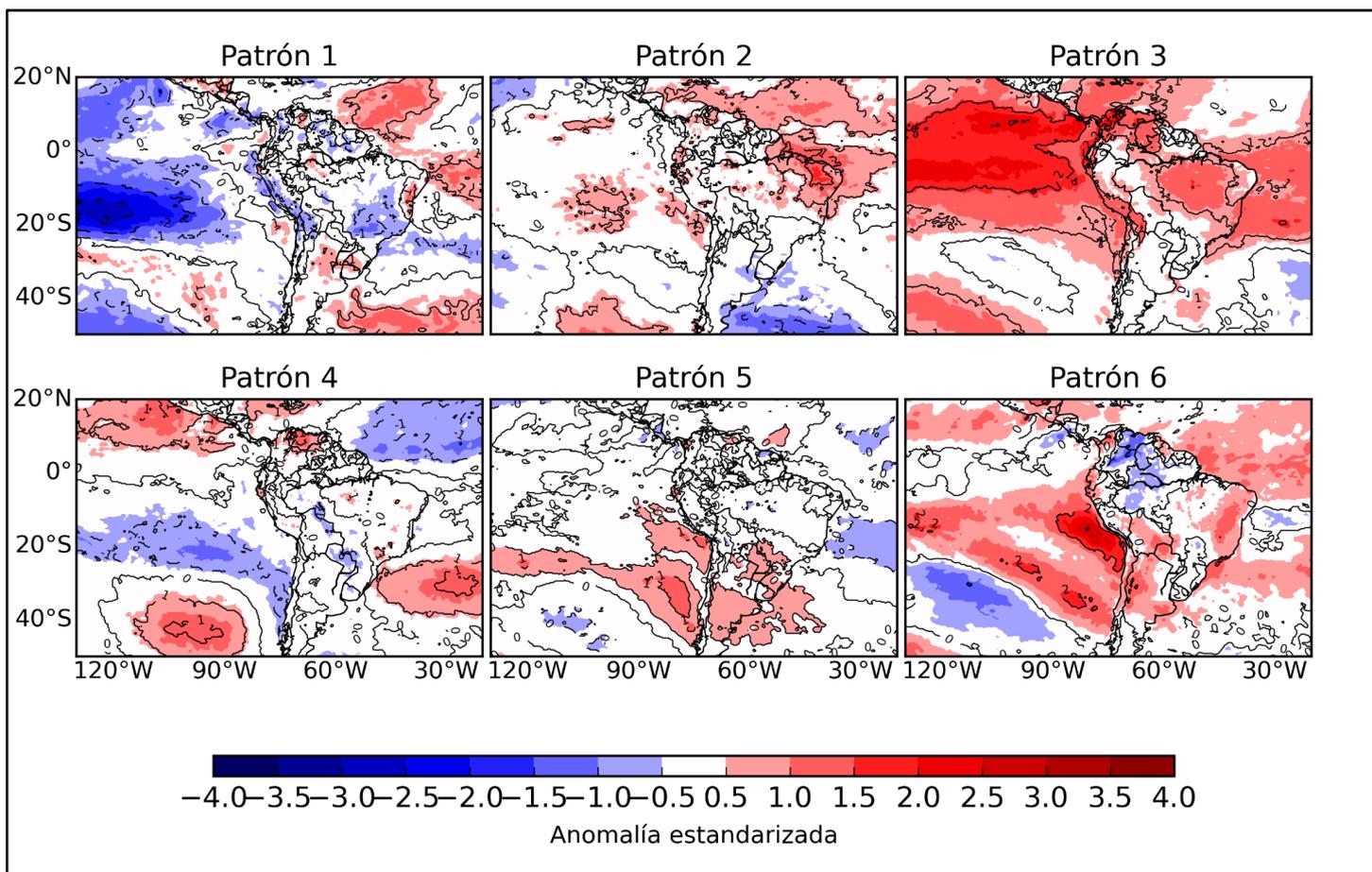


Figura 12: Patrones de anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m de la superficie durante olas de calor con influencia en la salud.

El primer punto a resaltar sobre los patrones obtenidos es que hay casos donde las olas de calor en la provincia de Piura están asociadas a calentamientos de la temperatura del aire regionales a escala sinóptica como se puede observar en los patrones dos, tres y seis, otros casos donde el calentamiento es más focal como en los patrones uno, cuatro y cinco. De esta observación se va infiriendo que hay una variedad en las configuraciones sinópticas de cómo se generan estas olas de calor con un efecto en la salud humana al incrementar el riesgo de mortalidad.

El orden de los patrones al estar organizados en una matriz de dos filas con tres columnas, como se la muestra en la Figura 12 indica que existen una mayor similitud entre los patrones vecinos, lo cual es una propiedad al generar los patrones con la técnica SOM (Hewitson & Crane, 2002). Además, los resultados obtenidos de los patrones de anomalía utilizando la información de reanálisis ERA 5 respalda los datos de la estación meteorológica San Miguel en Piura que se utilizaron para hacer el filtro de eventos de olas de calor, ya que ambas fuentes de información indican un calentamiento anormal sobre

Piura.

El patrón uno muestra un calentamiento anormal y local sobre Piura, mientras ocurre un enfriamiento ligero y generalizado sobre la costa peruana, y un enfriamiento más intenso sobre el Pacífico occidental a 20°S 130°W aproximadamente, además se observa una masa cálida de aire sobre el océano Atlántico occidental norte. En el patrón dos se muestra un calentamiento anormal que abarca la costa norte peruana y parte de Ecuador asimismo ocurre un calentamiento generalizado sobre las costas de Brasil y parte del océano Atlántico principalmente en la parte norte y centro occidental de este. En el patrón tres se observa un calentamiento general a gran escala donde abarca la costa de Perú, considerables extensiones de países sudamericanos, parte de los océanos Pacífico y Atlántico, siendo más intenso el calentamiento sobre el pacífico Ecuatorial. En el patrón cuatro, el calentamiento es más local sobre la costa norte de Perú, asimismo se observa una masa de aire ligeramente cálida sobre el océano pacífico centro norte ecuatorial mientras que en el océano atlántico centro norte occidental se observa una masa de aire ligeramente fría. El patrón cinco muestra un calentamiento local en Piura y una masa de aire ligeramente cálida que se extiende sobre el océano Pacífico cerca de la costa peruana desde los 10°S hacia el sur. En el patrón seis el calentamiento del aire es general cubriendo gran parte de la costa peruana, parte del océano Pacífico occidental, gran parte de países ubicados al sur y este de Sudamérica y al centro norte del océano Atlántico siendo el calentamiento más intenso sobre el océano Pacífico oriental cerca de la costa centro y sur del Perú.

El orden de los patrones mostrados en la Figura 12, no necesariamente indica que el patrón uno es el más frecuente durante las olas de calor sino el orden se rige bajo una estructura de similitudes espaciales de las anomalías de temperatura. Además, el algoritmo del SOM nos indica cual es la frecuencia de cada patrón, Tabla 5. Se puede observar a mayor detalle la configuración de cada patrón en la sección de anexos.

Tabla 5: Frecuencias de los patrones de anomalía estandarizada de temperatura del aire

Numero de Patrón	Porcentaje de frecuencia (%)
1	9
2	15
3	22
4	27
5	17
6	9

De la información proveída por el SOM podemos indicar que los patrones de anomalías de temperaturas más frecuentes son los patrones tres, cuatro y cinco (Tabla 5) los cuales agrupándolos representan el 66% del total de eventos de olas de calor analizados. Siendo más similares entre sí los patrones cuatro y cinco a diferencia del patrón tres.

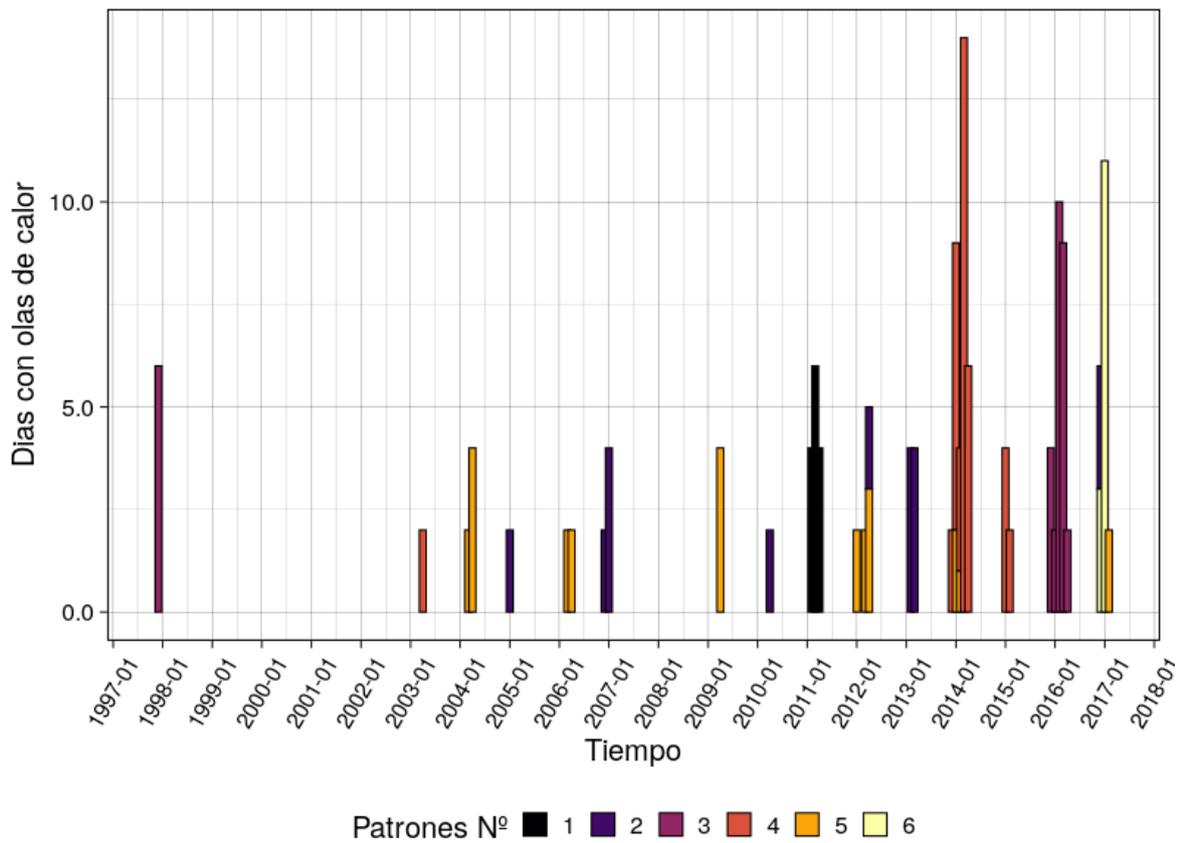


Figura 13: Las olas de calor en Piura y su respectivo patrón en el tiempo.

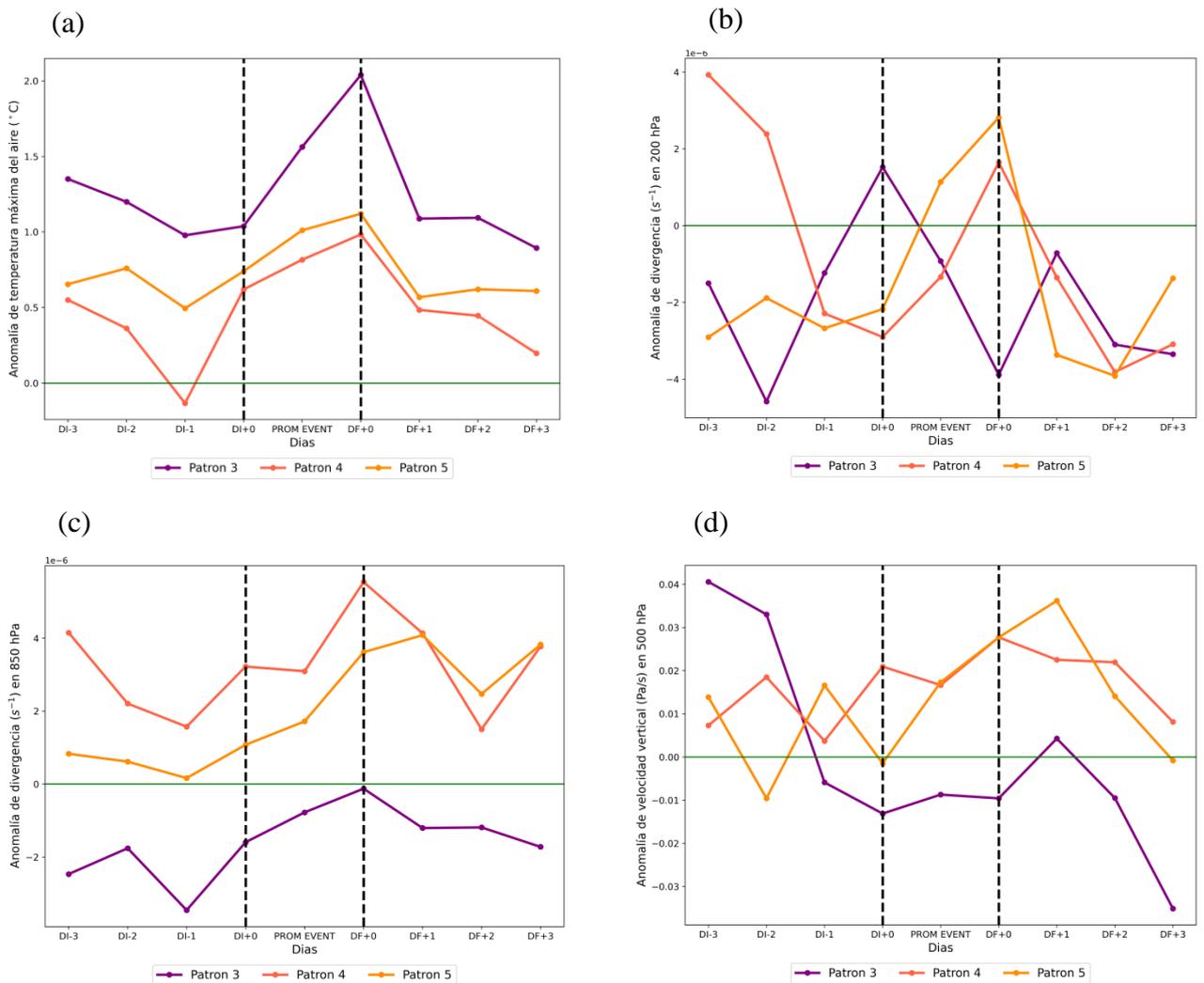
Una ola de calor presenta configuraciones propias del evento que varían en el tiempo, sin embargo, estas configuraciones guardan ciertas similitudes por las que son agrupadas en los seis patrones obtenidos con enfoque en Piura.

Si quisiéramos analizar cuál ha sido la ocurrencia de los patrones de la anomalía de temperaturas del aire en el tiempo podemos ver la Figura 13, en donde se asignan los eventos de olas de calor sobre Piura a su respectivo patrón, lo cual es una propiedad de la técnica SOM.

De esta figura se puede determinar que los patrones tres, cuatro y cinco son los que más se repiten en el tiempo. Se observa que el patrón tres ocurre durante diciembre de 1997 y el verano del 2016, lo cual podría estar relacionado a eventos del Fenómeno el Niño global, puesto que presenta un incremento de la temperatura del aire general a escala sinóptica (Figura 12). Además, los patrones cinco, cuatro y dos son más recurrentes en el tiempo pudiendo suceder en dos temporadas cálidas seguidas. Por otra parte, la ocurrencia de las olas de calor asignadas a una configuración propia del patrón uno solamente ha ocurrido en el periodo cálido del 2011.

4.3.2. Evolución en el tiempo de las características sinópticas de los patrones más frecuentes de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad

En la presente sección, se analiza cuáles son las características de las variables meteorológicas asociadas a un evento de ola de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad cuando este evoluciona en el tiempo y en el espacio sobre Piura. Debido a ello, se muestra el comportamiento medio de las variables desde tres días antes hasta tres días después del evento de ola de calor para los tres patrones más frecuentes.



Continuación...

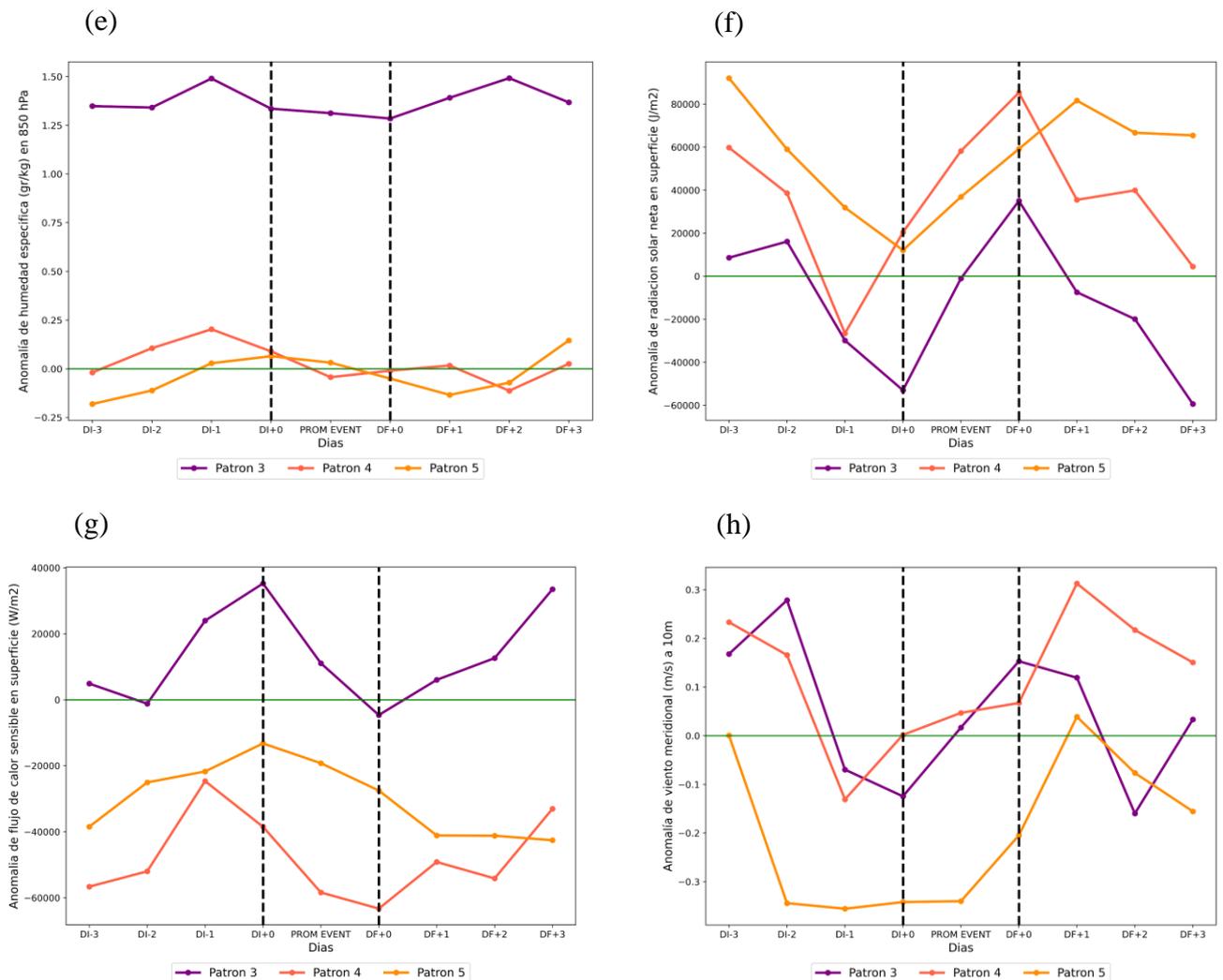


Figura 14: Evolución media de la anomalía de la (a) temperatura máxima del aire, (b) divergencia en 200 hPa, (c) divergencia en 850 hPa, (d) velocidad vertical en 500 hPa, (e) humedad específica en 850 hPa, (f) radiación solar neta en superficie, (g) flujo de calor sensible en superficie, (h) viento meridional a 10 m durante el periodo desde 3 días antes y 3 días después de los eventos de OC en Piura para los 3 patrones más frecuentes. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó y así sucesivamente. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Como se muestra en la Figura 14a, una anomalía positiva de la temperatura máxima del aire ocurre sobre Piura durante todo el periodo desde DI-3 a DF+3 para los patrones tres y cinco. El patrón tres se caracteriza por presentar desde días anteriores a la ocurrencia de la ola de calor anomalías positivas sobre Piura entre 1.4°C a 1°C, la cual va decreciendo conforme se acerca al inicio del evento. Respecto al patrón cuatro, la anomalía de temperatura sobre Piura es de 0.5°C tres días antes del evento y va decreciendo hasta un día antes del evento hasta tener un valor de - 0.1°C. Respecto al patrón cinco, la anomalía de temperatura sobre Piura presenta valores más estables días anteriores a la ocurrencia del

evento entre 0.7°C a 0.5°C . En los tres tipos de patrones se observa un incremento en la temperatura desde un día anterior al inicio de la ola de calor hasta alcanzar un máximo en el último día del evento siendo más prominente este incremento en los patrones tres y cuatro, posterior a ello se observa un rápido descenso para el día siguiente en los tres patrones y en los días siguientes la anomalía de temperatura se estabiliza. Estudios indican que un dramático incremento y descenso de las temperaturas durante los eventos de olas de calor sugieren que la ocurrencia de estos eventos está mayormente asociados a perturbaciones sinópticas (Chen & Lu, 2015; Hu et al., 2019), con lo cual se podría inferir que ello estaría ocurriendo en la mayoría de las olas de calor que se presentan sobre Piura.

La anomalía negativa de divergencia en 200 hPa indica si existe una convergencia o divergencia en la tropósfera alta sobre Piura, Figura 14b. Respecto a las características del patrón tres, este tipo de patrón presenta convergencia en altos niveles durante las olas de calor sobre Piura. Respecto al patrón cuatro, se observa la convergencia en altos niveles desde un día antes de que inicie el evento y durante las olas de calor. En el patrón cinco se observa que la convergencia sobre Piura empieza desde dos días antes de la ocurrencia de las olas de calor hasta el inicio de estas. Una divergencia en tropósfera baja indicada por anomalías positivas de divergencia en 850 hPa sobre Piura (Figura 14c) se puede observar en los patrones cuatro y cinco, incrementando esta convergencia desde un día antes y durante las olas de calor. En el patrón tres se observa una convergencia sobre Piura que disminuye en intensidad hacia el término del evento. La convergencia en niveles altos y divergencia en niveles bajos de la tropósfera sobre Piura en los patrones cuatro y cinco son coherentes con la presencia de una subsidencia de 0.02 (Pa/s) durante las olas de calor, la cual se observa mediante las anomalías positivas de velocidad vertical en 500 hPa, Figura 14d.

La subsidencia en la tropósfera durante las olas de calor influencia la disminución de la humedad en el ambiente, los cuales son propios de los patrones cuatro y cinco, observado a través de anomalías de humedad específica (gr/Kg) en 850 hPa, Figura 14e. Sin embargo, en el patrón tres al no presentar una subsidencia durante las olas de calor, las anomalías de humedad específicas permanecen positivas. A su vez, se sabe que la falta de humedad en la tierra y en la atmósfera también pueden ser factores importantes que contribuyen a condiciones prolongadas de las olas de calor. Por ello, la evaporación es un parámetro clave en el ciclo del agua atmosférica regional relacionado con las olas de calor (Min et al., 2019).

Además, la subsidencia genera una influencia en la radiación solar neta, la cual se observa en anomalías positivas de radiación solar neta (J/m^2) en superficie, Figura 14f. Lo cual se presenta durante las olas de calor sobre Piura en los patrones cuatro y cinco e incrementándose hacia el término de los eventos. En cuanto al patrón tres como se ha observado anteriormente la subsidencia no está presente y esto además se refleja en condiciones neutras en las anomalías de la radiación solar neta, sin embargo, sí muestra un incremento de las anomalías positivas hacia el término de los eventos, días posteriores a ello las anomalías positivas decrecen en los tres patrones.

La presencia de una mayor radiación solar neta en superficie indica una mayor temperatura del aire en superficie respecto a la temperatura del aire a dos metros de ella, por ello se genera un flujo positivo de calor sensible desde la superficie hacia el aire (Kwon et al., 2020; Hu et al., 2019), lo cual se ve reflejado en anomalías negativas del flujo de calor sensible en superficie (J/m^2), Figura 14g. Observado en Piura para los patrones cuatro y cinco durante las olas de calor. Respecto al patrón tres Piura presenta anomalías positivas lo cual indicaría que la temperatura del aire a dos metros de la superficie es mayor que en la temperatura del aire en superficie.

Las anomalías positivas de la temperatura cerca de la superficie acompañadas de una disminución de la precipitación y la humedad del suelo resultan en una fuerte transferencia de energía entre el suelo y la atmósfera, a través de un aumento (disminución) del flujo de calor sensible (latente) (Ito et al., 2013; Sousa et al., 2020), lo cual podría estar ocurriendo en Piura cuando se presentan los tipos de patrones cuatro y cinco durante las olas de calor.

Adicionalmente, las olas de calor son en parte influenciadas por vientos meridionales del norte que podrían transportar masas de aire cálido de la región ecuatorial, dichos vientos del norte se pueden observar por las anomalías negativas de vientos meridionales (m/s) a diez metros de la superficie. Los tres patrones muestran anomalías negativas sobre Piura desde uno o dos días antes del primer día de las olas de calor, durante las olas de calor los patrones tres y cuatro muestran anomalías positivas a diferencia del patrón cinco, en donde persisten las anomalías negativas. Hacia el término de los eventos sobre Piura, los tres patrones muestran un incremento en las anomalías de vientos meridionales sin embargo el patrón cinco permanece con anomalías negativas, Figura 14h.

