

Análisis de calor extremo en el estado de Veracruz y sus aplicaciones

Analysis of Extreme Heat in the State of Veracruz and its Applications

Citlali Villa-Falfán, Universidad Veracruzana

Jorge Luis Vázquez-Aguirre, Universidad Veracruzana

Óscar Sánchez-Martínez, Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC-CONAGUA)

RESUMEN. Recientemente, la intensificación y mayor frecuencia de eventos de calor extremo se ha asociado al cambio climático resultante del calentamiento global. Su análisis es de gran relevancia debido a que éste es responsable del aumento en las tasas de morbilidad y mortalidad en muchas regiones del mundo, así como de altas pérdidas económicas. Con el fin de insertar información cuantitativa sobre el tema, se desarrolló una metodología con base en el enfoque metodológico de categorización del umbral (percentiles) a partir del análisis de datos observados de temperatura máxima para veinte sitios en el estado de Veracruz, donde se identificaron los valores de temperatura máxima a partir de los cuales se puede determinar el calor extremo para distintas duraciones en días consecutivos además de calcular las climatologías correspondientes. Una vez determinados los umbrales, se realizó una comparación cuantitativa entre estos y los valores de temperatura máxima observados durante un caso reciente.

PALABRAS CLAVE: calor extremo, climatología, ola de calor, percentil, umbral

ABSTRACT. *Recently, the intensification and increased frequency of extreme heat events has been associated with climate change resulting from global warming. Its analysis is of great relevance because it is responsible for increased morbidity and mortality rates in many regions of the world, as well as high economic losses. In order to insert quantitative information on the subject, a methodology was developed based on the methodological approach of threshold categorization (percentiles) from the analysis of observed maximum temperature data for twenty sites in the state of Veracruz, where the maximum temperature values were identified from which extreme heat can be determined for different durations in consecutive days in addition to calculating the corresponding climatology. Once the thresholds were determined, a quantitative comparison was made between these and the maximum temperature values observed during a recent case.*

KEYWORDS: extreme heat, climatology, heat wave, percentile, threshold

1. Introducción

De acuerdo al National Integrated Heat Health Information Service (NIHHIS, 2017), el calor extremo se puede entender como eventos individuales de altas temperaturas en los que éstas se aproximan, igualan o superan los récords extremos de temperatura, o bien, como episodios de ola de calor que ocurren durante dos o más días consecutivos.

La mayoría de los estudios disponibles en la literatura, han abordado el tema de las olas de calor, pero no se tiene una definición única y precisa de "calor extremo", ya que, al considerar la climatología de cada región o localidad, los eventos de calor pueden variar en intensidad, frecuencia y extensión. Sin embargo, se puede definir de manera general a los eventos de calor extremo como periodos de tiempo inusualmente cálidos, con variaciones en su duración y que se observan sobre un amplio territorio.

Estos eventos de calor extremo representan una amenaza para la salud a nivel mundial y para la productividad en diversos sectores, entre los que se encuentran ganadería, agricultura, recursos forestales, servicios de salud, suministro de agua potable, suministro de energía eléctrica y transporte, entre otros (Herrera-Alanis, 2012).

Puesto que no existe un método único para definir al calor extremo, algunos autores han utilizado diversas definiciones, entre los que se encuentran:

- García-Cueto et al. (2009) definieron ola de calor en Mexicali como un periodo en que la temperatura máxima diaria excede el percentil 90 (44°C) por un mínimo de dos días consecutivos.
- Espinoza-Tamarindo (2013) definió una ola de calor cuando se observan periodos consecutivos de dos o más días en los que las temperaturas excedían el percentil 90.
- WMO TT-DEWCE (2015) define "ola de calor" como la región que persiste durante al menos dos días consecutivos con condiciones térmicas registradas por encima de los umbrales determinados.
- La Agencia Española de Meteorología (AEMET 2017), considera "ola de calor" a un episodio de al menos tres días consecutivos, en que como mínimo el 10% de las estaciones consideradas registran máximas por encima del percentil 95.

No obstante, de acuerdo con TT-DEWCE (2015), estos métodos pueden clasificarse en dos grandes grupos: categorización de umbral (cálculo de percentiles) y los índices derivados, que a su vez se clasifican en índices climáticos e índices de confort.

Con el fin de insertar información cuantitativa sobre el tema, esta investigación tiene como objetivo principal proponer una metodología que permita, a partir de los datos de temperatura máxima observados, la identificación de los eventos de calor extremo en el estado de Veracruz, tanto para datos históricos como para datos en tiempo real. Sin embargo, dado que la mayor disponibilidad de datos corresponde a la variable de temperatura máxima, se utilizará el enfoque de cálculo de umbrales con base de percentiles.