La mayoría de las características asociadas con los eventos de olas de calor en los patrones tres, cuatro y cinco muestran una señal un día antes y durante el evento, culminado el

evento presentan una transición rápida a condiciones de días anteriores al inicio del evento, lo que sugiere que la evolución de la ola de calor es asimétrica.

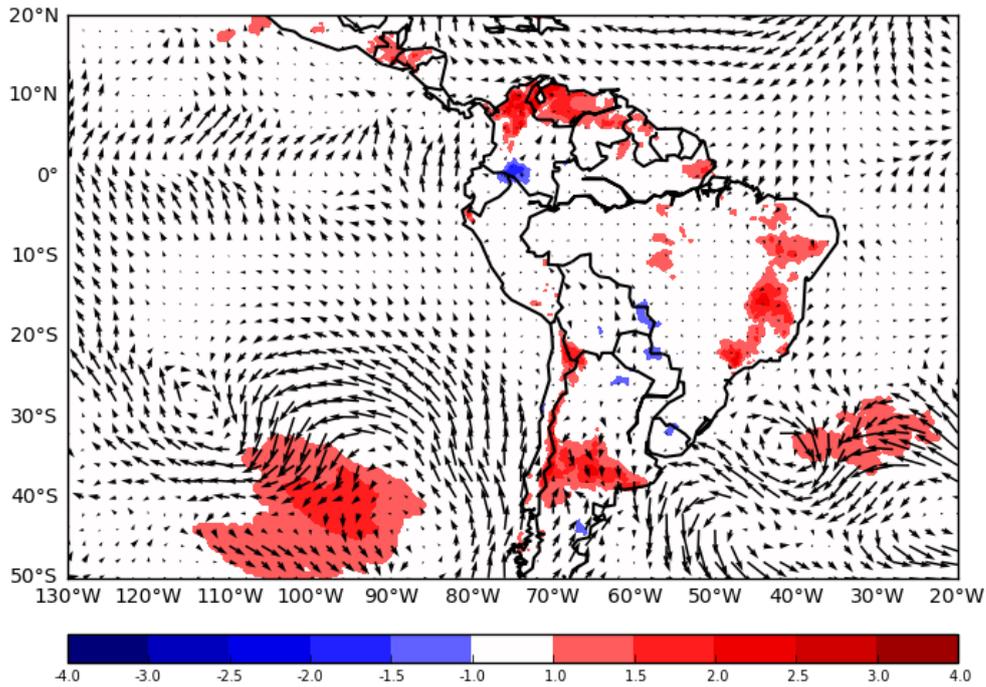
Los patrones cuatro y cinco muestran más similitudes entre sí en las características asociadas a los eventos de olas de calor con influencia en la salud, a diferencia del patrón tres que muestra un comportamiento distinto en la evolución de las olas de calor, Tabla 6. El análisis sobre las características sinópticas de los patrones tres, cuatro y cinco, se muestra en la siguiente sección.

Tabla 6: Resumen de características meteorológicas entre los patrones tres, cuatro y cinco.

Similitudes	Diferencias
En los tres patrones se observa un incremento en la temperatura desde un día anterior al inicio de la ola de calor hasta alcanzar un máximo en el último día.	Convergencia en niveles altos de la tropósfera al inicio de las olas de calor y divergencia al final de los eventos para los patrones cuatro y cinco, comportamiento contrario al patrón tres.
Subsidencia en niveles medios de la tropósfera en los patrones cuatro y cinco.	Divergencia en niveles bajos de la tropósfera durante las olas de calor para los patrones cuatro y cinco. Caso contrario al patrón tres.
Menor humedad en el ambiente durante las olas de calor en los patrones cuatro y cinco.	Los patrones cuatro y cinco presentan anomalías positivas de la radiación solar neta desde el inicio del evento. El patrón tres inicia los eventos con anomalías negativas.
Los tres patrones muestran un incremento de la radiación solar neta hacia el término de las olas de calor.	Una mayor temperatura del aire en superficie respecto a la temperatura del aire a dos metros de ella durante las olas de calor se observa en los patrones cuatro y cinco. Caso contrario en el patrón tres.
Los tres patrones presentan vientos del norte un día antes de las olas de calor.	A diferencia de los patrones tres y cuatro, el patrón cinco permanece con vientos del norte durante las olas de calor.

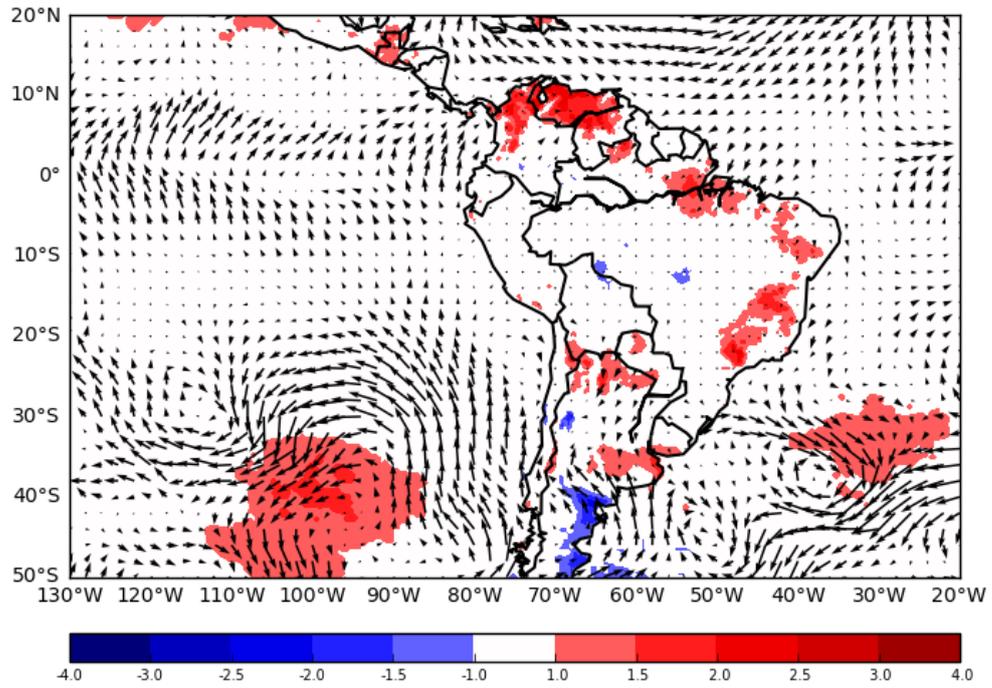
4.3.3. Evolución en el espacio de los patrones más frecuentes de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad

El análisis de la evolución de las condiciones sinópticas para los dos patrones más frecuentes durante las olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad sobre Piura (patrón cuatro y tres) se realizó en tres niveles geopotenciales, desde tres días antes hasta dos días después de las olas de calor.

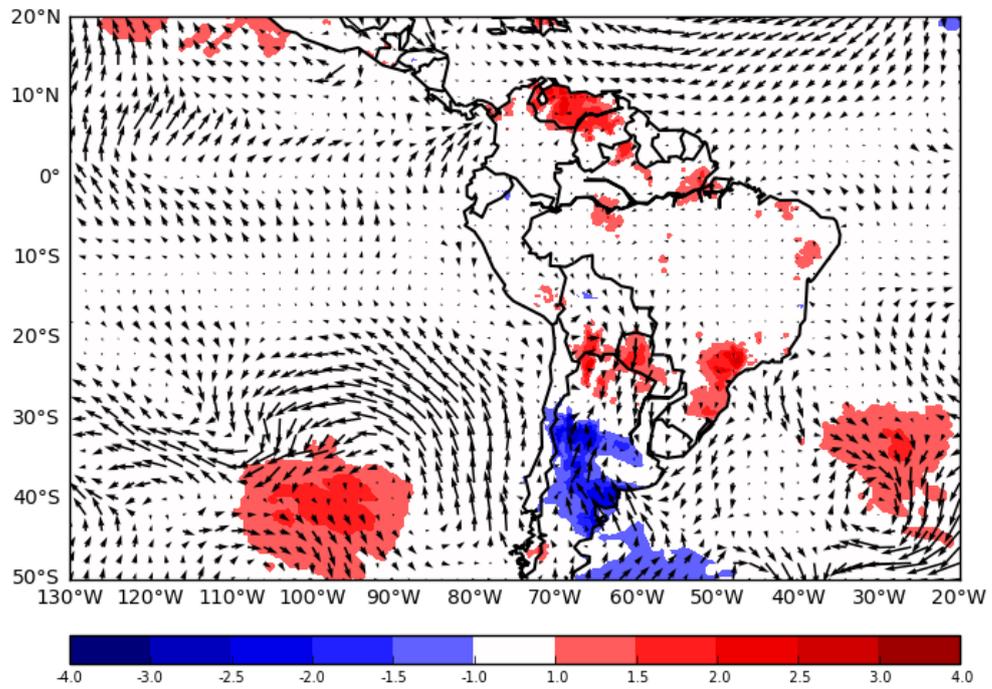


Patrón 4, DI - 3

Continuación...

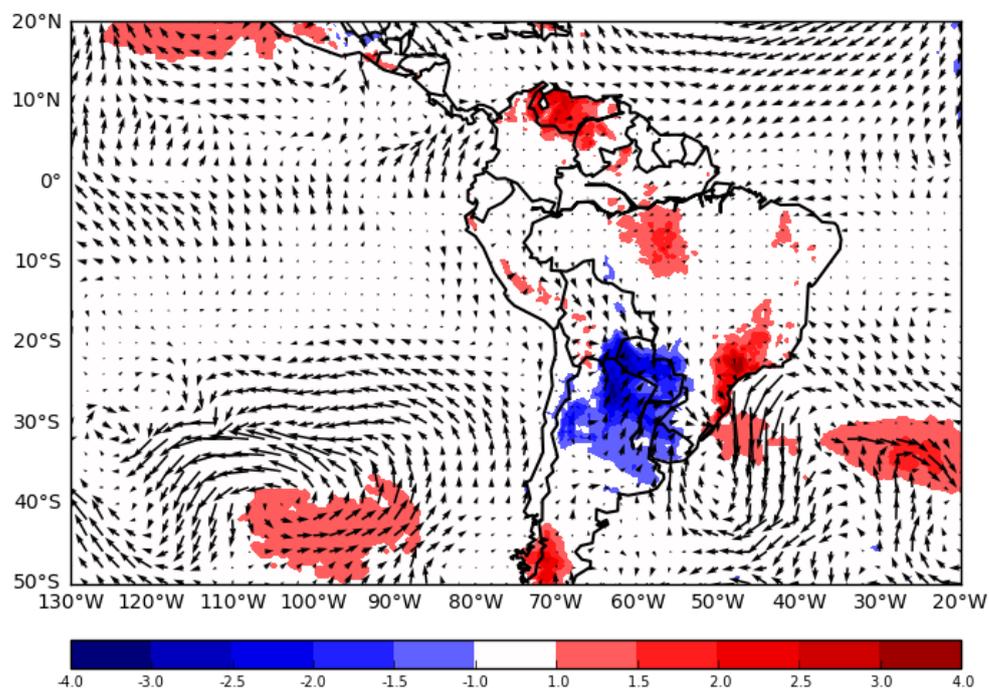


Patrón 4, DI - 2

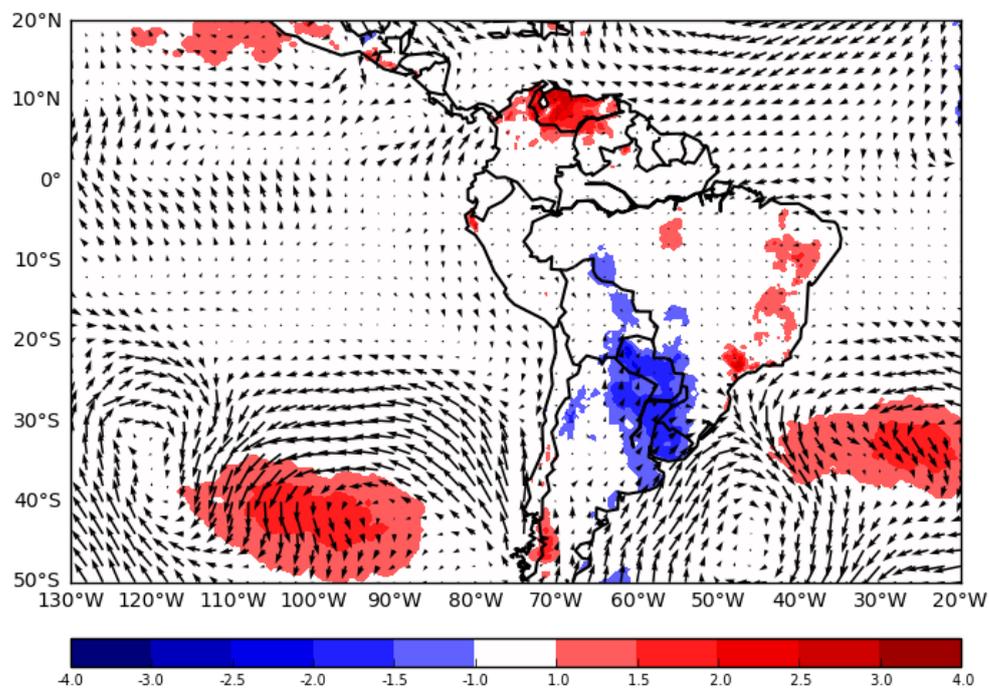


Patrón 4, DI - 1

Continuación...

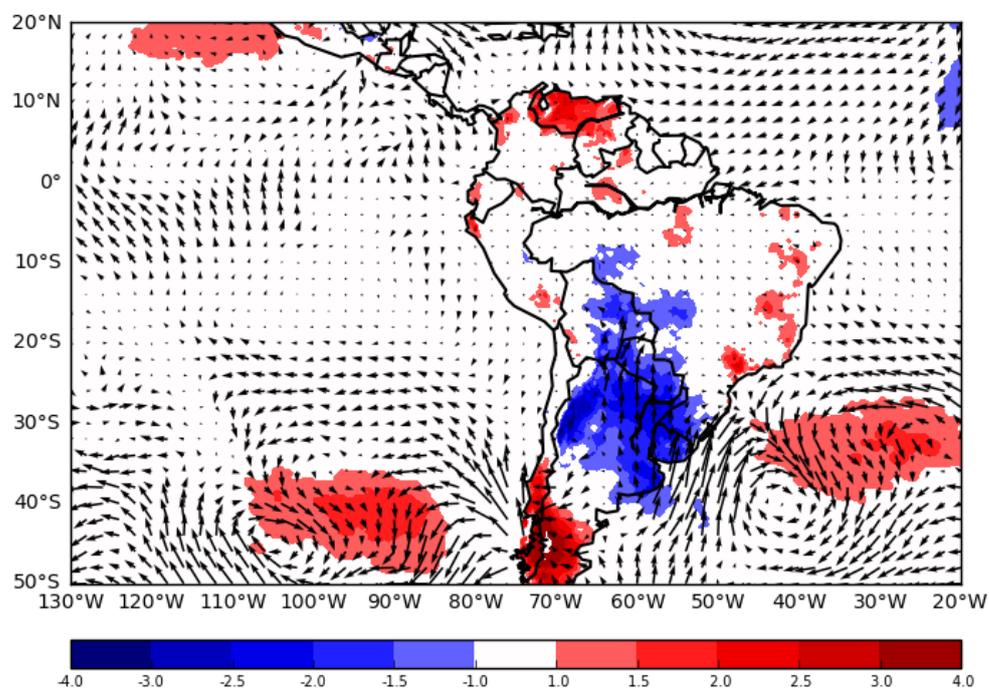


Patrón 4, DI + 0

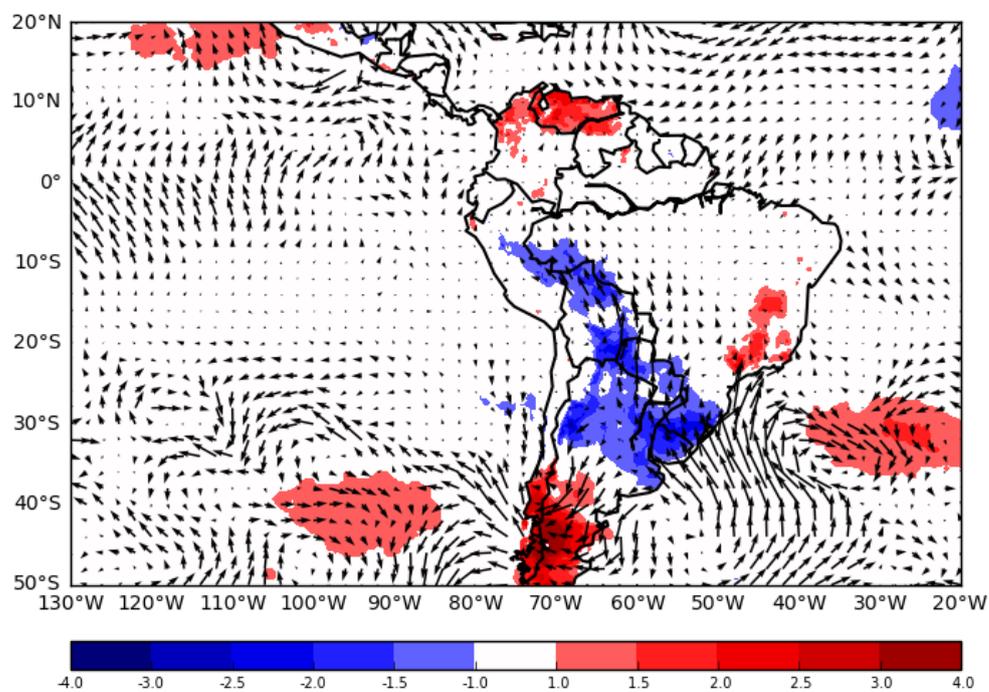


Patrón 4, PROM EVENT

Continuación...

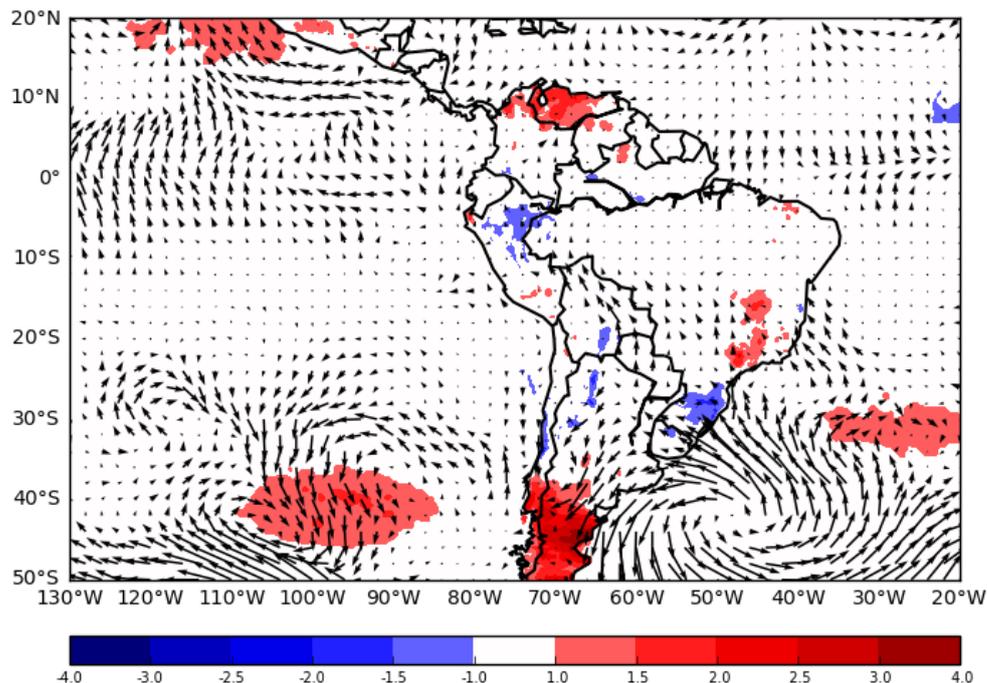


Patrón 4, DF + 0



Patrón 4, DF + 1

Continuación...



Patrón 4, DF + 2

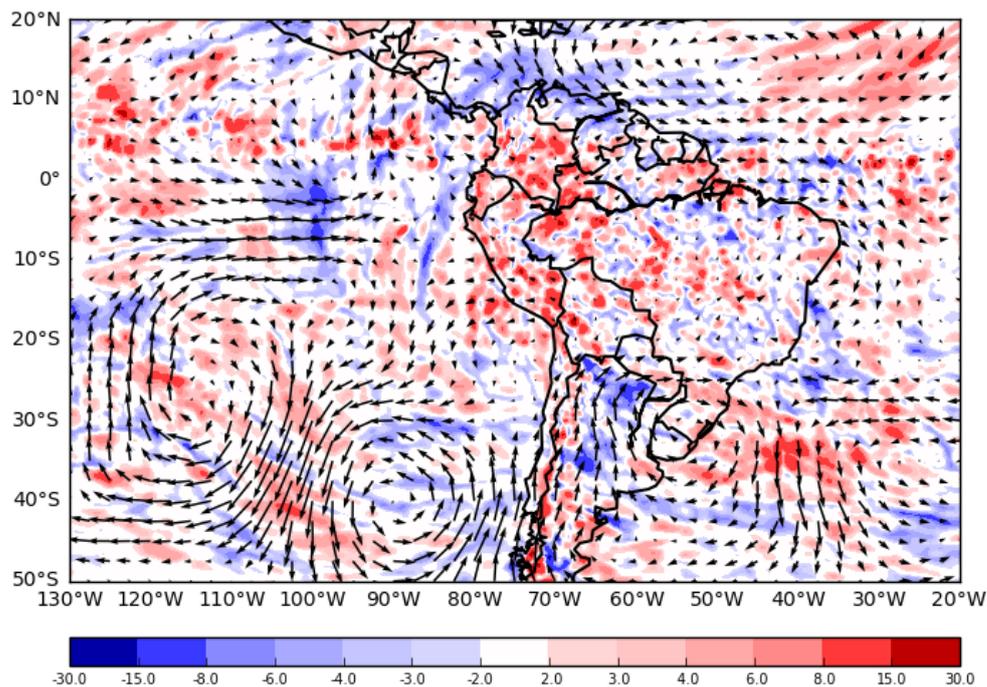
Figura 15: Mapas de la evolución media de la anomalía de la temperatura máxima del aire con vientos en superficie antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón más frecuente (patrón cuatro), se puede indicar que los días antes al inicio de los eventos de olas de calor los flujos de viento presentan una dirección proveniente desde sur en el pacífico oriental paralelo a las costas peruanas, sin embargo, progresivamente se acerca al inicio del evento el flujo de vientos en esta zona tiende a cambiar su dirección siendo provenientes del norte generando una difluencia horizontal sobre y paralelo a la costa norte de Perú, a su vez esta difluencia se mantiene durante la presencia del evento. Posterior a la culminación de las olas de calor los flujos de vientos tienden a volver a su estado inicial, provenientes del sur. Ver la secuencia de las anomalías de vientos en superficie en la Figura 15.

Con la anomalía de vientos sobre superficie se observa la intensificación de una configuración anticiclónica con un núcleo aproximadamente sobre las 40°S - 100°W días anteriores a la ocurrencia de las olas de calor en Piura, la cual es propia del Anticiclón del

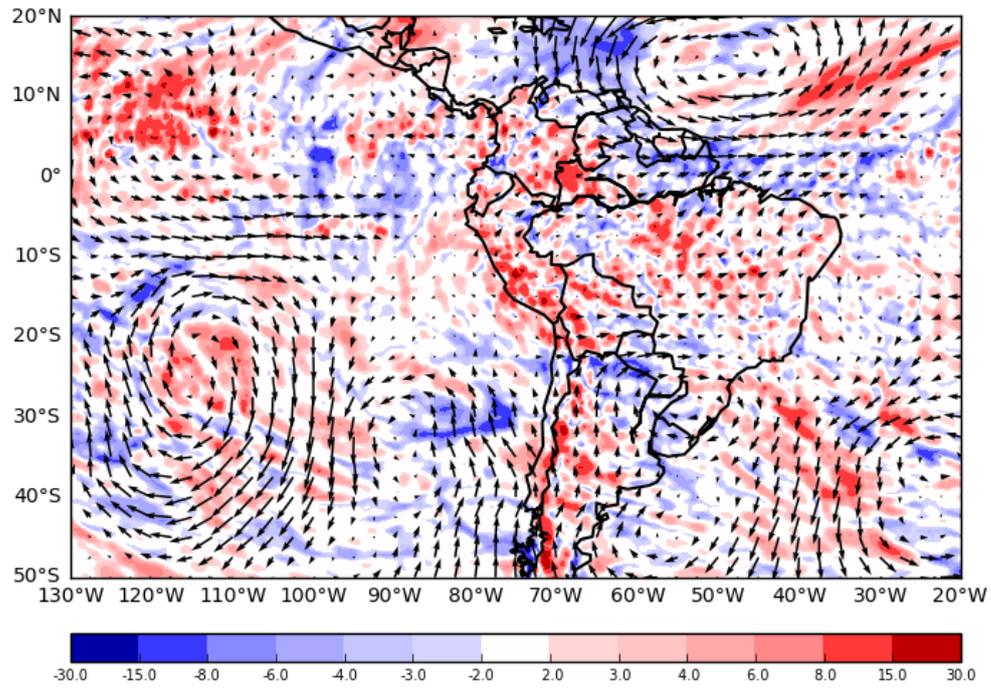
Pacífico Sur Oriental (centro de alta presión) sobre los meses del verano austral (Gilford et al., 1992), lo cual a su vez genera temperaturas del aire sobre lo normal en dicha zona. Al poseer el centro de altas presiones una configuración zonal este genera que los vientos tengan una dirección hacia el oeste paralela a los meridianos, entre las latitudes de 25° y 40°, lo cual influencia que los vientos del norte ingresen con mayor facilidad sobre latitudes menores paralelo a la costa peruana.

Se puede observar en el espacio, el incremento de temperaturas sobre la costa norte de Perú a través de las anomalías positivas de la temperatura máxima del aire en superficie, desde que se inicia el evento de ola de calor y se mantiene esas anomalías positivas hasta dos días tras haber culminado el evento, además el ultima día de la ola de calor abarca una mayor área sobre la costa norte peruana, Figura 15. Lo cual es coherente con lo mostrado en la Figura 14a. mostrando un mayor incremento de las temperaturas hacia el término del evento.

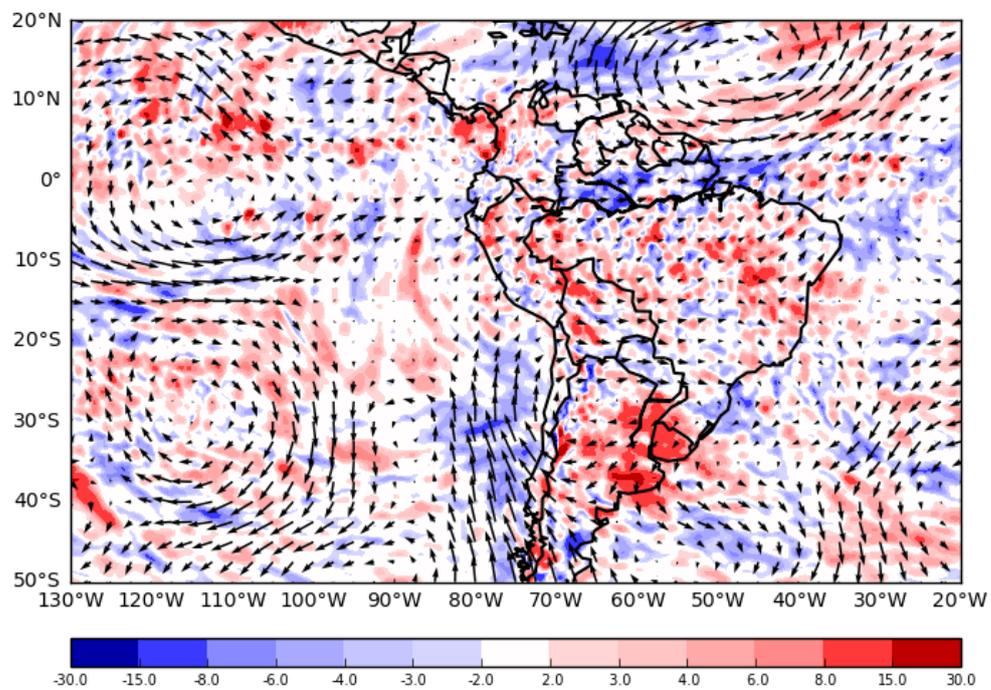


Patrón 4, DI – 3

Continuación...

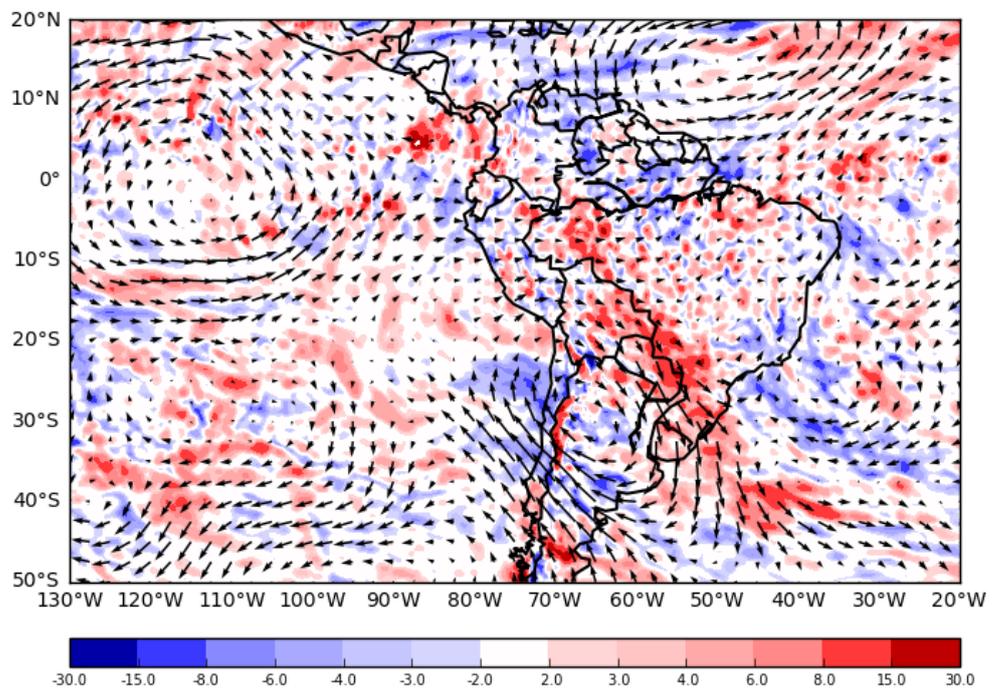


Patrón 4, DI - 2

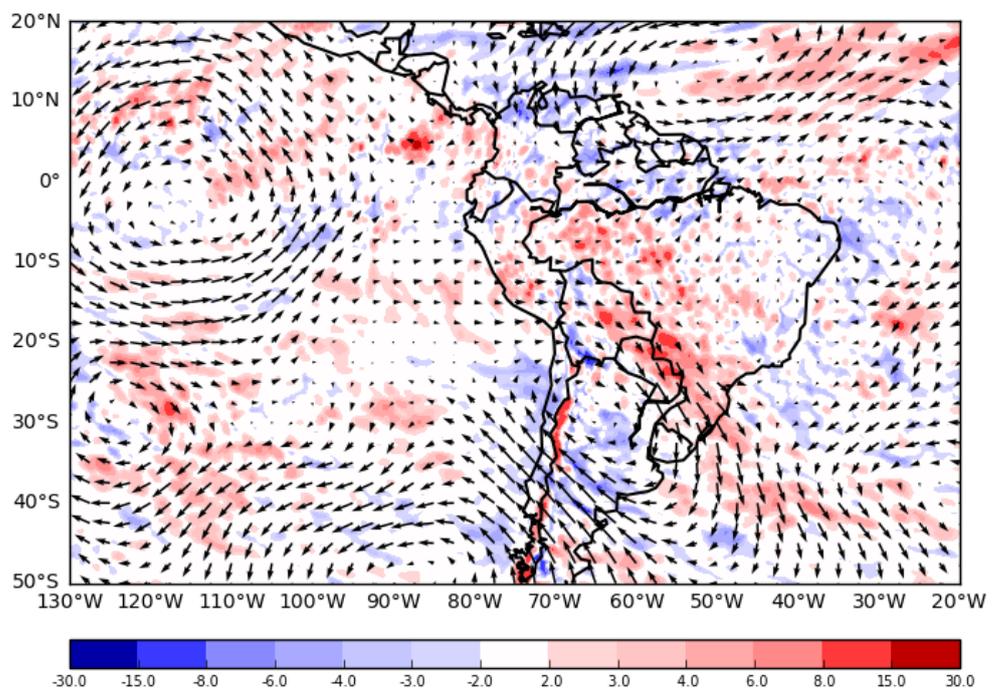


Patrón 4, DI - 1

Continuación...

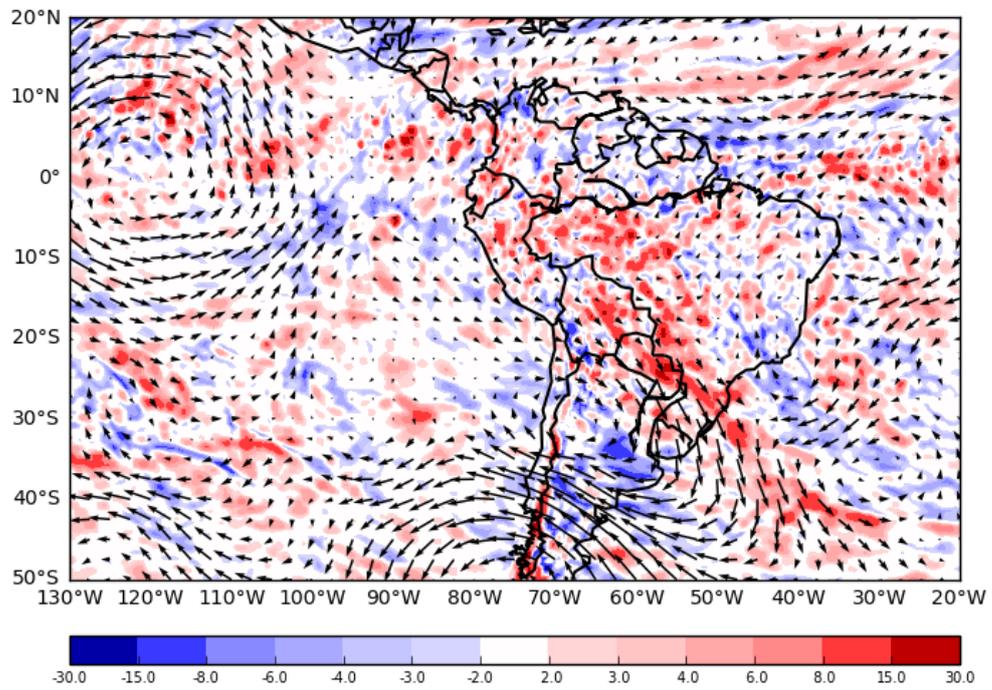


Patrón 4, DI + 0

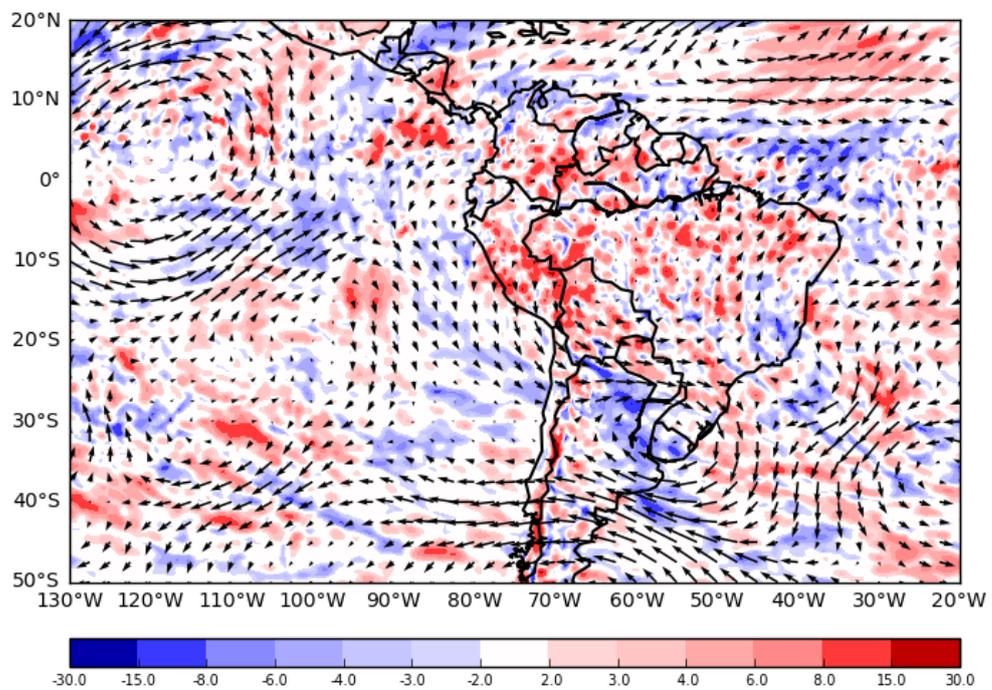


Patrón 4, PROM EVENT

Continuación...

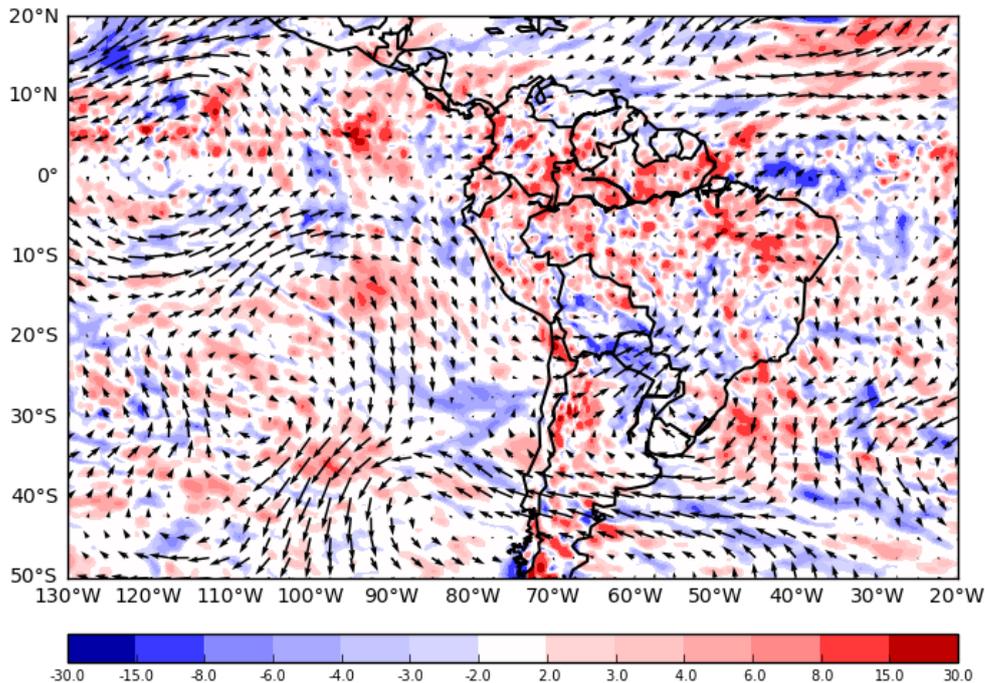


Patrón 4, DF + 0



Patrón 4, DF + 1

Continuación...



Patrón 4, DF + 2

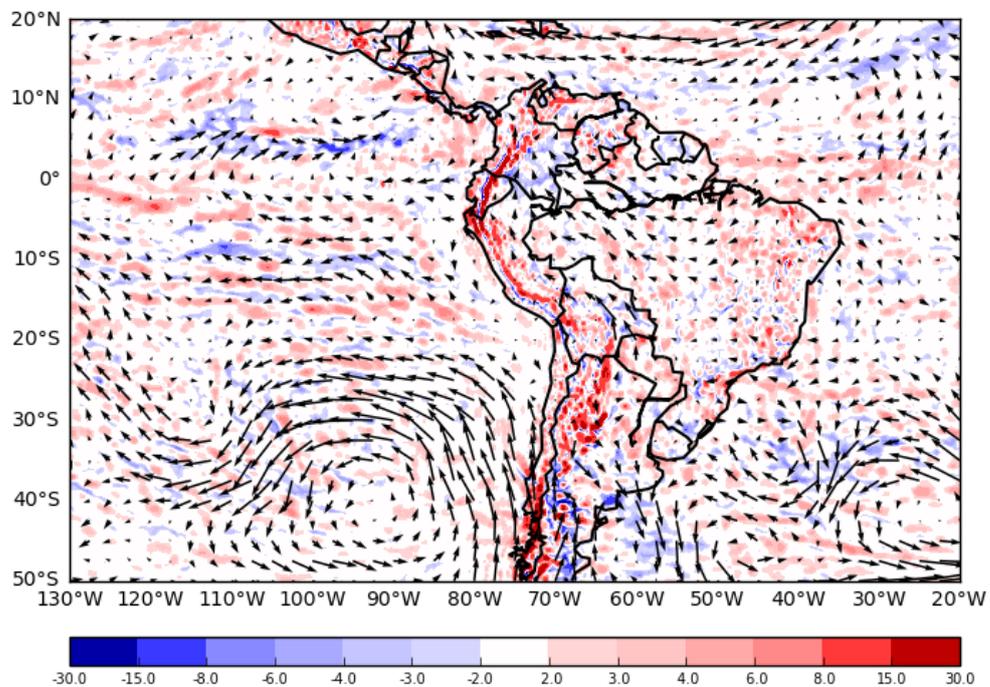
Figura 16: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 200 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón cuatro, se puede indicar que un día antes del inicio de las olas de calor se observa sobre la costa norte de Perú a 200 hPa un área de convergencia que se intensifica hacia el primer día de los eventos, sin embargo, esta manifestación no se mantiene en el transcurso del evento mostrando un comportamiento neutro en las anomalías de divergencia, ver Figura 16.

La conformación de un anticiclón en altos niveles sobre el pacífico central con un núcleo aproximadamente en 5°S-115°W genera un flujo de vientos hacia el este sobre la zona ecuatorial del pacifico oriental. Asimismo, se observa una configuración ciclónica en el hemisferio norte (circulación antihoraria) con un núcleo aproximadamente en 15°N - 50°W, que estaría influenciando en la generación de convergencia sobre su lado oeste y sur, la cual abarca parte del norte de Sudamérica. Al ejercer un flujo antihorario sobre dicha zona, a su vez estaría influenciando para que provengan vientos del noreste sobre el norte del

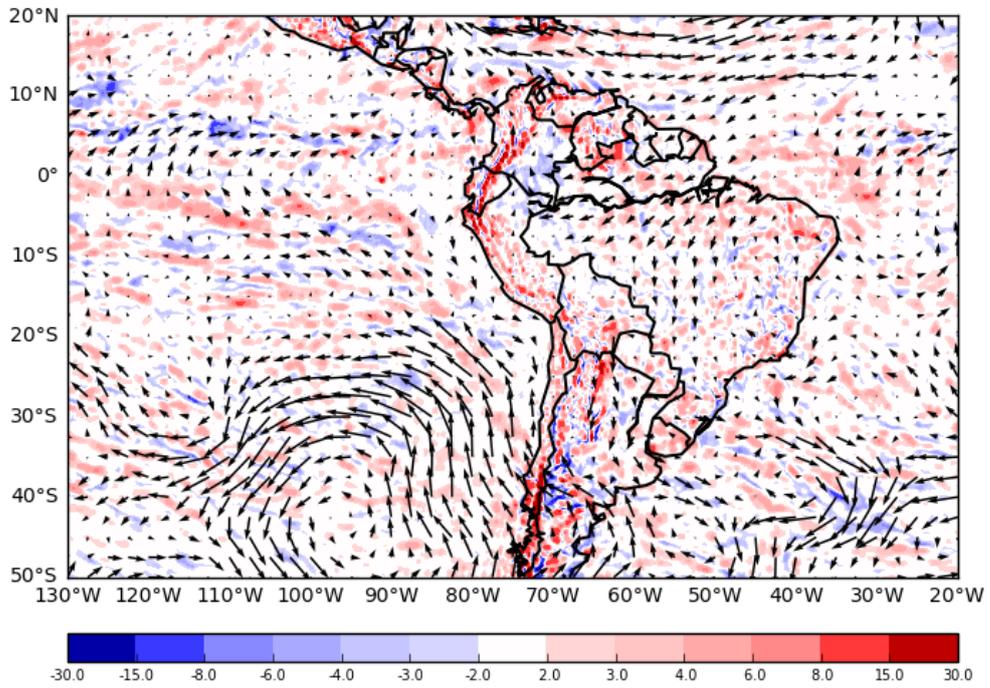
litoral peruano y sobre el litoral ecuatoriano, y sumado a los vientos del este anteriormente mencionados genera una confluencia de vientos sobre dicha zona, lo cual influye en la formación de convergencia sobre la costa norte del Perú en los primeros días de la ola de calor.

El comportamiento de las anomalías de divergencia a escala sinóptica en niveles altos de la tropósfera muestra una coherencia con lo indicado en la evolución temporal para la costa norte, Figura 14b. Señalando una convergencia en niveles altos sobre dicha área desde un día antes del inicio del evento intensificando en el primer día para posteriormente tender a condiciones neutrales.

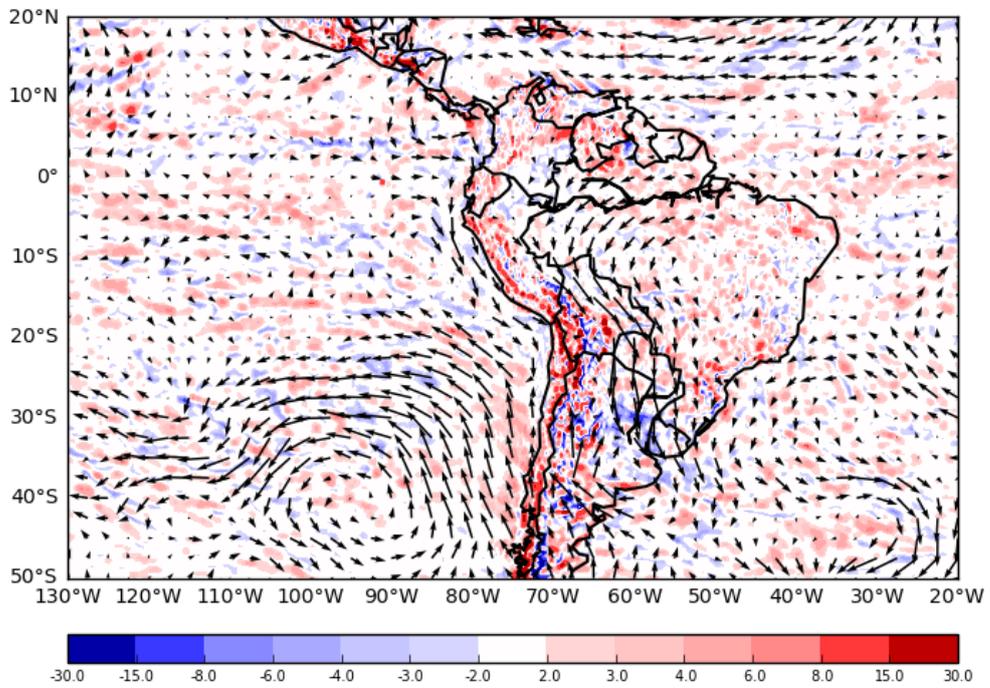


Patrón 4, DI - 3

Continuación...

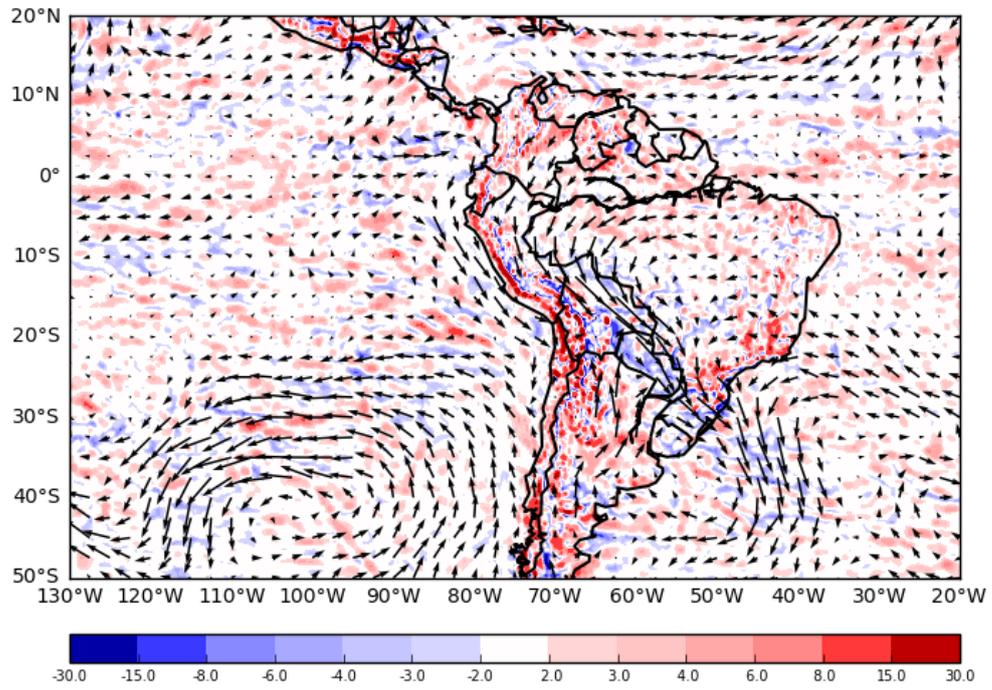


Patrón 4, DI - 2

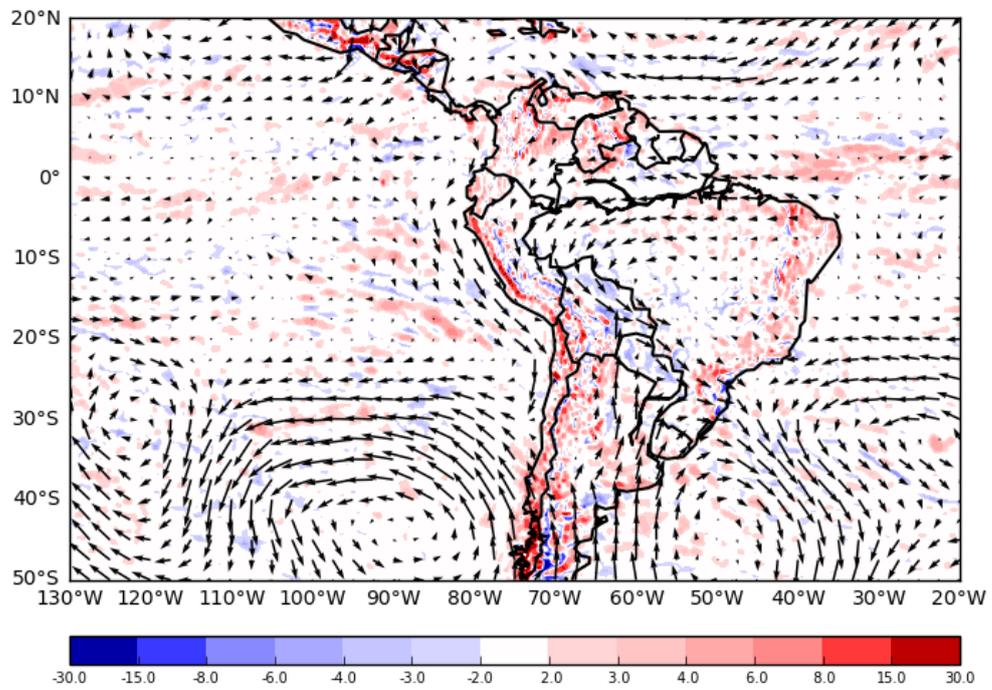


Patrón 4, DI - 1

Continuación...

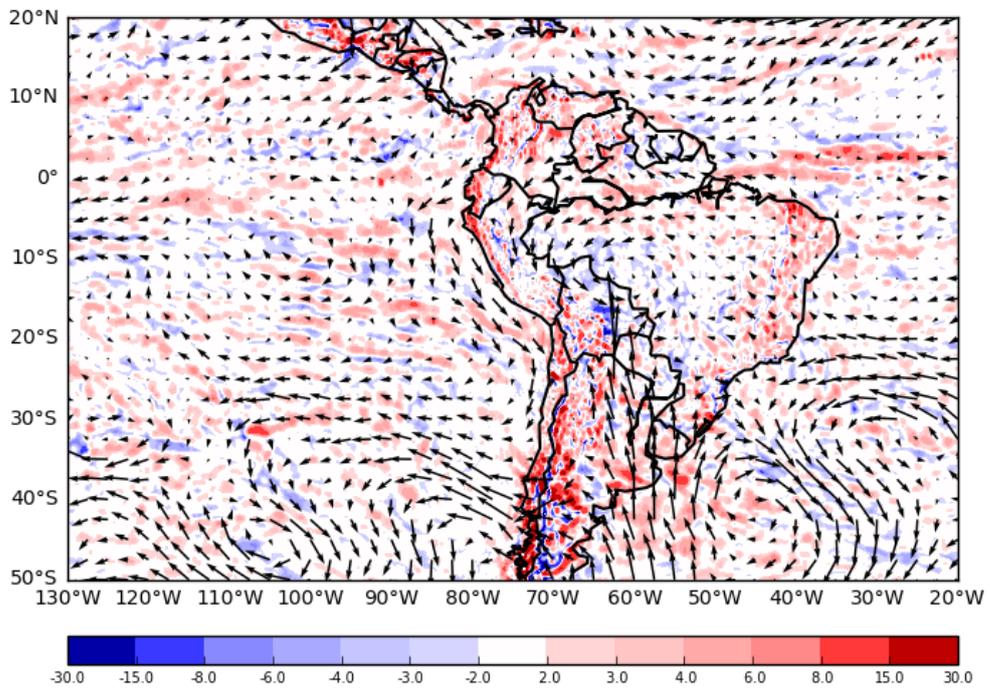


Patrón 4, DI + 0

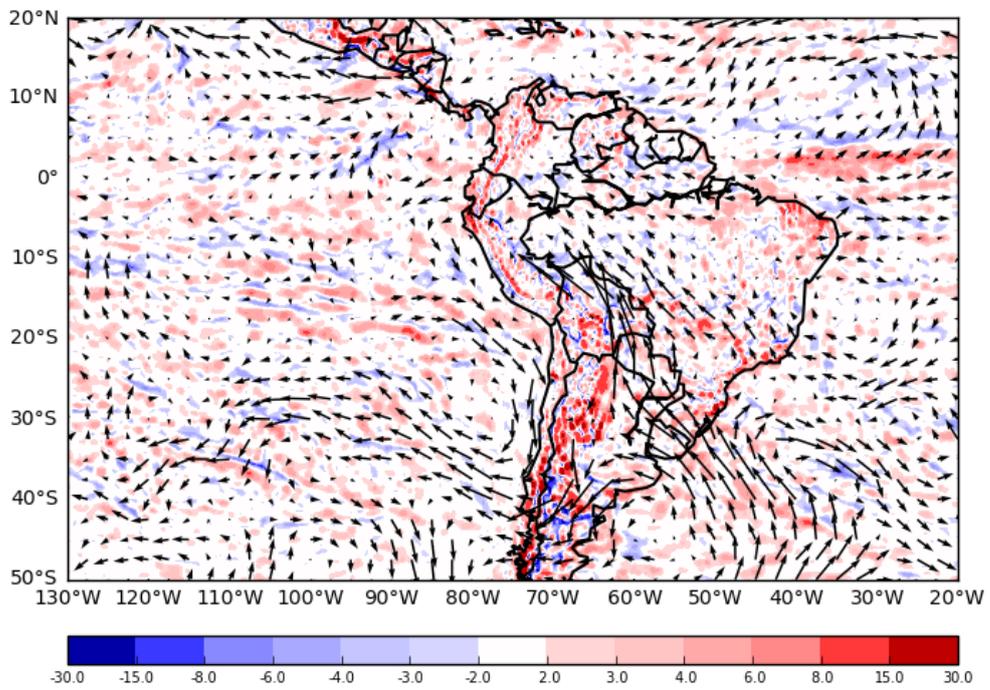


Patrón 4, PROM EVENT

Continuación...

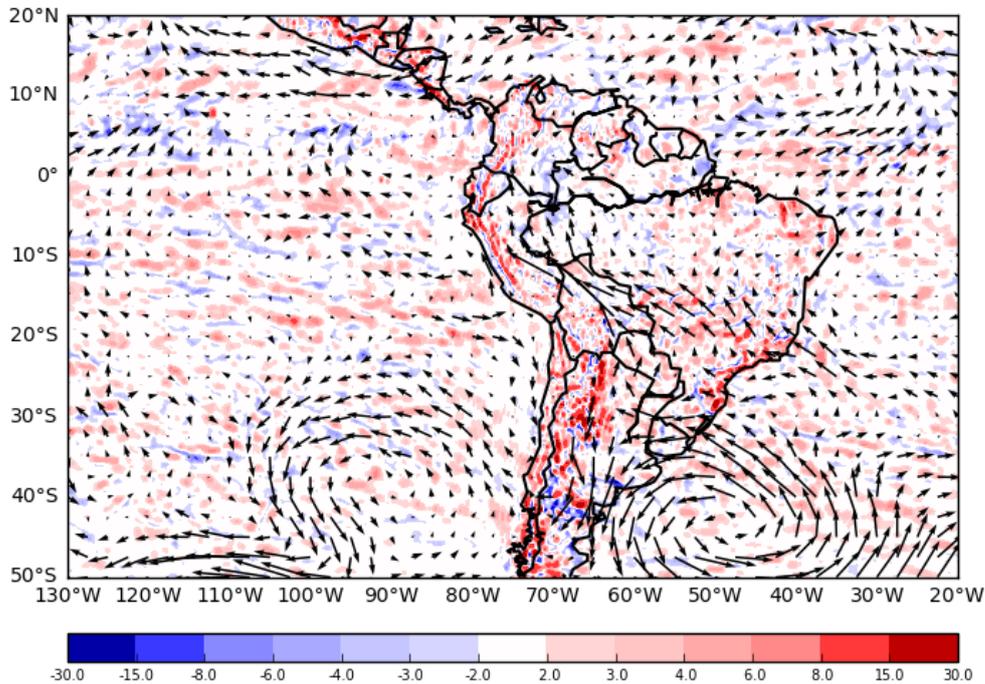


Patrón 4, DF + 0



Patrón 4, DF + 1

Continuación...



Patrón 4, DF + 2

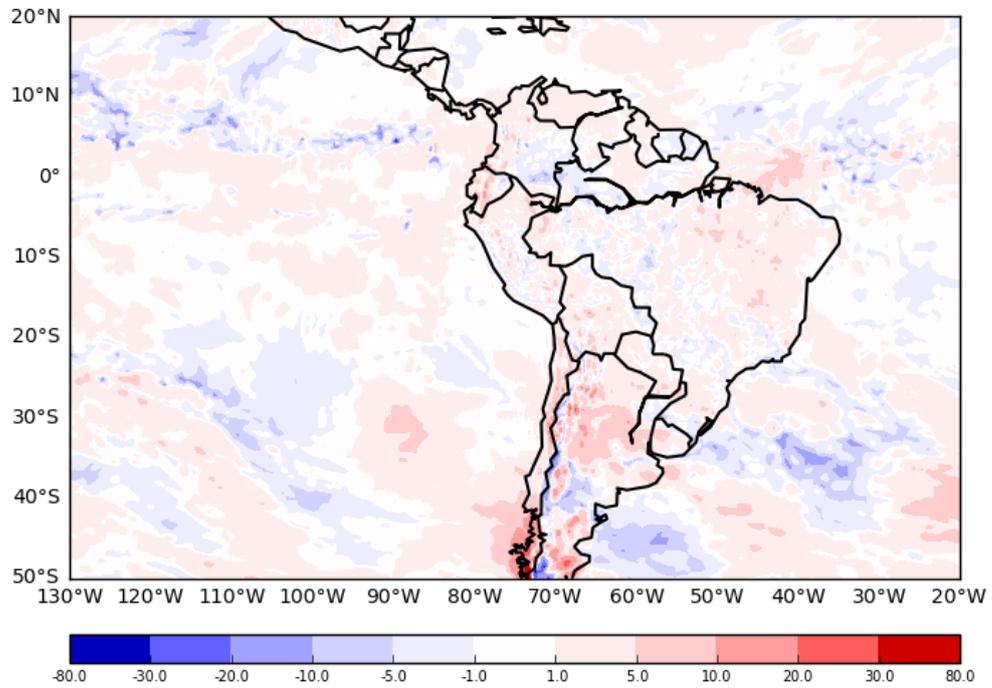
Figura 17: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 850 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón cuatro en 850 hPa, se puede indicar que las condiciones de divergencia se mantienen desde días atrás al inicio y durante las olas de calor sobre la costa norte de Perú, sin embargo, esta manifestación de anomalías positivas de divergencia no es intensa, ver Figura 17.

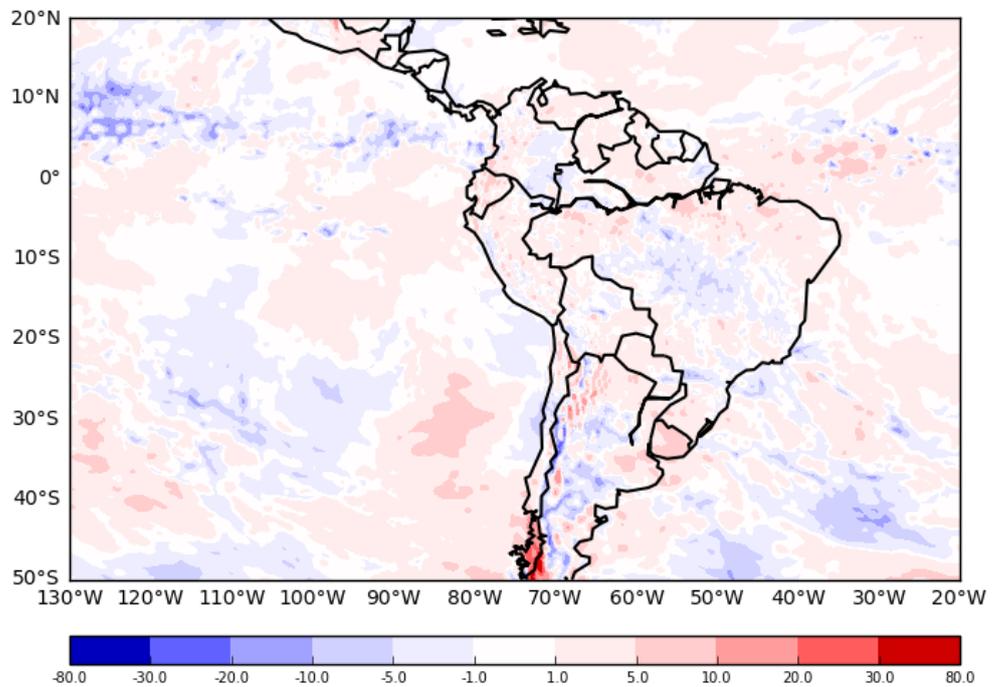
Hacia el inicio de las olas de calor y durante este se genera un flujo de vientos del norte sobre el litoral peruano. En parte generado por un anticiclón cercano a las costas de Perú, con un núcleo ubicado aproximadamente en 10°S y 85°W días anteriores a las olas de calor y debido a la presencia de una configuración anticiclónica (APSO) que tiene una estructura zonal y con un núcleo posicionado más hacia el sur, aproximadamente en 45°S - 90°W.

El comportamiento de las anomalías de divergencia a escala sinóptica en niveles bajo de la tropósfera muestra una coherencia con lo indicado en la evolución temporal para la costa

norte, Figura 14c. Señalando una divergencia sostenida en niveles bajos sobre Piura desde tres días antes del inicio del evento intensificando hacia el último día del evento.

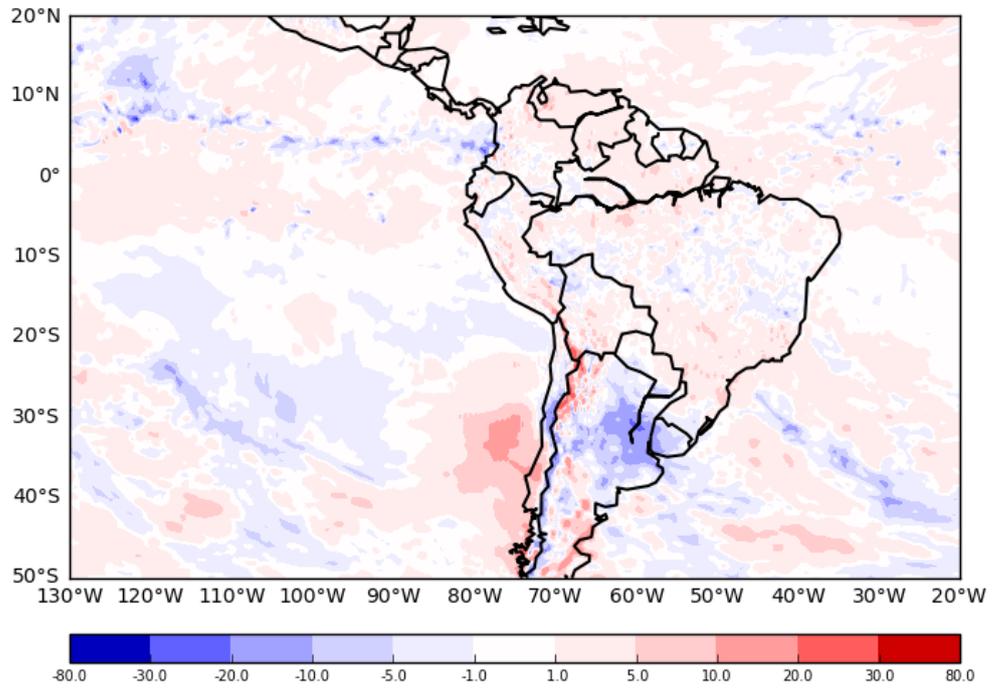


Patrón 4, DI - 3

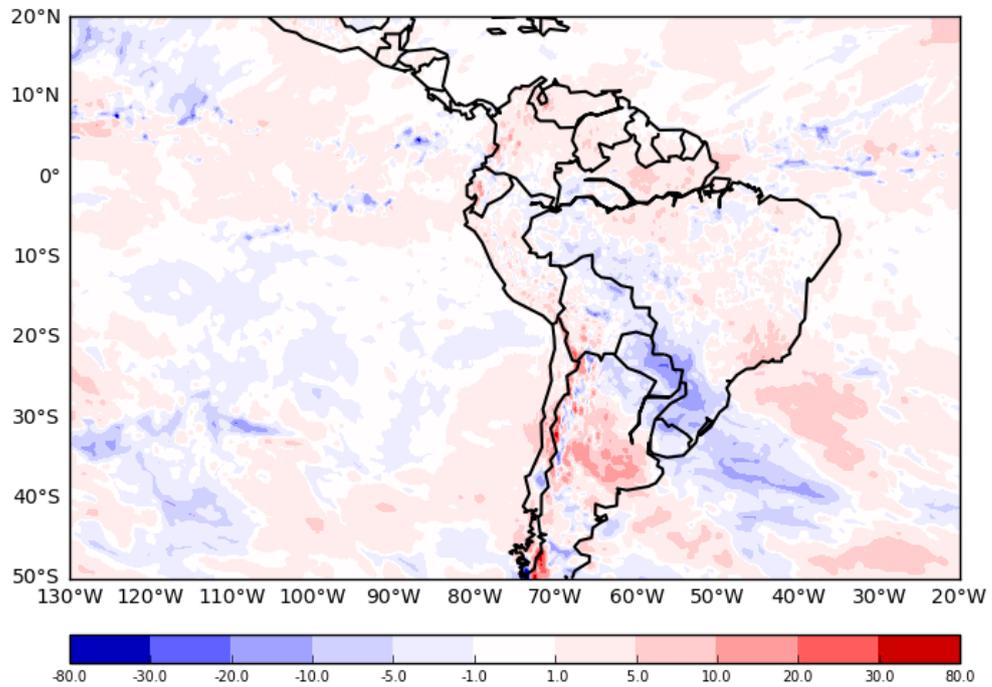


Patrón 4, DI - 2

Continuación...

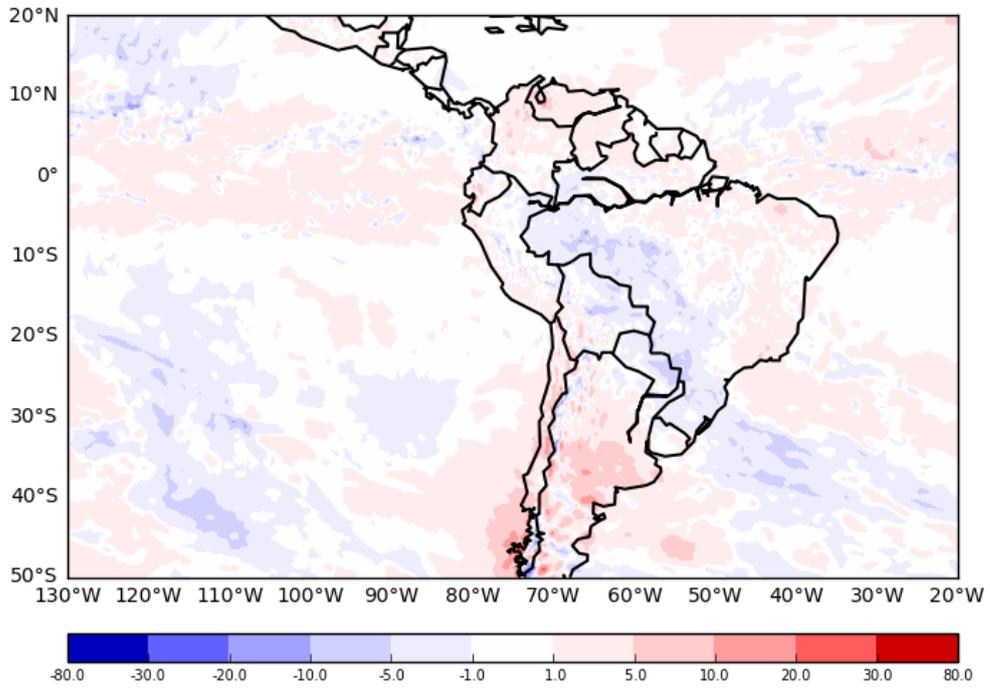


Patrón 4, DI - 1

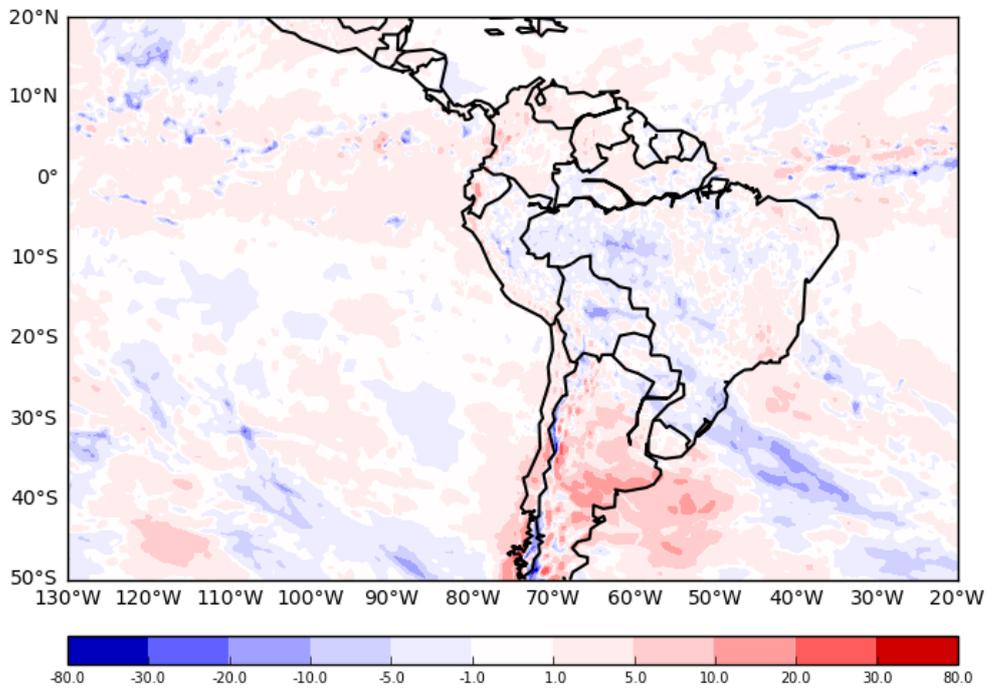


Patrón 4, DI + 0

Continuación...

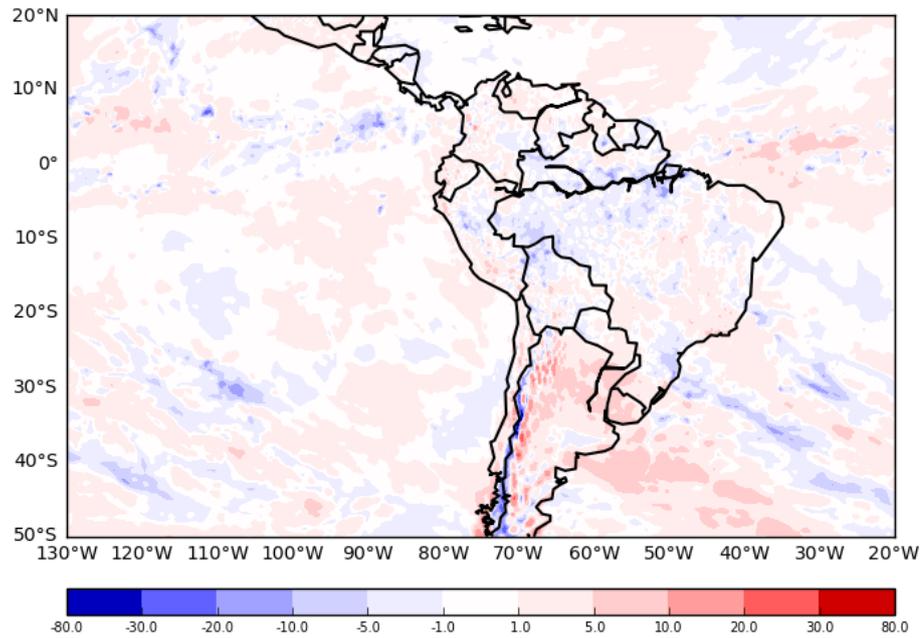


Patrón 4, PROM EVENT

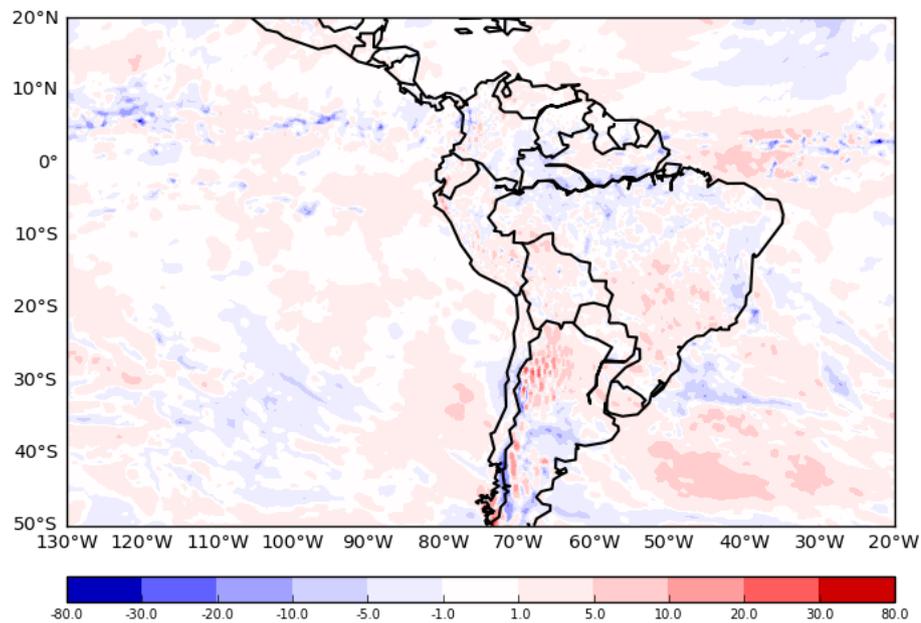


Patrón 4, DF + 0

Continuación...



Patrón 4, DF + 1

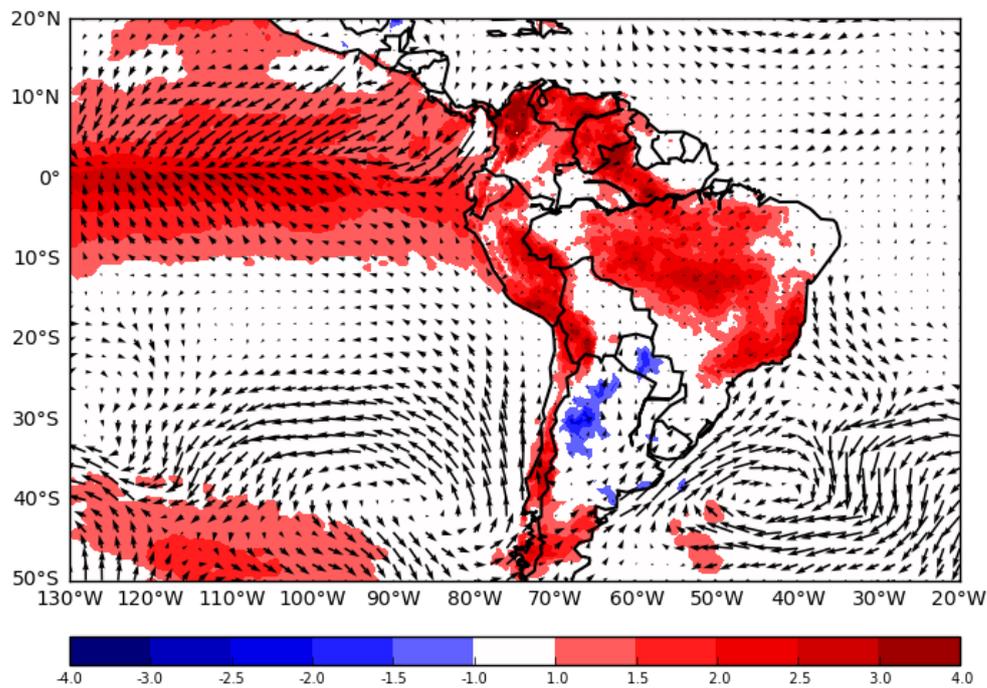


Patrón 4, DF + 2

Figura 18: Mapas de la evolución media de la anomalía de velocidad vertical a 500 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al cuarto patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

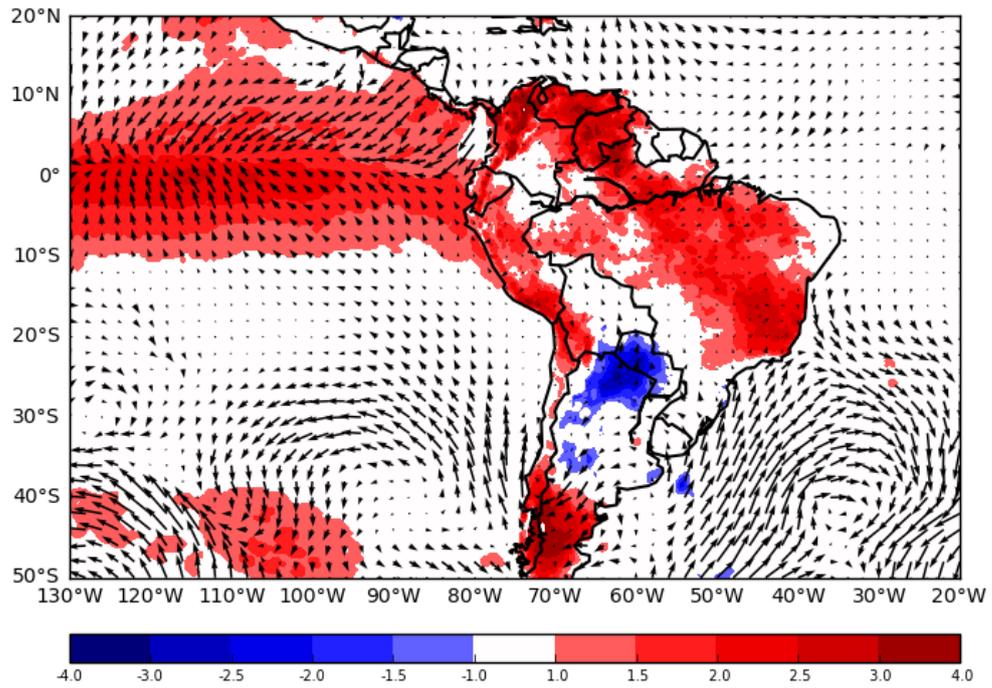
Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón cuatro en 500 hPa, las anomalías positivas de velocidad vertical sobre Piura se mantienen desde días atrás al inicio de las olas de calor y durante estos siendo ligeramente mayor en el último día de la ola de calor, Figura 18.

El flujo descendente sobre la costa de norte de Perú mostrado a través de la anomalía positiva en niveles medios de la tropósfera durante las olas de calor muestra una coherencia con lo indicado en la evolución temporal para la costa norte, Figura 14d. El flujo descendente (subsistencia) en niveles medios se corresponde con el flujo convergente en niveles altos de la tropósfera mostrado en la Figura 16 y con el flujo divergente en niveles bajo de la tropósfera mostrado en la Figura 17.

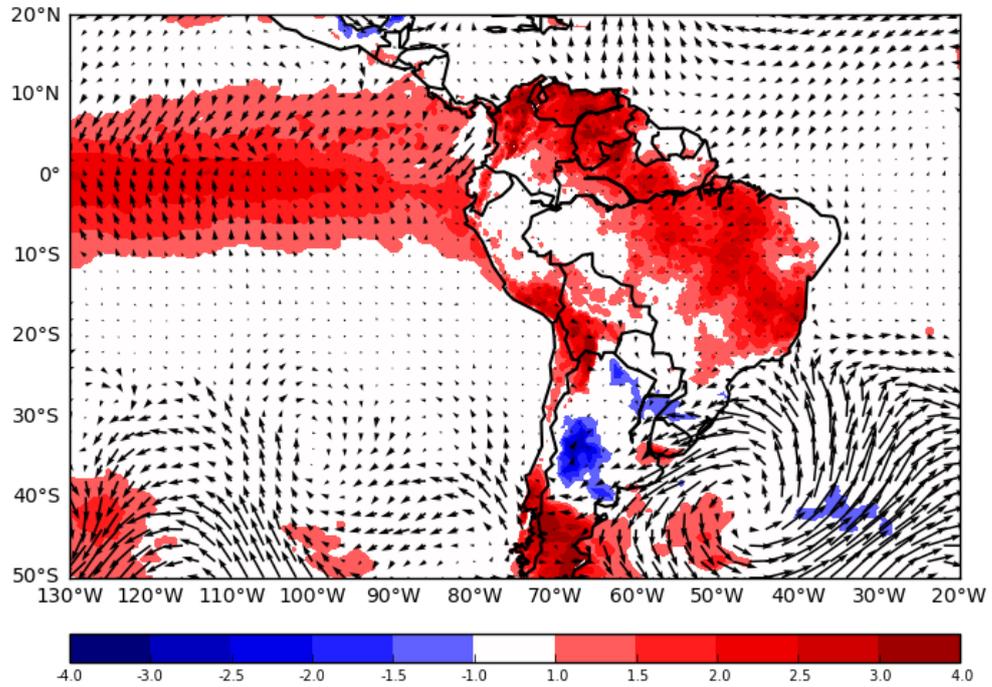


Patrón 3, DI – 3

Continuación...

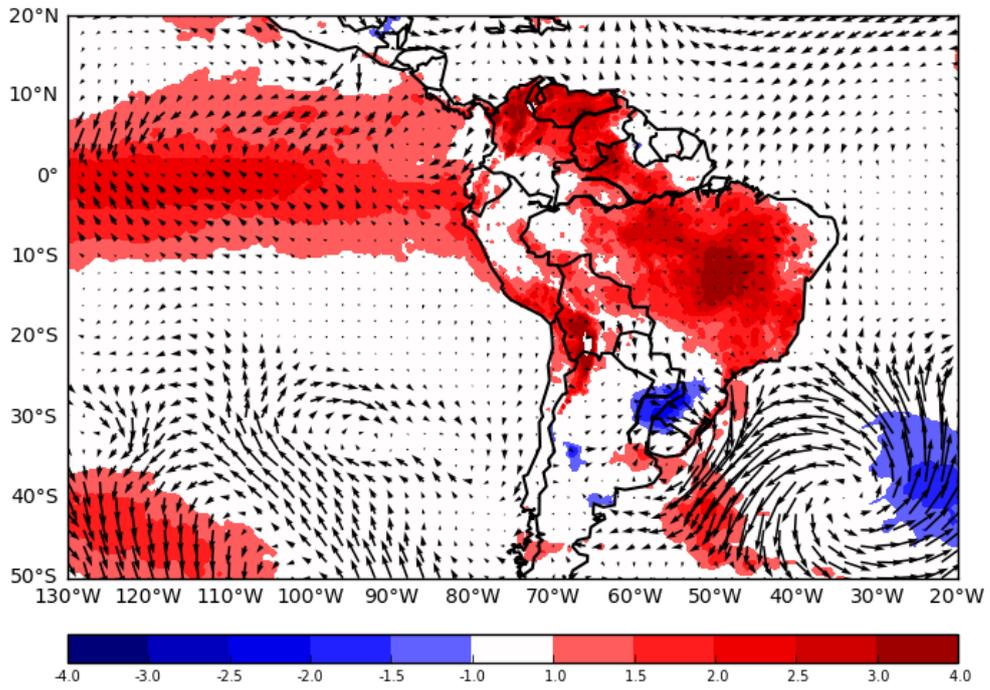


Patrón 3, DI - 2

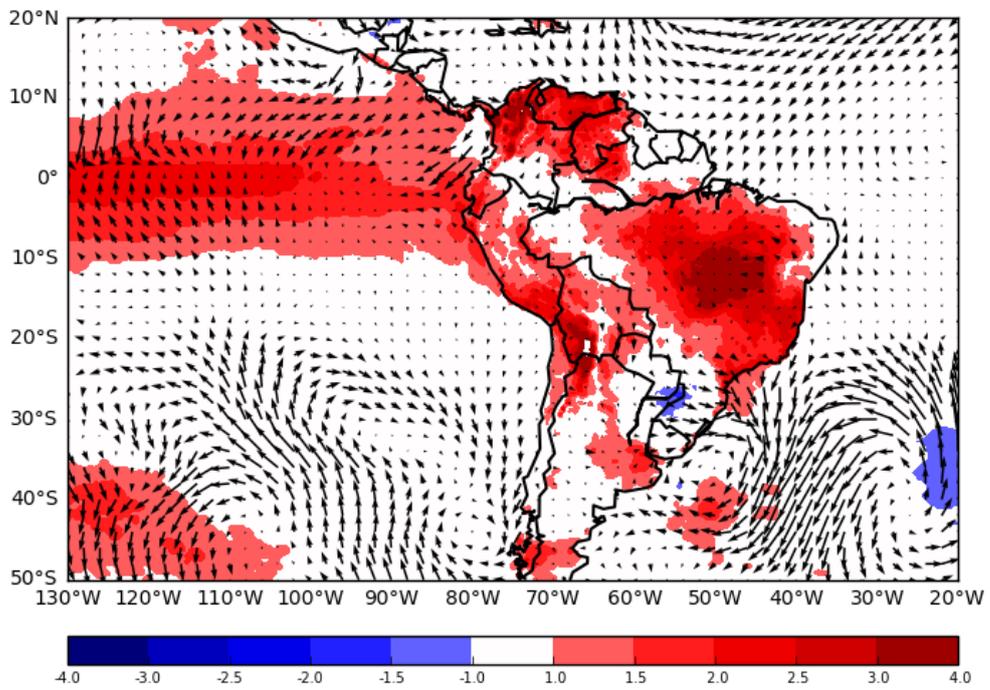


Patrón 3, DI - 1

Continuación...

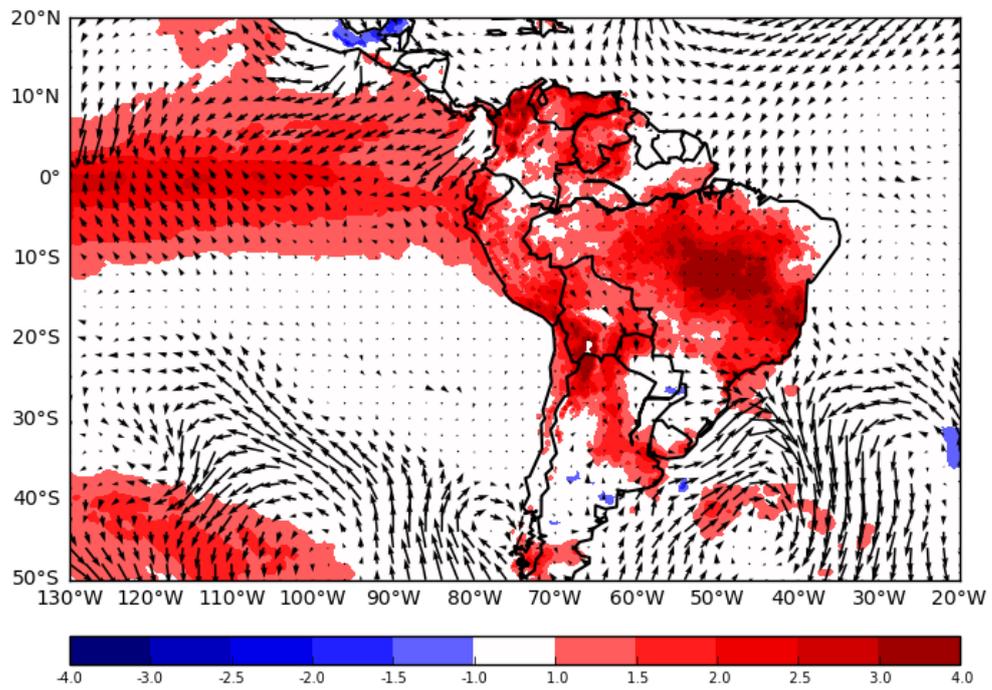


Patrón 3, DI + 0

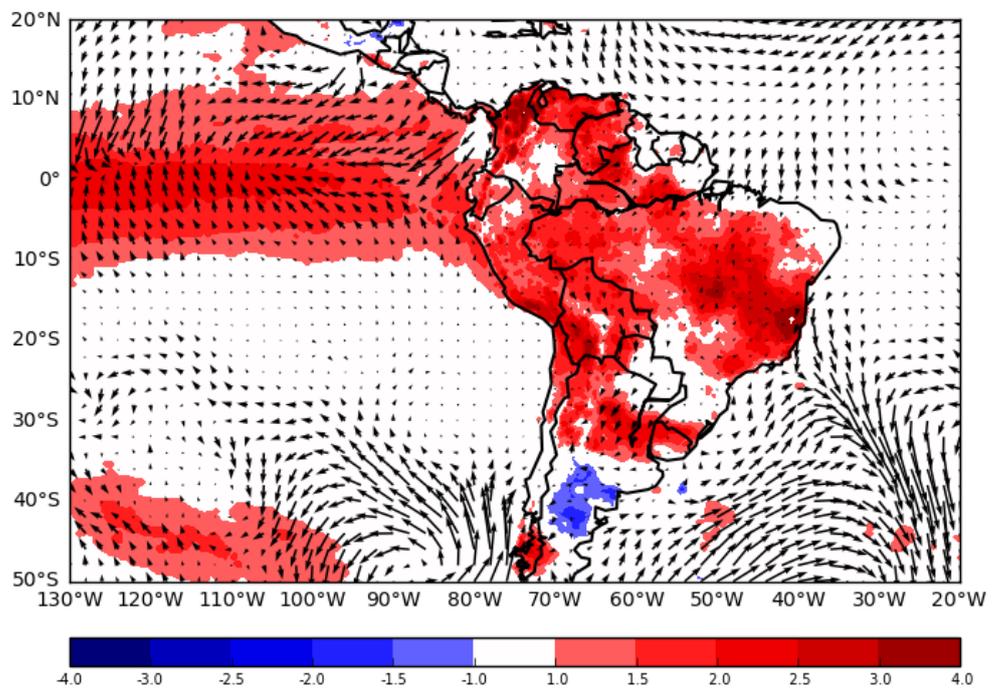


Patrón 3, PROM EVENT

Continuación...

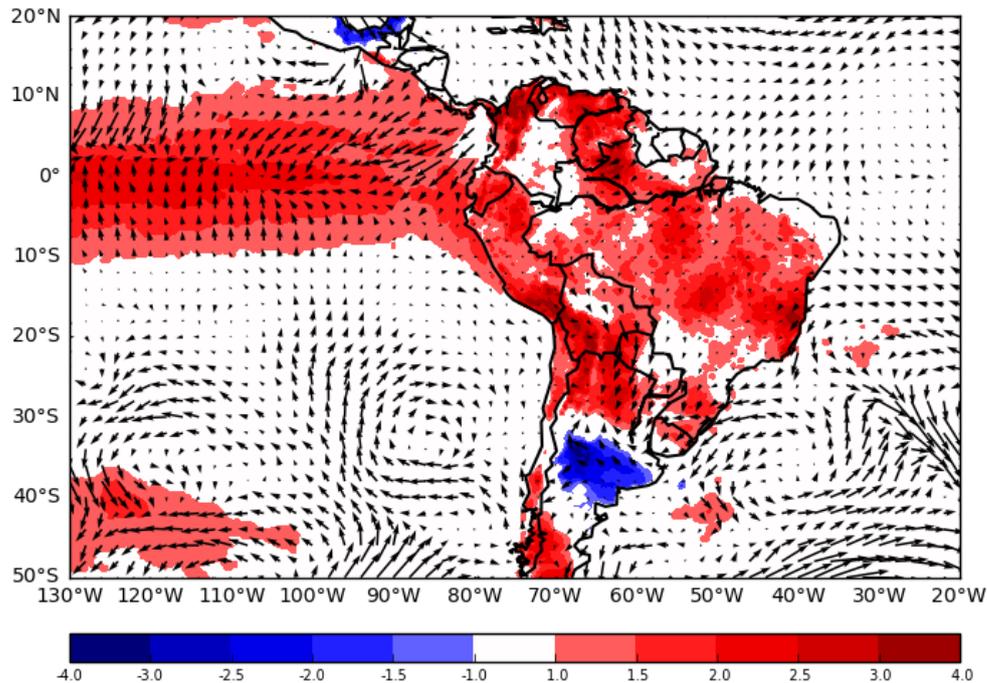


Patrón 3, DF + 0



Patrón 3, DF + 1

Continuación...



Patrón 3, DF + 2

Figura 19: Mapas de la evolución media de la anomalía de la temperatura máxima del aire con vientos en superficie antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

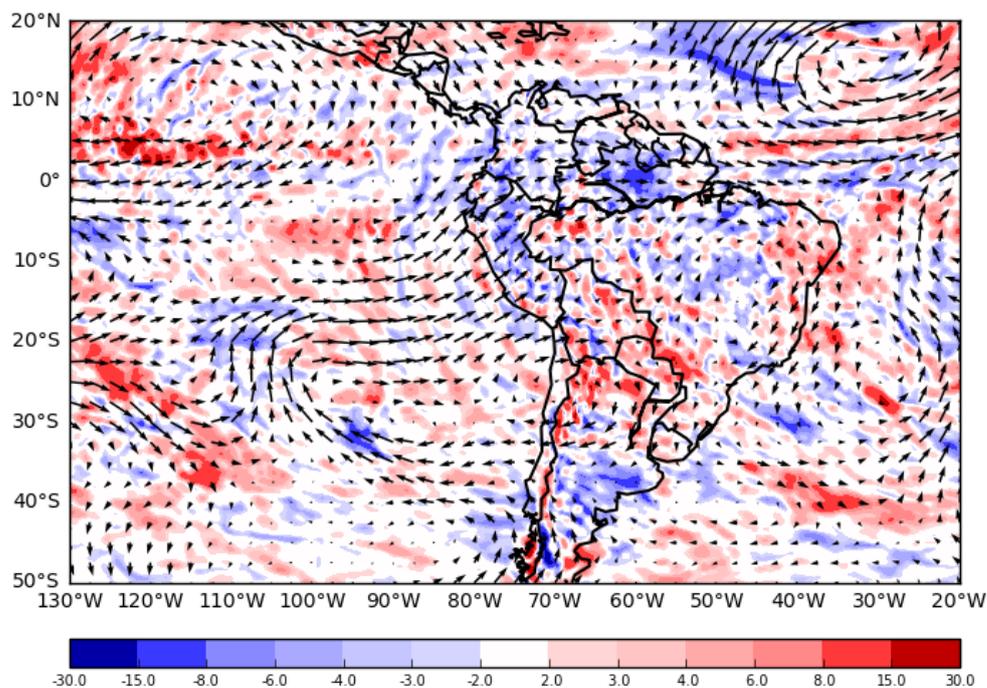
Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al segundo patrón más frecuente (patrón tres), se puede indicar que en este tipo de patrón el incremento de la temperatura en superficie es regional, la cual se extiende en el pacífico ecuatorial y abarca gran parte del Perú. En cuanto a la costa norte del país se observa que el calentamiento es sostenido desde días atrás al inicio, durante las olas de calor, Figura 19.

Respecto a los flujos de anomalías de viento paralelo a las costas peruanas no presentan una dirección predominante. Por otro lado, en el pacífico ecuatorial se observa una confluencia de vientos a lo largo de la latitud 0°. No se observa una configuración anticiclónica bien definida del APSO, sin embargo, se podría indicar que el posicionamiento de esta se encontraría desplazada hacia el oeste, con un núcleo aproximadamente en 45°S - 105°W.

Utilizando la Figura 19 se puede observar en el espacio, el incremento de temperaturas sobre la costa norte de Perú a través de las anomalías positivas de la temperatura máxima

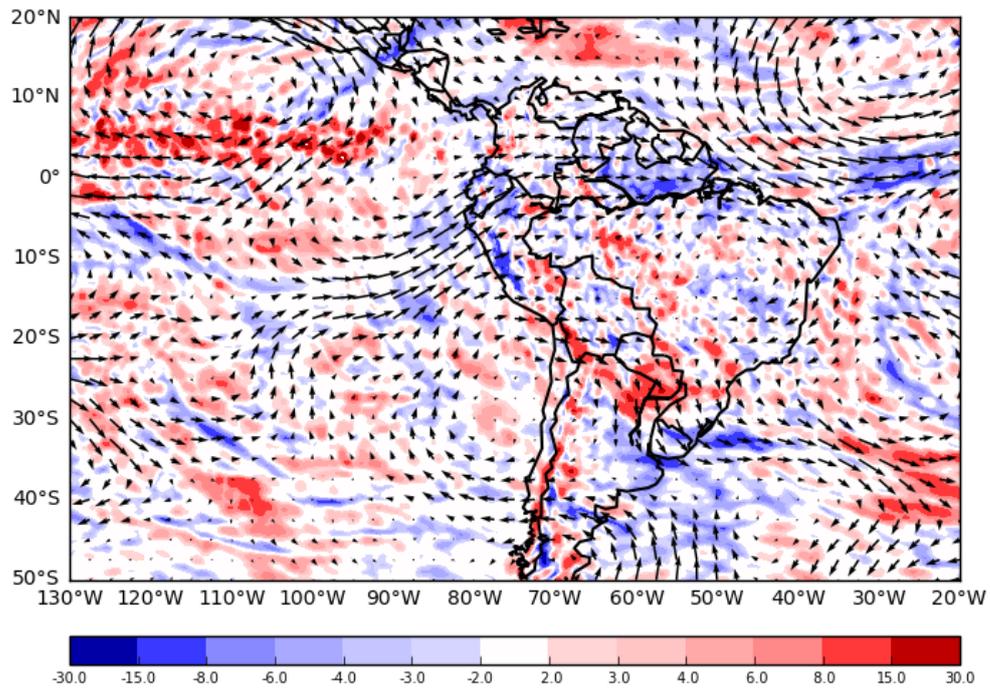
del aire en superficie, desde que se inicia el evento de ola de calor y se mantiene esas anomalías positivas hasta dos días tras haber culminado el evento. Lo cual es coherente con lo mostrado en la Figura 14a. mostrando un mayor incremento de las temperaturas hacia el término del evento.

Habiendo establecido que el patrón tres presenta un calentamiento en superficie a escala regional sinóptica y teniendo en cuenta que los eventos de olas de calor sobre Piura correspondientes a este tipo de patrón coinciden con los periodos de el ENSO positivo se puede indicar que las configuraciones a gran escala propias del evento El Niño estarían relacionados a la ocurrencia de las olas de calor sobre la costa norte de Perú. La relación climatológica del ENSO en fase positiva sobre la generación de olas de calor ha sido comprobado en otros estudios, como es el caso de china en el 2003 con una ola de calor ubicada al sureste de dicho país durante su verano y el evento de El Niño (Wang et al., 2015). La explicación física de que el evento de El Niño, particularmente en un evento El Niño Costero, eleve la temperatura del aire en la región costera de Ecuador y Perú se debe a que a menudo se observan aguas anormalmente cálidas adyacentes a la zona tropical occidental de Sudamérica con una magnitud típica de $1.5 - 3^{\circ}\text{C}$, que al transferir calor del océano a la atmósfera genera que la temperatura del aire se eleve en esta región (Cai et al., 2020).

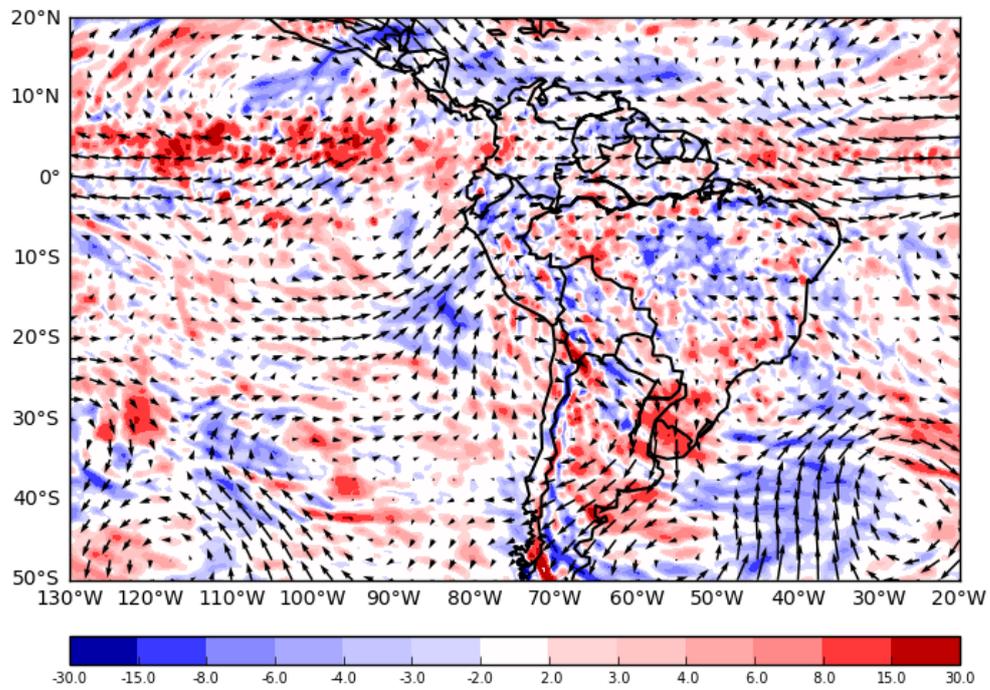


Patrón 3, DI – 3

Continuación...

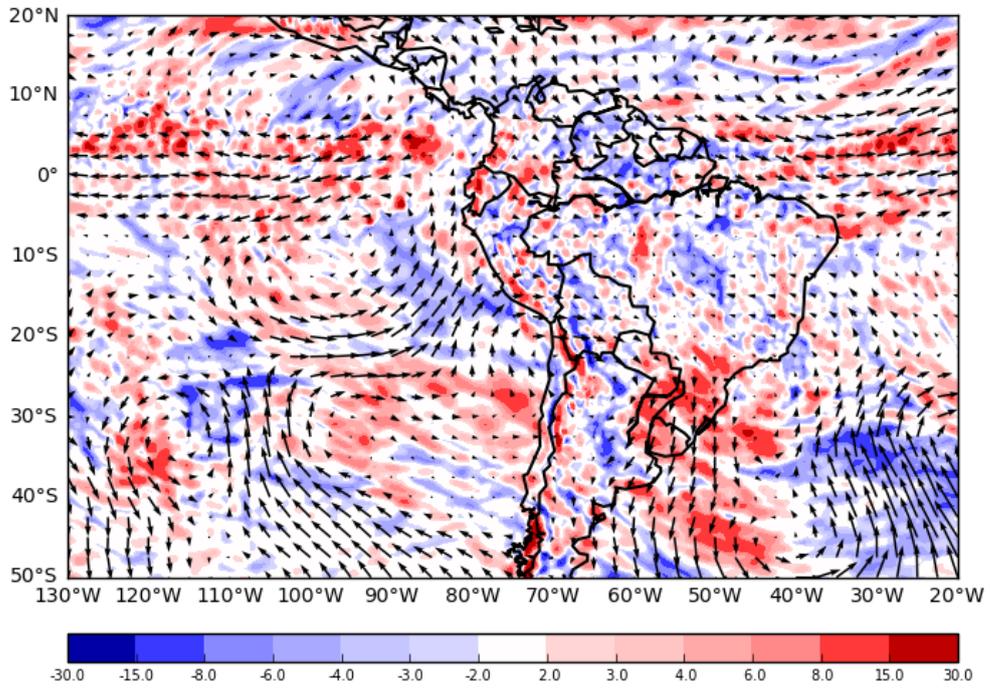


Patrón 3, DI - 2

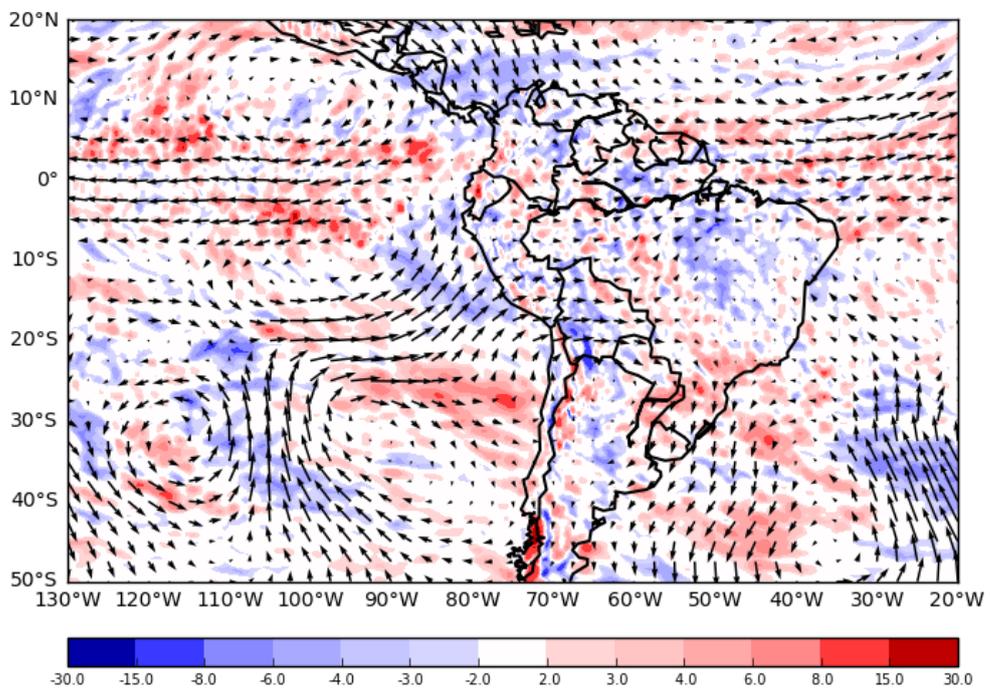


Patrón 3, DI - 1

Continuación...

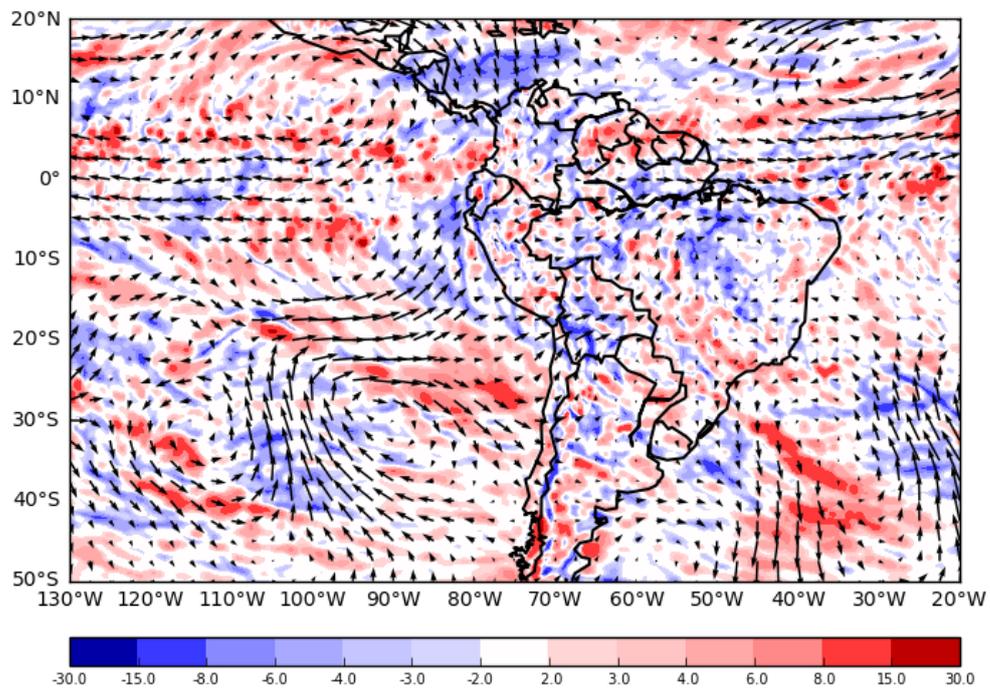


Patrón 3, DI + 0

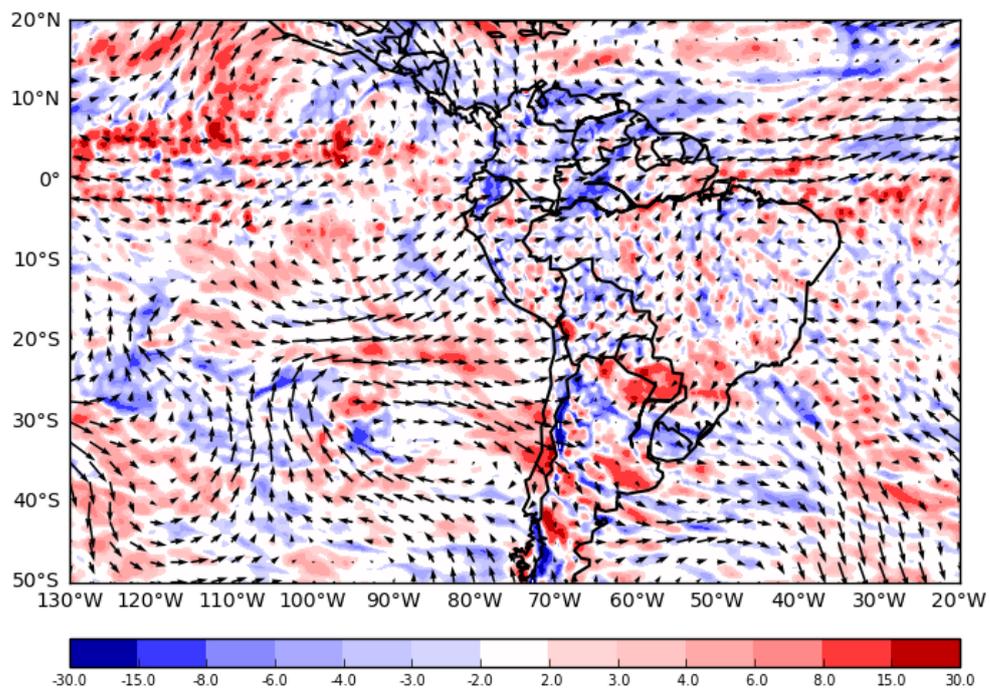


Patrón 3, PROM EVENT

Continuación...

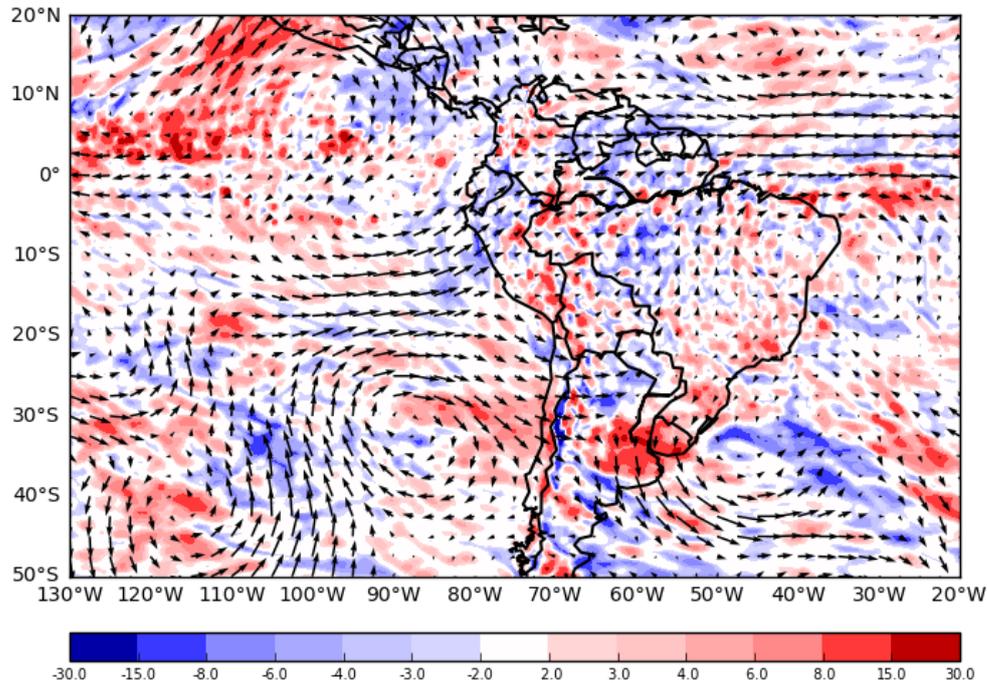


Patrón 3, DF + 0



Patrón 3, DF + 1

Continuación...



Patrón 3, DF + 2

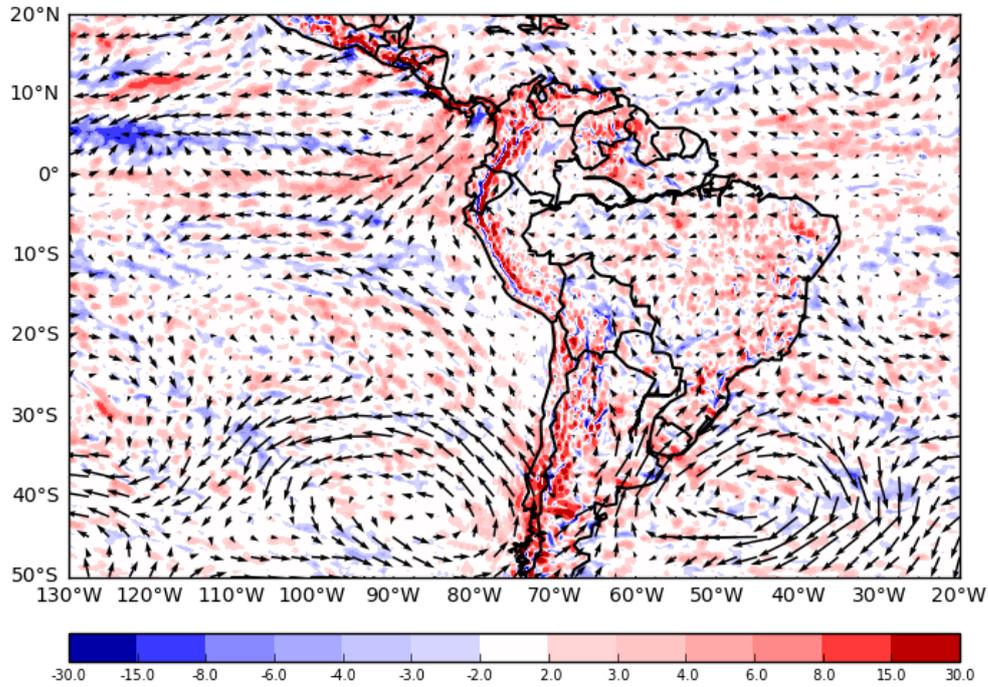
Figura 20: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 200 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón tres, se puede indicar que al inicio de las olas de calor se observa sobre la costa norte de Perú en niveles altos de la tropósfera (200 hPa) condiciones neutras a ligeramente divergentes, sin embargo, esta manifestación cambia en el transcurso del evento mostrando un comportamiento convergente durante las olas de calor y se intensifica hacia el último de las olas de calor, ver Figura 20.

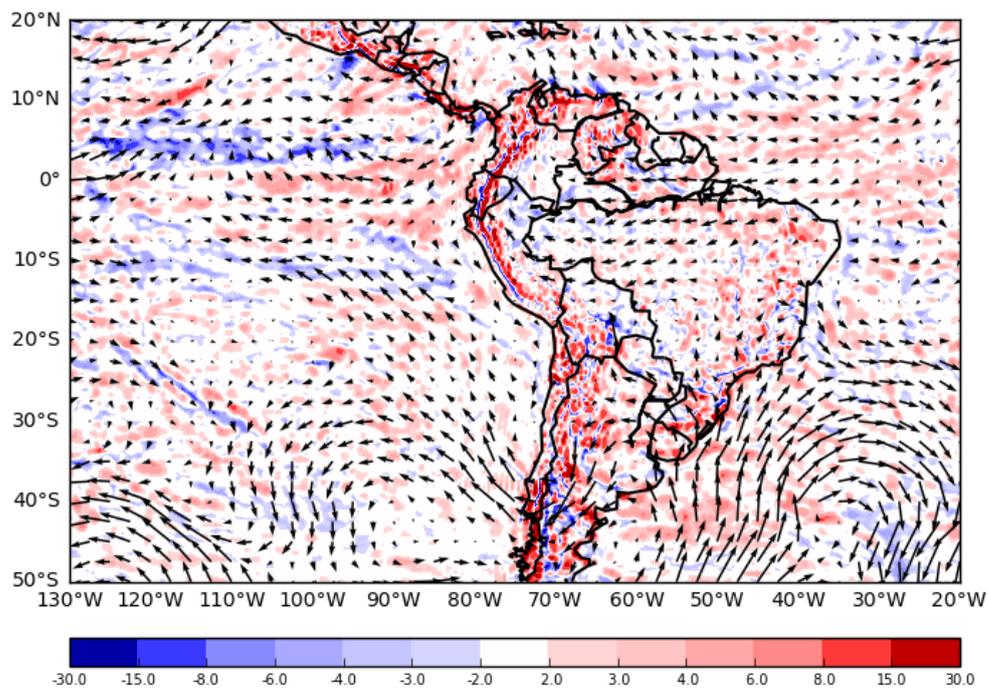
El flujo de vientos provenientes del suroeste sobre el litoral peruano y su intensificación al inicio de las olas de calor influye en la formación de convergencia sobre la costa del norte de Perú. Se observa la ausencia de la configuración anticiclónica sobre el altiplano boliviano en niveles altos de la tropósfera (Alta de Bolivia) que es propia de los meses del verano austral.

El comportamiento de las anomalías de divergencia a escala sinóptica en niveles altos de la tropósfera muestra una coherencia con lo indicado en la evolución temporal para la costa

norte, Figura 14b. Señalando una ligera divergencia en niveles altos sobre dicha área desde un día antes del inicio del evento y mostrando una convergencia hacia el último día de la ola de calor.

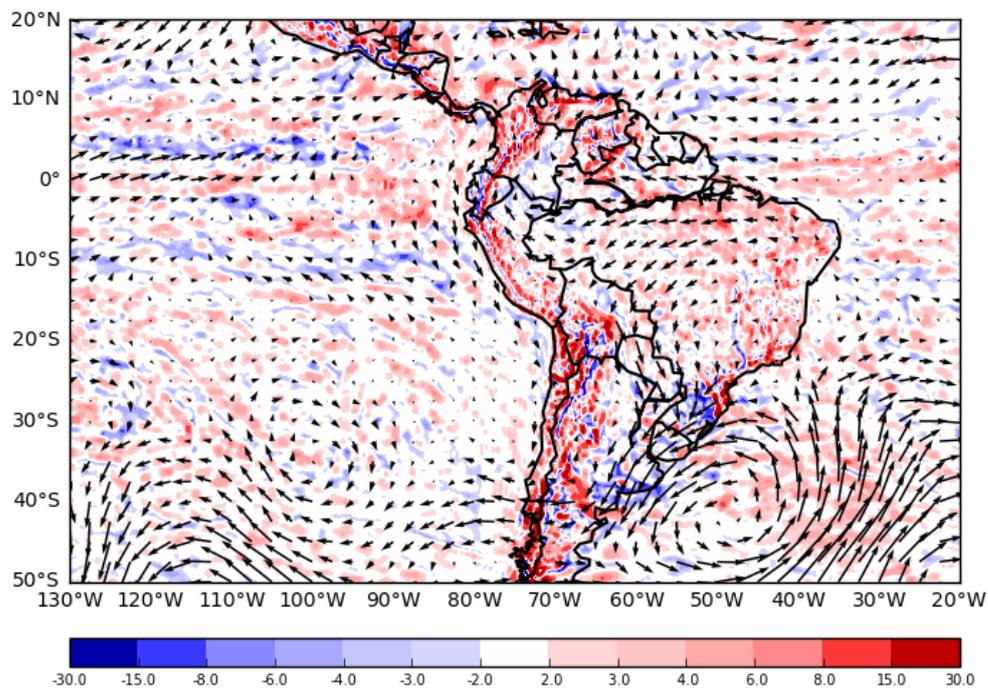


Patrón 3, DI - 3

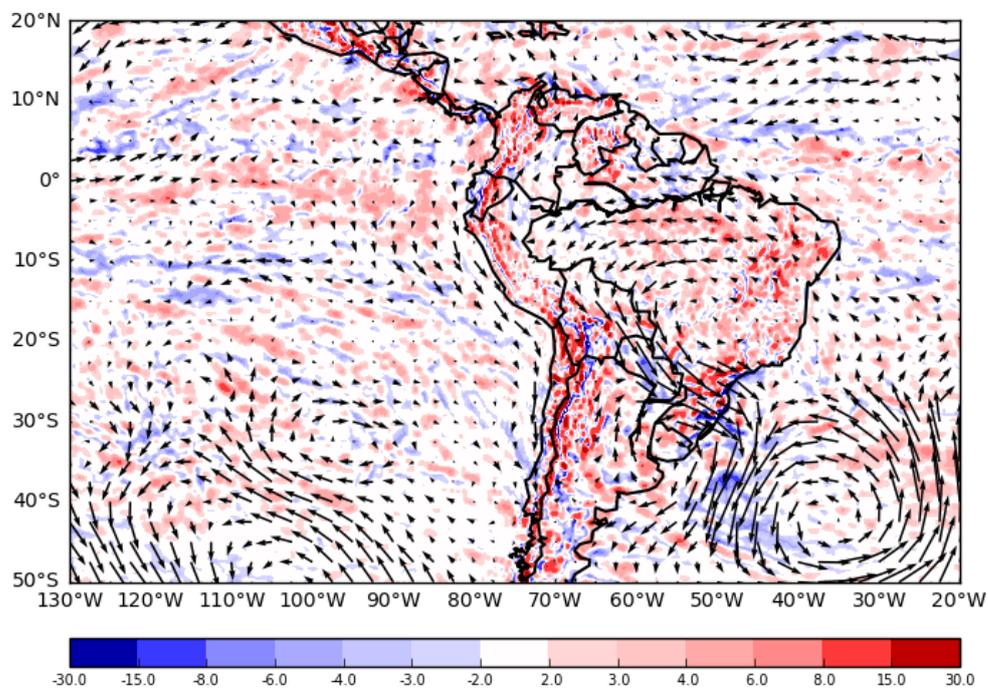


Patrón 3, DI - 2

Continuación...

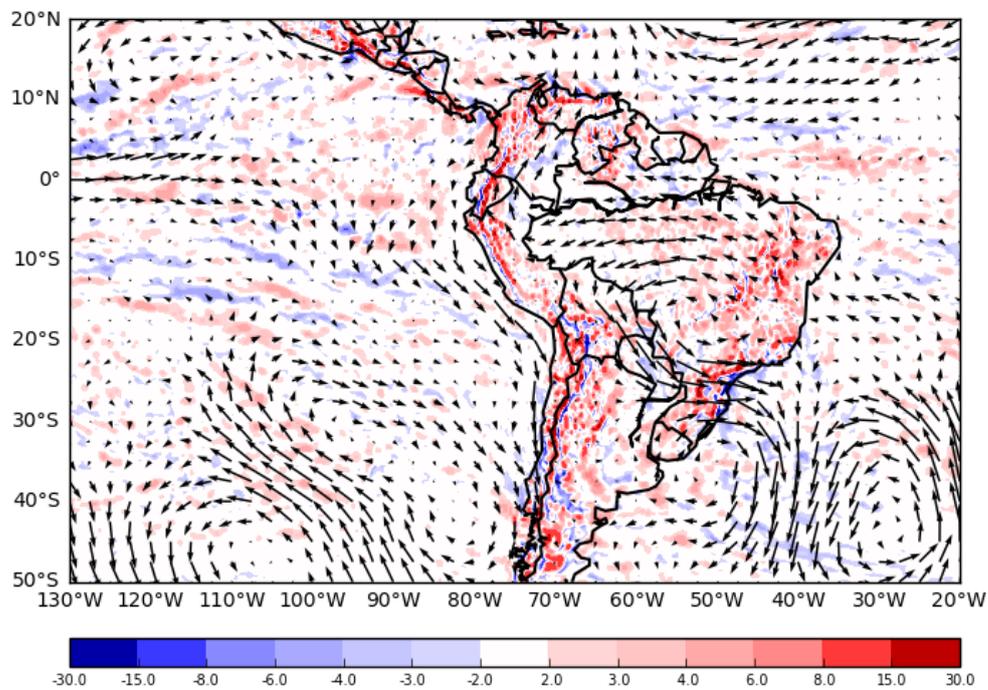


Patrón 3, DI - 1

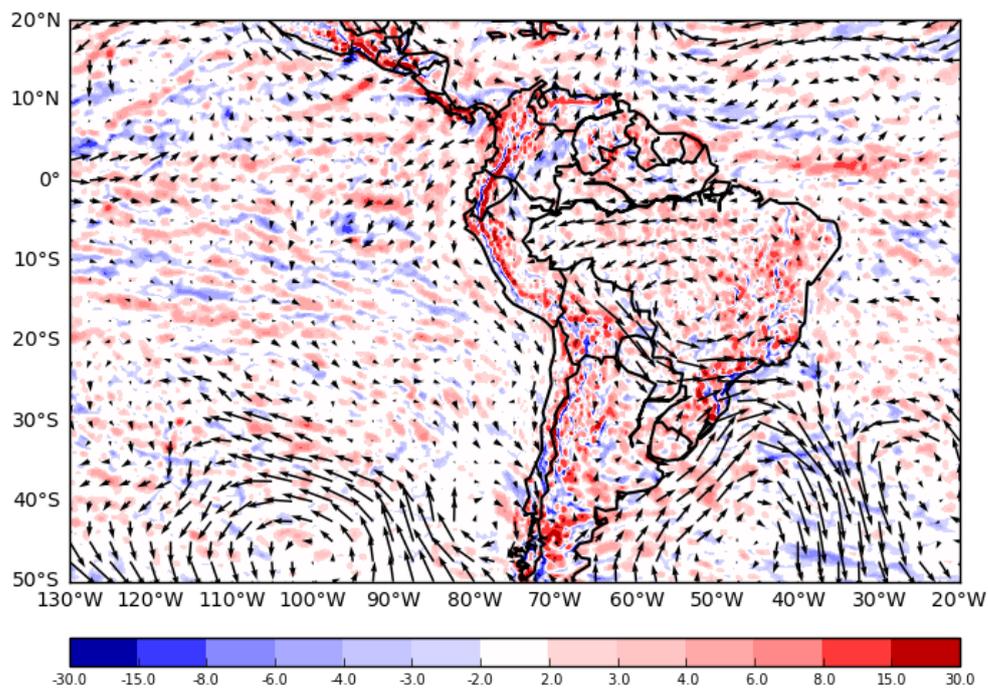


Patrón 3, DI + 0

Continuación...

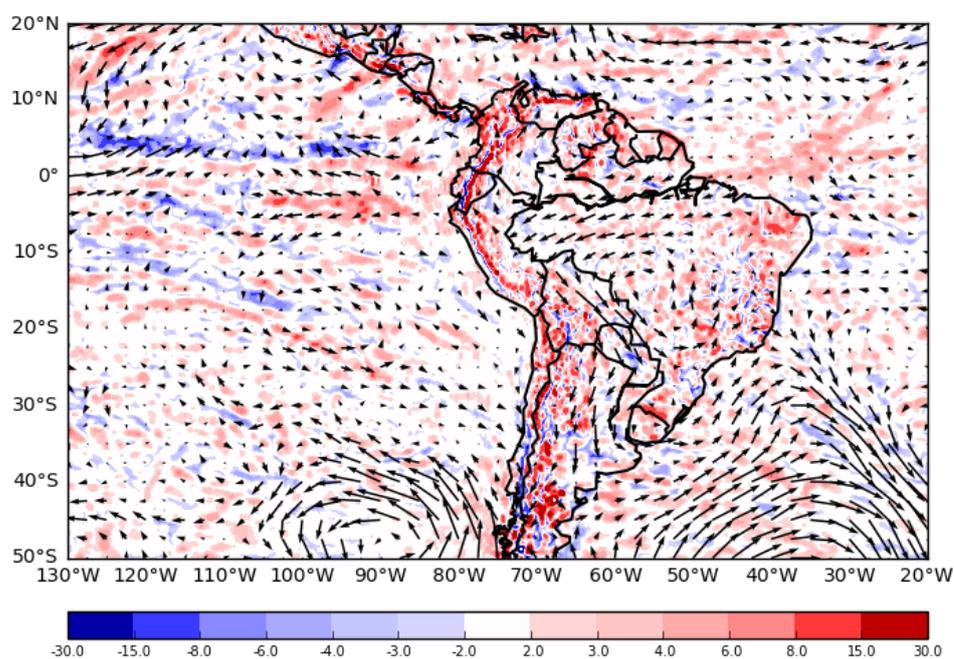


Patrón 3, PROM EVENT

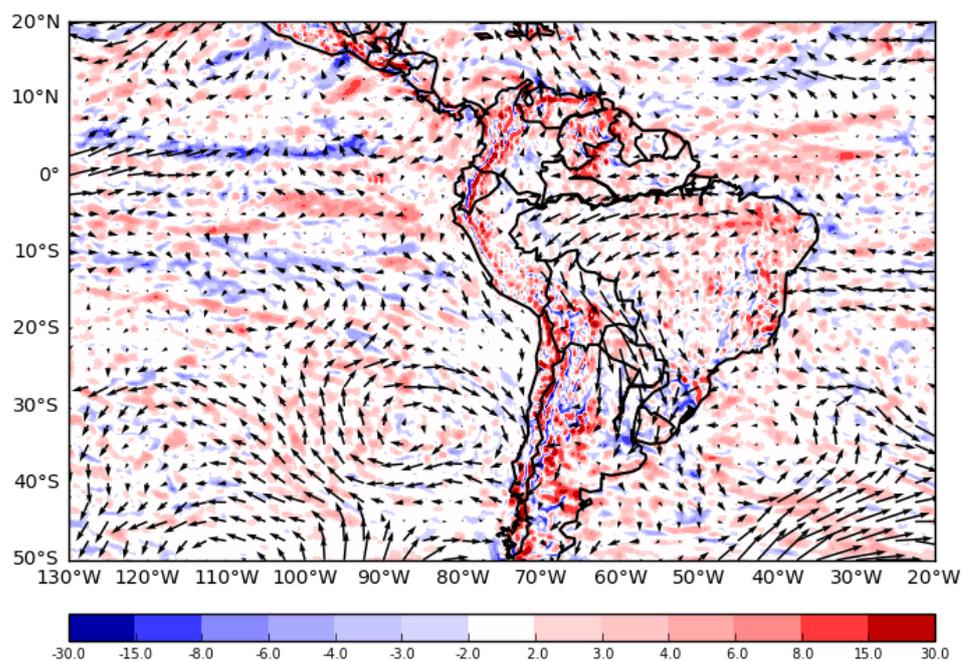


Patrón 3, DF + 0

Continuación...



Patrón 3, DF + 1



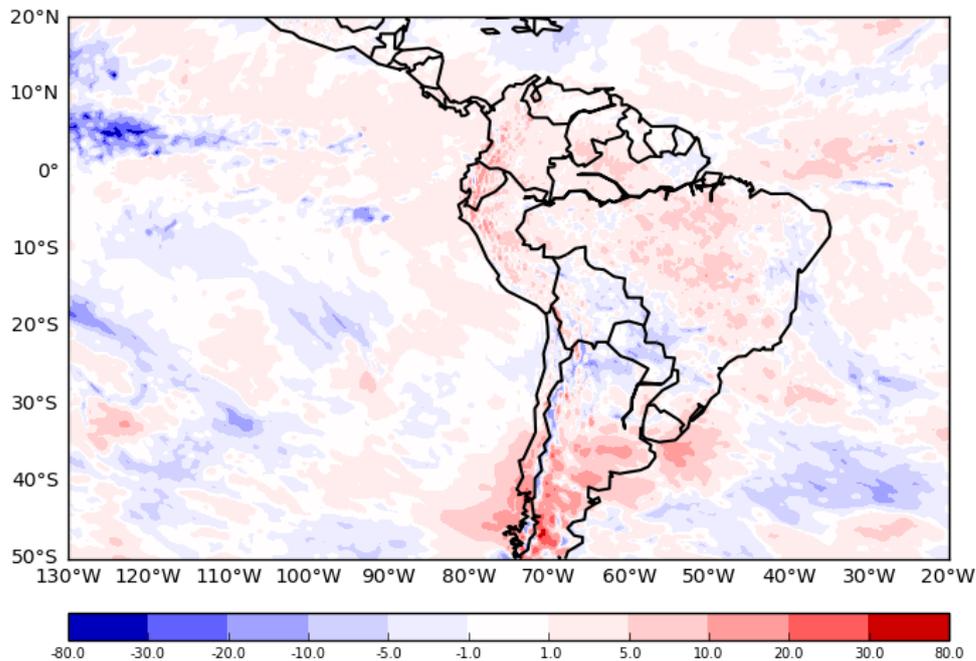
Patrón 3, DF + 2

Figura 21: Mapas de la evolución media de la anomalía de divergencia y vientos a 850 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor asignadas al patrón tres en 850 hPa, se puede indicar que existen condiciones neutras a ligeramente convergentes sobre la costa norte de Perú, sin embargo, esta manifestación de anomalías negativas de convergencia no abarca por completo dicho sector, observándose algunas áreas de divergencia durante las olas de calor, ver Figura 21.

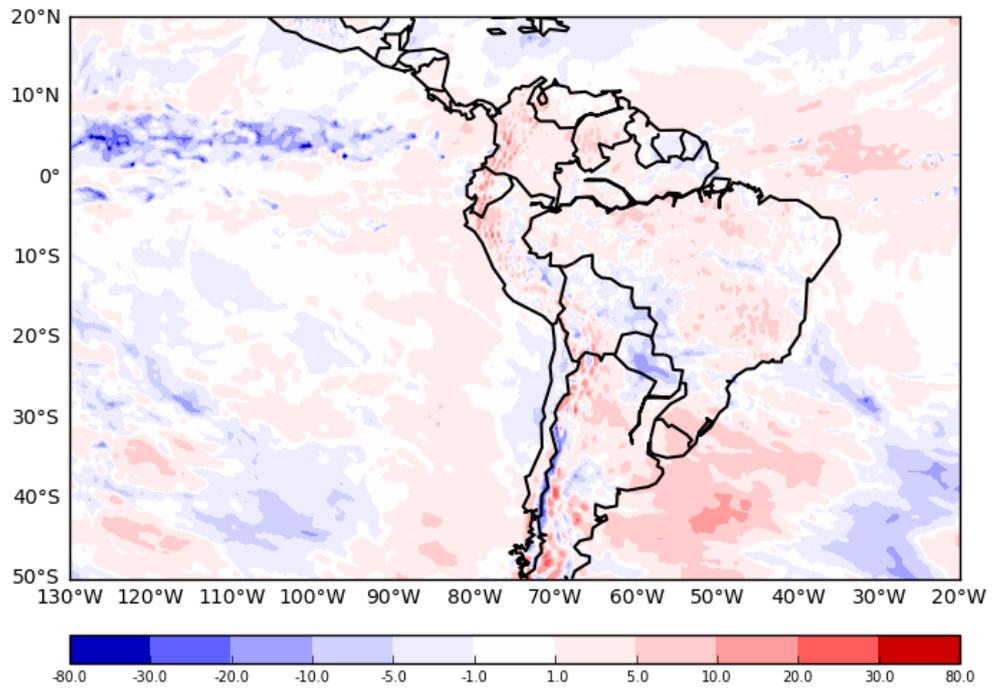
Un día antes del inicio de las olas de calor, la formación de un ciclón sobre el pacífico oriental con un núcleo ubicado aproximadamente sobre los 35°S - 100°W, se intensifica durante el desarrollo de las olas de calor genera una influencia de vientos hacia el sureste sobre la costa peruana, además se observa que la configuración anticiclónica propia del APSO se encuentra desplazada hacia el oeste con un núcleo aproximadamente en 45°S - 105°W. A su vez, se presenta la influencia de un flujo proveniente desde el norte a lo largo del litoral ecuatoriano. Debido a estas configuraciones se genera un ingreso de vientos que se desplazan hacia el sur sobre el litoral peruano.

El comportamiento predominante de las anomalías de convergencia en niveles bajo de la tropósfera se correlaciona con lo indicado en la evolución temporal de la misma variable para la costa norte, Figura 14c. Señalando un comportamiento convergente en niveles bajos sobre dicha área que tiende a condiciones neutras hacia el final de los eventos de olas de calor para este tipo de patrón.

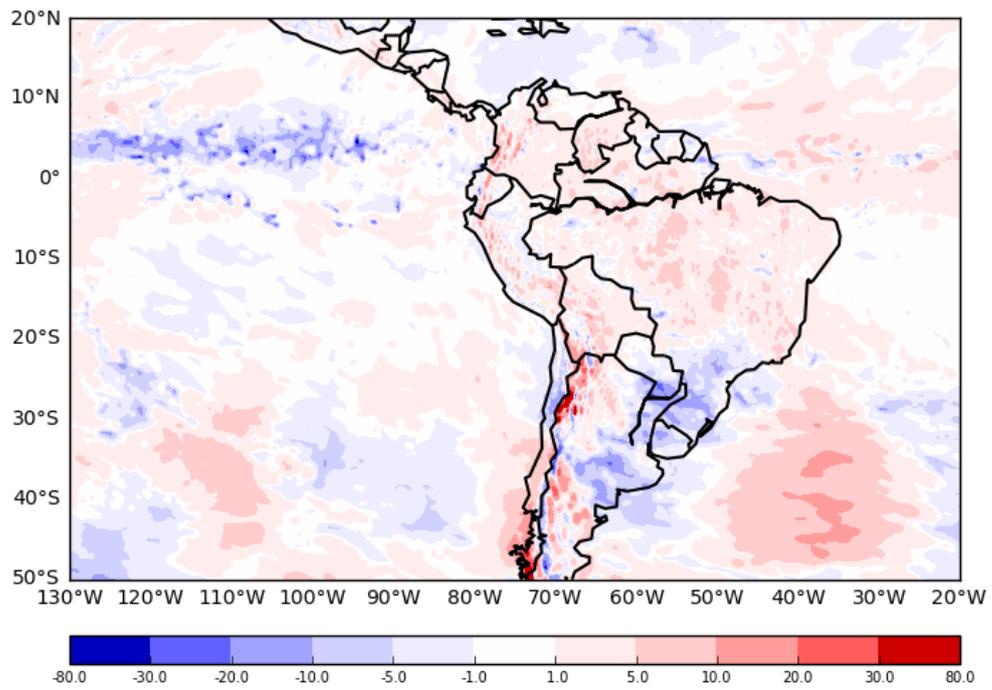


Patrón 3, DI – 3

Continuación...

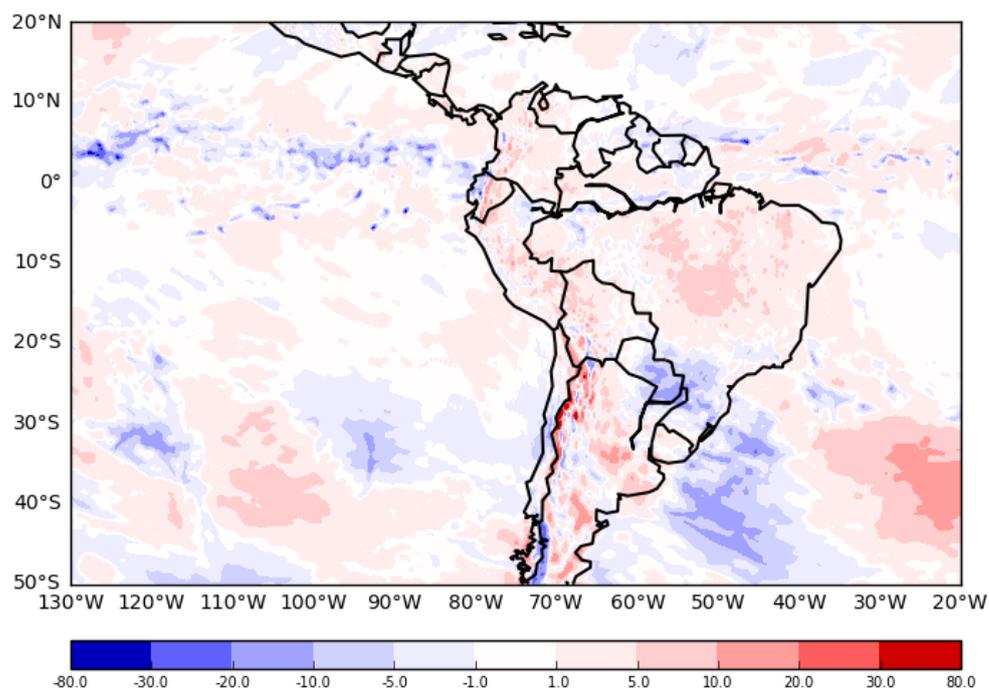


Patrón 3, DI - 2

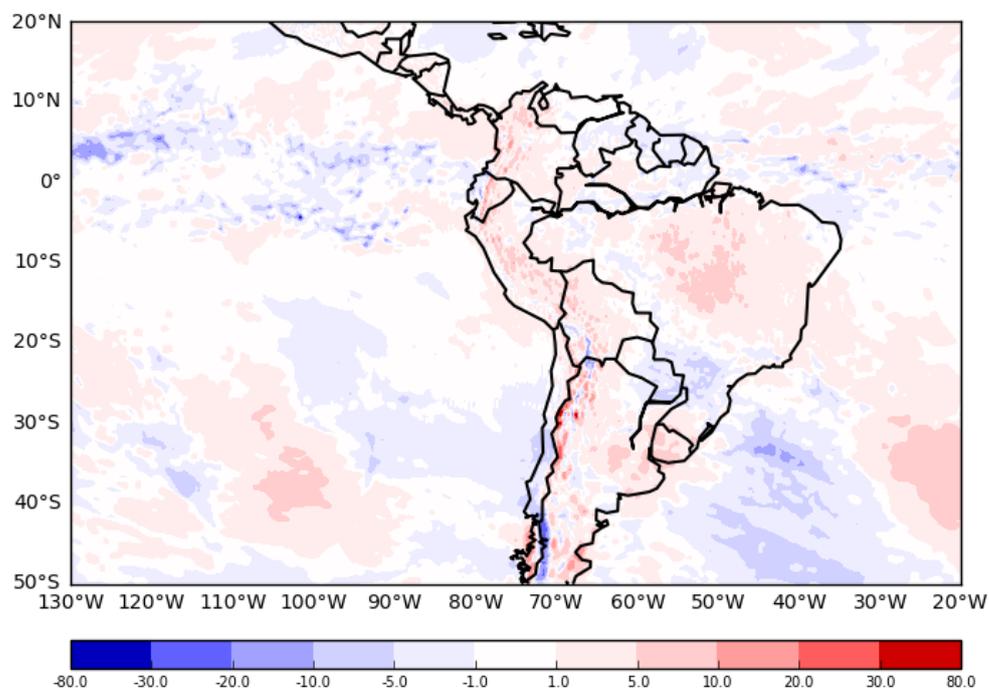


Patrón 3, DI - 1

Continuación...

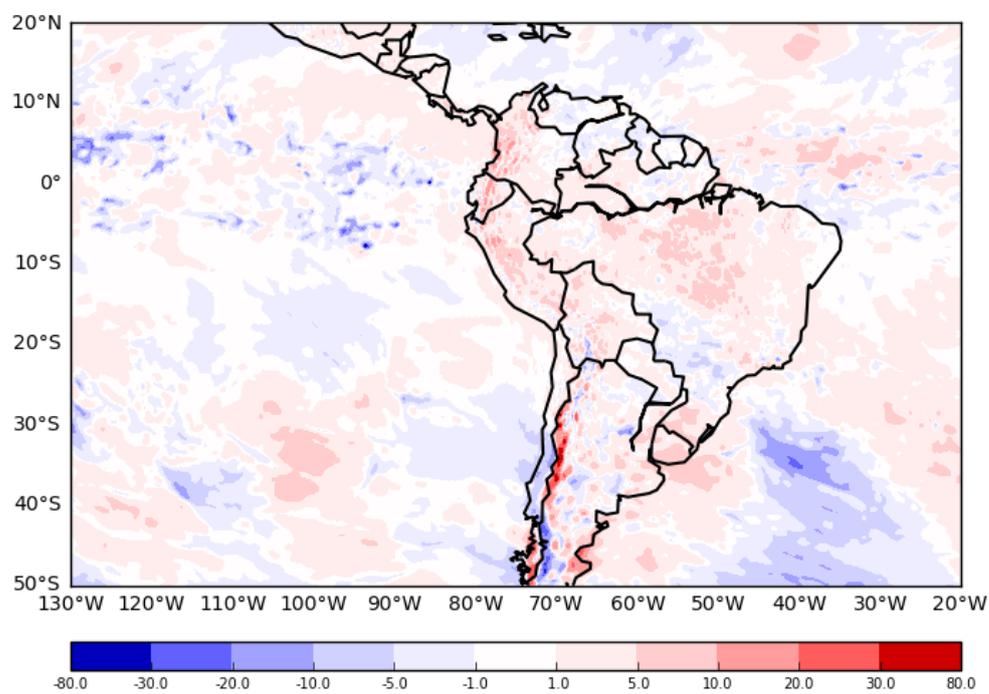


Patrón 3, DI + 0

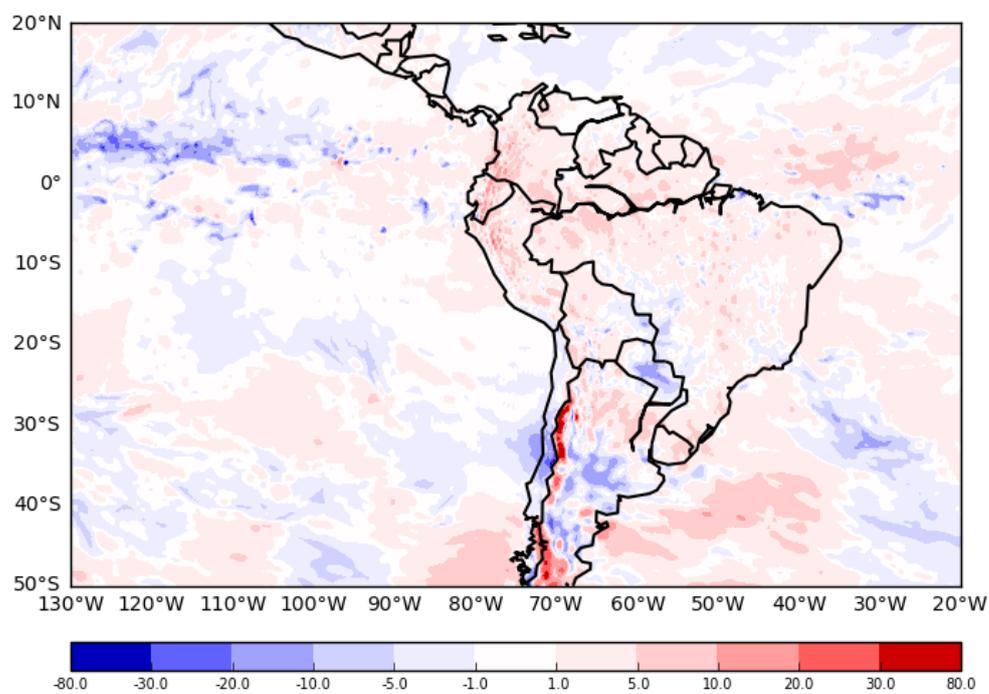


Patrón 3, PROM EVENT

Continuación...

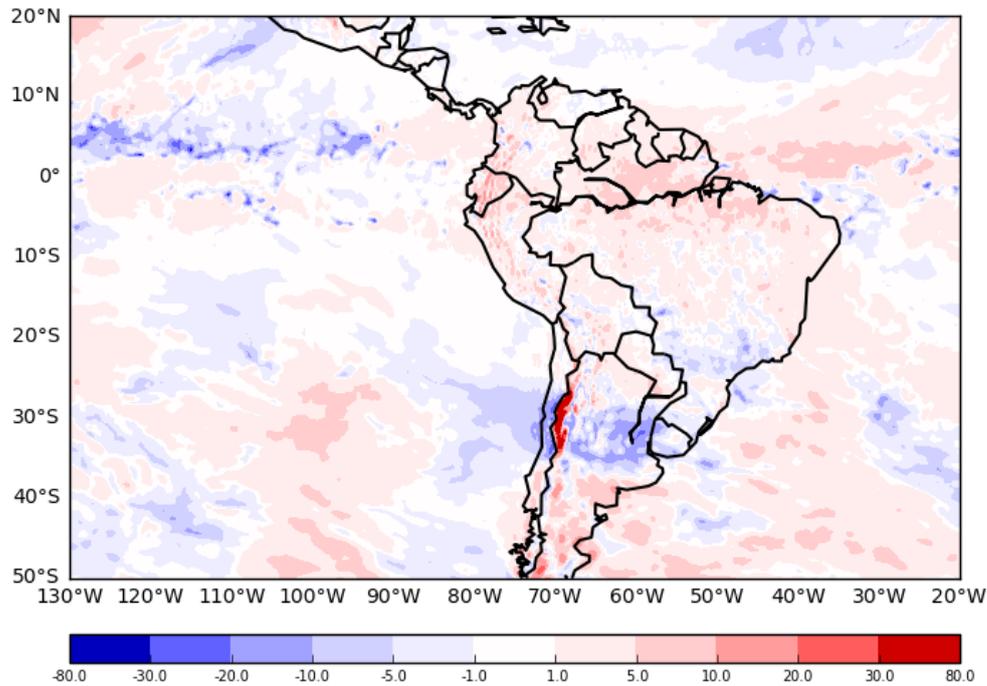


Patrón 3, DF + 0



Patrón 3, DF + 1

Continuación...



Patrón 3, DF + 2

Figura 22: Mapas de la evolución media de la anomalía de velocidad vertical a 500 hPa antes, durante y después de la ocurrencia de eventos OC. Desde 3 días antes hasta 2 días después de los eventos correspondientes al tercer patrón. DI+0 indica el día cuando el evento OC inicia, DI-1 indica un día antes de DI+0, DF+0 indica el día cuando el evento OC culmina, DF+1 indica un día después de que el evento de OC terminó. PROM EVENT indica el promedio durante las olas de calor.

Analizando las características sinópticas relacionadas a las olas de calor sobre Piura asignadas al patrón tres en 500 hPa, sobre la costa norte de Perú se presentan anomalías positivas de velocidad vertical días anteriores al inicio de las olas de calor, durante el desarrollo de las olas de calor se observan anomalías negativas en parte de este sector del Perú, lo cual se va intensificando hacia el final de los eventos de olas de calor y días posteriores, Figura 22.

Un flujo ascendente mostrado a través de la anomalía negativa en niveles medios de la tropósfera durante las olas de calor muestra una coherencia con lo indicado en la evolución temporal para la costa norte, Figura 14d. El flujo ascendente en niveles medios se corresponde con el flujo convergente en niveles bajos de la tropósfera mostrado en la Figura 21.

Las características sinópticas más resaltantes de los dos patrones más frecuentes en la generación de olas de calor sobre Piura son:

Respecto al patrón más frecuente (patrón cuatro), la presencia de un flujo de vientos superficiales provenientes del norte sobre el pacífico oriental genera una difluencia horizontal sobre y paralelo a la costa norte de Perú. La intensificación del APSO con una configuración zonal influencia que los vientos del norte ingresen con mayor facilidad sobre latitudes menores paralelo a la costa peruana desde días antes a la ocurrencia de las olas de calor. La conformación de un anticiclón en altos niveles de la tropósfera sobre el pacífico central genera un flujo de vientos hacia el este sobre la zona ecuatorial del pacífico oriental. Una configuración ciclónica en altos niveles sobre el hemisferio norte influencia que provengan vientos del noreste sobre el norte del litoral peruano, ambas circulaciones generarían una confluencia de vientos influyendo en la formación de convergencia sobre la costa norte del Perú en los primeros días de la ola de calor. El flujo convergente en niveles altos de la tropósfera y el flujo divergente en niveles bajo genera una subsidencia en niveles medios sobre la costa de norte de Perú.

Respecto al segundo patrón más frecuente (patrón tres), se observa que el incremento de la temperatura en superficie es regional, la cual se extiende sobre el pacífico ecuatorial y abarca gran parte del Perú. En el pacífico ecuatorial se observa una confluencia de vientos superficiales a lo largo de la latitud 0°. El APSO no se encuentra bien definido y se encontraría desplazado hacia el oeste. La formación de un ciclón en niveles bajos de la tropósfera sobre el pacífico oriental se intensifica durante el desarrollo de las olas de calor y genera una influencia de vientos hacia el sureste sobre la costa peruana. Existe un ingreso de vientos en superficie que se desplazan hacia el sur sobre el litoral peruano. El flujo de vientos provenientes del suroeste en niveles altos de la tropósfera sobre el litoral peruano y su intensificación al inicio de las olas de calor influye en la formación de convergencia sobre la costa del norte de Perú. Un flujo ascendente en niveles medios de la tropósfera durante las olas de calor muestra una coherencia con el flujo convergente en niveles bajos de la tropósfera. Este tipo de patrón coincide con los periodos de el ENSO positivo y se puede indicar que las configuraciones a gran escala propias del evento El Niño estarían influenciando en la ocurrencia de las olas de calor sobre Piura.

V. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones según los objetivos específicos planteados son:

1. Tras realizar la categorización para los treinta criterios de olas de calor calculados en las estaciones meteorológicas de Piura, se entiende que la caracterización de estos eventos extremos varía según se adopte el criterio de ola de calor, bien sea en el número de eventos que ocurren durante un periodo cálido o en la duración promedio que tiene el evento. Esta variación es debido a la temperatura del aire o índice termal que se use como métrica, el percentil que se adopte como umbral y la duración mínima que se emplee para categorizar el evento. Se determinó que provincias relativamente cercanas presentan diferencias en la caracterización de las olas de calor, lo cual podría estar asociado a factores locales además de las condiciones sinópticas que tienen una influencia directa en la temperatura del aire en superficie.
2. Existe una influencia medible de las olas de calor en la salud humana incrementando el riesgo de mortalidad en las provincias de Piura y Sullana para el periodo cálido del año durante estos eventos, y su efecto en el riesgo de mortalidad dura hasta un día posterior al término del evento de la ola de calor. Las olas de calor que mejor reflejan un efecto en el riesgo de mortalidad para Piura es cuando son categorizadas usando el siguiente criterio: la temperatura máxima del aire debe superar su umbral diario calculado mediante el percentil 95 de las observaciones diarias de su registro climático, por al menos dos días consecutivos. Frecuentemente, ocurren de uno a dos eventos durante el periodo cálido del año y pueden tener una duración de hasta tres días.
3. Existen dos patrones sinópticos de anomalías de temperatura más frecuentes para la formación de olas de calor con un efecto en el riesgo de mortalidad sobre Piura. El patrón más frecuente indica un calentamiento del aire local sobre la costa norte de Perú presentando subsidencia en niveles medios de la tropósfera, menor contenido de humedad en la tropósfera, una confluencia de vientos en niveles altos de la tropósfera debido a circulaciones ciclónicas y anticiclónicas en el océano pacífico y

en el atlántico respectivamente; además, existe una influencia de los vientos del norte en superficie sobre la costa del Perú asociado a la intensificación de una configuración zonal del APSO. En cuanto al segundo patrón más frecuente presenta un calentamiento general a escala sinóptica, existe un mayor contenido de humedad en la tropósfera sobre la costa norte del Perú, flujos ascendentes en niveles medios de la tropósfera, un APSO no bien definido desplazado hacia el oeste y vientos del norte en superficie sobre el litoral peruano. Este patrón y la ocurrencia de las olas de calor de este tipo estaría influenciado por los eventos de El Niño.

VI. RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos en el estudio realizado se recomienda lo siguiente:

- Replicar la metodología utilizada del presente estudio sobre los demás departamentos del Perú, ya que las olas de calor presentan características particulares dependiendo del sector de estudio.
- Hallar similitudes entre los criterios, en cuanto al índice térmico o temperatura, el umbral y duración mínima para definir las olas de calor con influencia en la salud humana mediante el incremento del riesgo de mortalidad por sector geográfico.
- Realizar un análisis más profundo sobre las características a mesoescala que podrían influenciar en el incremento de las temperaturas sobre Piura además de las condiciones sinópticas analizadas.
- Investigar por qué algunos criterios para categorizar las olas de calor presentan una disminución del riesgo de mortalidad sobre Piura, ya sea por el índice térmico aplicado o el tipo de mortalidad utilizada.
- Determinar qué tipo de enfermedades o causas de muerte son las más frecuentes y cuáles incrementan durante los eventos de olas de calor.
- Aplicar el criterio para categorizar las olas de calor sobre Piura en el monitoreo de eventos extremos y avisos meteorológicos sobre este lugar.
- Hacer un análisis profundo de los mecanismos sinópticos y a mesoescala que estarían generando la ocurrencia de las olas de calor en la costa norte de Perú con efecto en el riesgo de mortalidad para generar modelos conceptuales de este tipo de eventos extremos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Ahrens, C. (2012). *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*. Cengage learning.
- Andrade, C. (2015). Understanding relative risk, odds ratio, and related terms: As simple as it can get. *Journal of Clinical Psychiatry*, 76(7),857-861. <https://doi.org/10.4088/JCP.15f10150>.
- Arguez, A., & Applequist, S. (2013). A harmonic approach for calculating daily temperature normal constrained by homogenized monthly temperature normals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(7),1259-1265. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00195.1>.
- Austin, P. (2011). An introduction to propensity score methods for reducing the effects of confounding in observational studies. *Multivariate Behavioral Research*, 46(3),399-424. <https://doi.org/10.1080/00273171.2011.568786>.
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3),515-535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- Budd, G. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT), its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(1),20-32. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.07.003>.
- Bureau of Meteorology. (2011). Thermal Comfort observations. Australian Government. http://www.bom.gov.au/info/thermal_stress/.
- Cai, W., McPhaden, M., Grimm, A., Rodrigues, R., Taschetto, A., Garreaud, R., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y., Santoso, A., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H., Marengo, J., Alves, L., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., Takahashi, K., & Vera, C. (2020). Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South

- America. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(4),215-231.
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>.
- Cameron, A. (2009). Advances in Count Data Regression Talk for the Applied Statistics.
<http://cameron.econ.ucdavis.edu/racd/count.html>.
- Campbell, S., Remenyi, T., White, C., & Johnston, F. (2018). Heatwave and health impact research: A global review. *Health and Place*, 53(2),210-218.
<https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.08.017>.
- Cassano, N., Lynch, A., Cassano, J., & Koslow, M. (2006). Classification of synoptic patterns in the western Arctic associated with extreme events at Barrow, Alaska, USA. *Climate Research*, 30(2),83-97. <https://doi.org/10.3354/cr030083>.
- Cavazos, T. (2000). Using self-organizing maps to investigate extreme climate events: Na application to winter time precipitation in the Balkans. *Journal of Climate*, 13(10),1718-1732. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013).
- Chen, R., & Lu, R. (2015). Comparisons of the circulation anomalies associated with extreme heat in different regions of eastern China. *Journal of Climate*, 28(14),5830-5844. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00818.1>.
- Cheng, Y., Lung, S., & Hwang, J. 2019. New approach to identifying proper thresholds for a heat warning system using health risk increments. *Environmental Research*, 170(11),282-292. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.12.059>.
- C3S. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store.
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- Gasparri, A., & Armstrong, B. (2011). The impact of heat waves on mortality. *Epidemiology*, 22(1),68-73. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181fdcd99>.
- Geirinhas, J., Trigo, R., Libonati, R., Coelho, C., & Palmeira, A. (2018). Climatic and synoptic characterization of heatwaves in Brazil. *International Journal of Climatology*, 38(4),1760-1776. <https://doi.org/10.1002/joc.5294>.
- Gibson, P., Perkins-Kirkpatrick, S., Uotila, P., Pepler, A., & Alexander, L. (2017). On the use of self-organizing maps for studying climate extremes. *Journal of Geophysical Research*, 122(7),3891-3903. <https://doi.org/10.1002/2016JD026256>.

- Gilford, M., Vojtesak, M., Myles, G., Bonamn, R., & Martens, D. (1992). South America South of Amazon Study a Climatological study.
- Hajat, S., Armstrong, B., Baccini, M., Biggeri, A., Bisanti, L., Russo, A., Paldy, A., Menne, B., & Kosatsky, T. (2006). Impact of high temperatures on mortality: Is there an added heat wave effect. *Epidemiology*, 17(6),632-638. <https://doi.org/10.1097/01.ede.0000239688.70829.63>.
- Heo, S., & Bell, M. (2019). Heat waves in South Korea: differences of heat wave characteristics by thermal indices. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(6),790-805. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0076-3>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730),1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Hu, L., Luo, J., Huang, G., & Wheeler, M. (2019). Synoptic features responsible for heat waves in Central Africa, a region with strong multidecadal trends. *Journal of Climate*, 32(22),7951-7970. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0807.1>.
- Kwon, Y., Lee, D., & Kwon, Y. (2020). Is sensible heat flux useful for the assessment of thermal vulnerability in Seoul (Korea). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030963>.
- Laura, W., Davila, C., & Rodriguez, L. (2020). Sistematización de eventos climáticos extremos, caracterización de condiciones climáticas extremas asociadas con impactos a la salud. Subdirección de Predicción Climática Senamhi.
- Sfica, L., Croitoru, A., Iordache, I., & Ciupertea, A. (2017). Synoptic conditions generating heatwaves and warm spells in Romania. *Atmosphere*, 8(3),1-22. <https://doi.org/10.3390/atmos8030050>.

- Ma, W., Zeng, W., Zhou, M., Wang, L., Rutherford, S., Lin, H., Liu, T., Zhang, Y., Xiao, J., Zhang, Y., Wang, X., Gu, X., & Chu, C. (2015). The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: An analysis from 66 communities. *Environment International*, 75,103-109. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.004>.
- Min, K., Chung, C., Bae, J., & Cha, D. (2019). Synoptic characteristics of extreme heatwaves over the Korean Peninsula based on ERA Interim reanalysis data. *International Journal of Climatology*, 40(6),3179-3195. <https://doi.org/10.1002/joc.6390>.
- MINSA. (2016). Ministerio de Salud fortalece trabajo de prevención en la región Piura ante la ola de calor.
- Nori-Sarma, A., Benmarhnia, T., Rajiva, A., Azhar, G., Gupta, P., Pednekar, M., & Bell, M. (2019). Advancing our understanding of heat wave criteria and associated health impacts to improve heat wave alerts in developing country settings. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(12),1-13. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122089>.
- Paccini, L. (2016). Patrones de circulación atmosférica intraestacionales de macroescala en bajos niveles asociados a lluvias en la cuenca amazónica. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2015>
- Perkins, S., & Alexander, L. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13),4500-4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>.
- Pezza, A., Van, P., & Cai, W. (2012). Severe heat waves in Southern Australia: Synoptic climatology and large-scale connections. *Climate Dynamics*, 38(1-2),209-224. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1016-2>.
- Rennie, J., Palecki, M., Heuser, S., & Diamond, H. (2021). Developing and validating heat exposure products using the U.S. climate reference network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(4),543-558. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0282.1>.
- Reynolds, R., Rayner, N., Smith, T., Stokes, D., & Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13),1609-1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2).

- Rothfus, L. (1990). The heat index equation. Fort Worth, Texas: National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Meteorology.
- SENAMHI. (2013). Estudio de determinación de umbrales de temperatura y precipitación pluvial para las cuencas de los ríos Coata e Ilave - región puno.
- SENAMHI. (2020). Clasificación climática nacional, periodo de referencia 1981-2010. Versión preliminar. Proyecto de apoyo a la gestión del cambio climático. Convenio Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y Libélula.
- Steadman, R. (1984). A Universal Scale of Apparent Temperature. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23,1674–1687. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2).
- UNISDR. (2018). Economic Losses, Poverty & Disasters 1998-2017. Centre for research on the epidemiology of disasters. https://www.who.int/health-topics/heatwaves#tab=tab_1
- Wang, W., Zhou, W., Li, X., Wang, X., Wang, D. (2015). Synoptic-scale characteristics and atmospheric controls of summer heat waves in China. *Climate Dynamics*, 46(9-10),2923-2941. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2741-8>.
- WMO. (1992). International Meteorological Vocabulary No. 182. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4712
- WMO., & WHO. (2015). Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. World Meteorological Organization and World Health Organization. <https://www.who.int/globalchange/publications/heatwaves-health-guidance/en/>
- Yoon, D., Cha, D., Lee, G., Park, C., Lee, M., Min, K. (2018). Impacts of Synoptic and Local Factors on Heat Wave Events Over Southeastern Region of Korea in 2015. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(21),12,081-12,096. <https://doi.org/10.1029/2018JD029247>.
- Zuo, J., Pullen, S., Palmer, J., Bennetts, H., Chileshe, N., & Ma, T. (2015). Impacts of heat waves and corresponding measures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 92,1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.07>

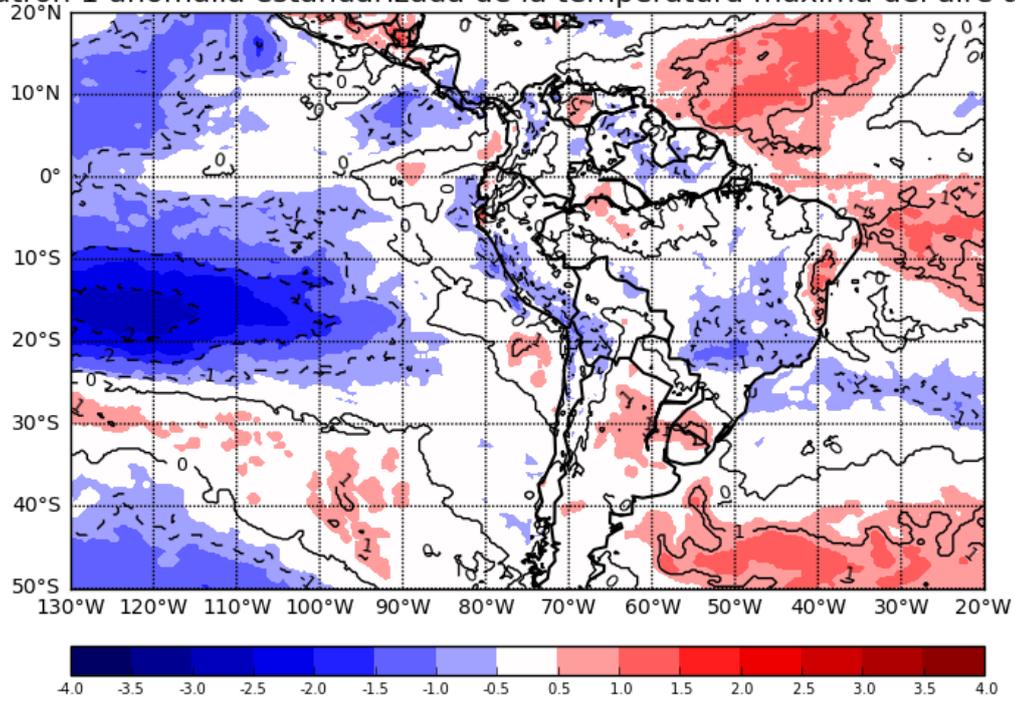
VII. ANEXOS

Anexo 1. Metadatos de las estaciones meteorológicas utilizadas

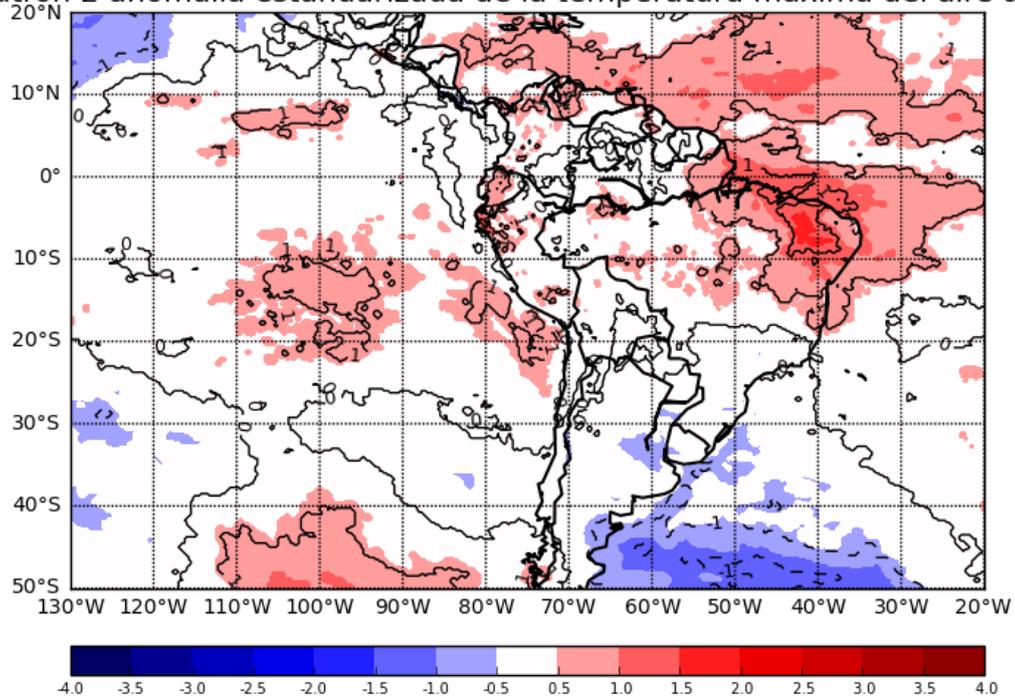
Código	Estación	Distrito	Provincia	Departamento	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Tipo
105063	San Miguel	Catacaos	Piura	Piura	-80.68	-5.25	24	Convencional
104079	Mallares	Marcavelicas	Sullana	Piura	-80.74	-4.86	44	Convencional

Anexo 2. Patrones de anomalía estandarizada de temperatura máxima del aire durante las olas de calor

Patrón 1 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m

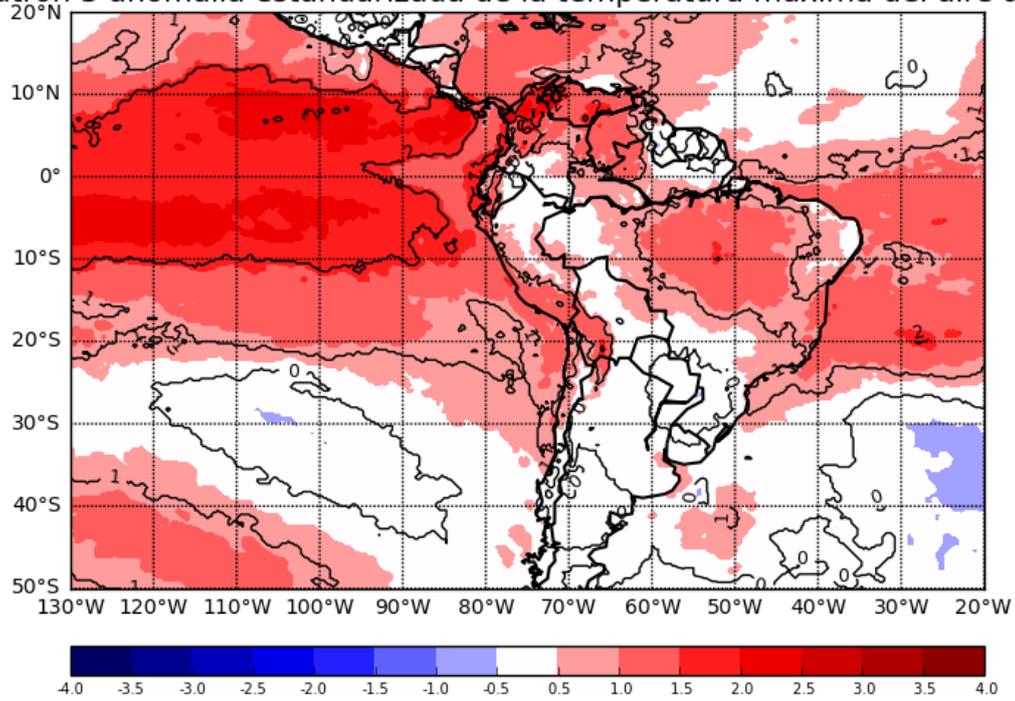


Patrón 2 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m

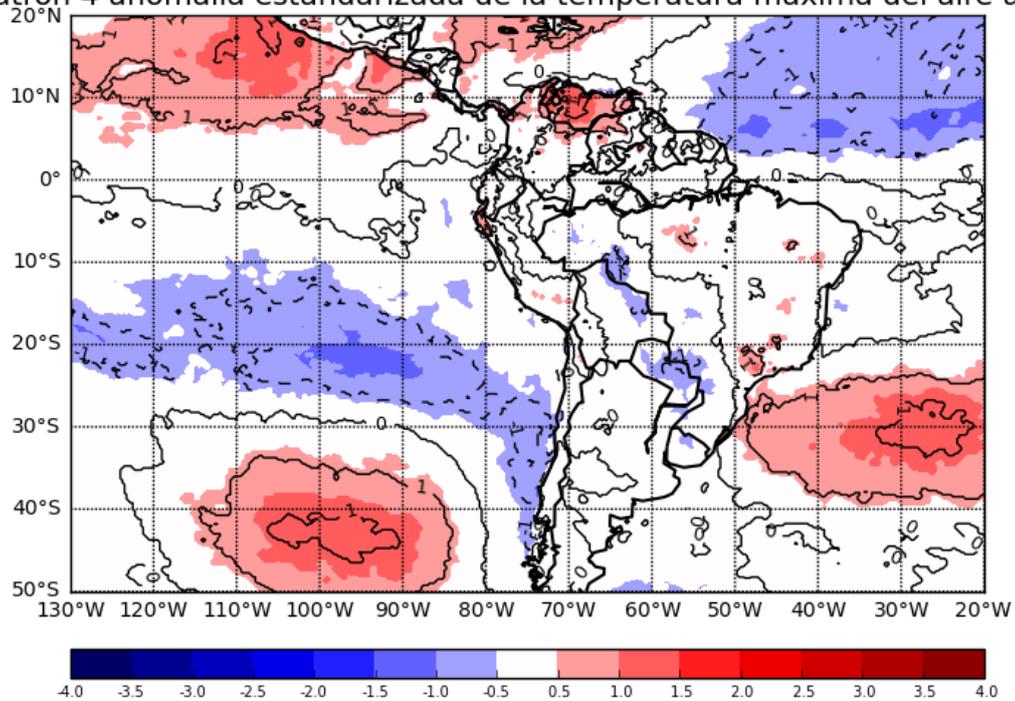


Continuación...

Patrón 3 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m

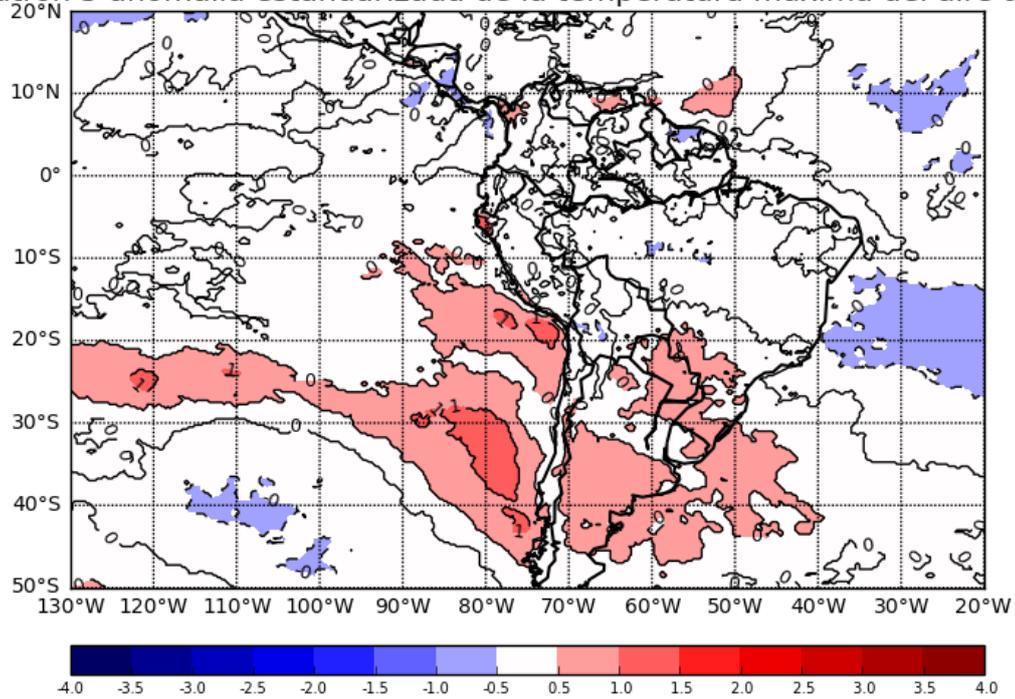


Patrón 4 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m



Continuación...

Patrón 5 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m



Patrón 6 anomalía estandarizada de la temperatura máxima del aire a 2m