2. Datos

Los datos utilizados en este estudio son las series de tiempo de temperatura máxima diaria de los meses de marzo a septiembre para un periodo de aproximadamente 30 años (1981-2010). Estos datos fueron tomados de la base de datos climatológica nacional administrada con el sistema CLICOM (CLIma COMputarizado) en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) perteneciente a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Dado que este análisis propone desarrollar una metodología para el monitoreo del calor extremo,

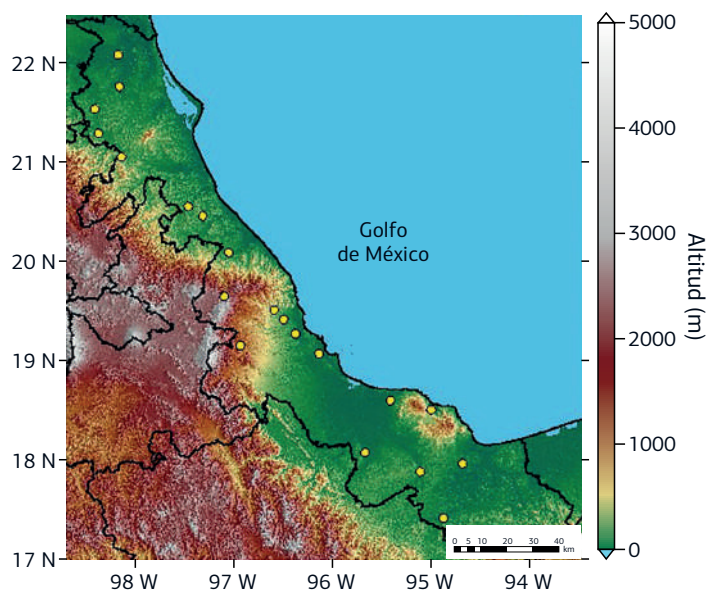


FIGURA 1. Estaciones climatológicas representativas para el análisis (puntos amarillos).

TABLA 1. Estaciones climatológicas seleccionadas para el análisis de calor extremo.

| Nº. | Clave | Nombre | Municipio | Longitud | Latitud | Altitud |
|-----|-------|--------------------------------|----------------------|------------|-----------|---------|
| 1 | 30003 | Actopan | Actopan | -96.611107 | 19.502777 | 250 |
| 2 | 30011 | Ángel R. Cabada | Ángel R. Cabada | -95.44722 | 18.597223 | 28 |
| 3 | 30013 | Azueta | José Azueta | -95.699997 | 18.075001 | 21 |
| 4 | 30056 | El Tejar | Medellín | -96.158333 | 19.067223 | 10 |
| 5 | 30068 | Los Ídolos | Actopan | -96.516388 | 25.032223 | 100 |
| 6 | 30077 | Jáltipan De Morelos | Jaltipan | -94.722221 | 17.96389 | 66 |
| 7 | 30090 | Las Perlas | Jesus Carranza | -94.913887 | 17.416666 | 22 |
| 8 | 30093 | Loma Fina | Paso De Ovejas | -96.393333 | 19.262501 | 30 |
| 9 | 30102 | Martínez de La Torre (DGE) | Martínez De La Torre | -97.063889 | 20.079168 | 89 |
| 10 | 30125 | Papantla | Papantla | -97.324997 | 20.445833 | 190 |
| 11 | 30130 | Platón Sánchez | Platón Sánchez | -98.373055 | 21.271944 | 57 |
| 12 | 30132 | Poza Rica | Poza Rica De Hidalgo | -97.472778 | 20.540833 | 50 |
| 13 | 30147 | San Juan Evangelista (DGE) | San Juan Evangelista | -95.145828 | 17.883333 | 18 |
| 14 | 30176 | Tempoal De Sánchez | Tempoal | -98.410278 | 21.518888 | 34 |
| 15 | 30180 | Terrerillos | Chicontepec | -98.141106 | 25.335556 | 138 |
| 16 | 30211 | Las Vigas | Las Vigas De Ramírez | -97.109718 | 21.038055 | 2426 |
| 17 | 30285 | Pánuco (DGE) | Pánuco | -98.175552 | 22.059166 | 11 |
| 18 | 30294 | Sontecomapan | Catemaco | -95.035553 | 18.504168 | 11 |
| 19 | 30304 | Presa Paso de Piedras Chicayan | Pánuco | -98.160835 | 21.7425 | 40 |
| 20 | 30342 | Centro Regional Huatusco | Huatusco | -96.949997 | 19.146667 | 1186 |

se identificó un subconjunto de datos con información necesaria y suficiente tanto histórica como en tiempo real. El subconjunto seleccionado consiste en 20 sitios de observación que cumplen los siguientes criterios:

1. sitios que reportan información en tiempo real en el Sistema de Información Hidrológica (SIH) de CONAGUA;
2. sitios con un registro histórico de por lo menos treinta años;
3. series de datos sin más del 15% de datos faltantes en el período 1981-2010.

Estos sitios se encuentran razonablemente distribuidos a lo largo del territorio veracruzano (Figura 1 y Tabla 1).

3. Metodología

3.1. Categorización de umbrales de calor extremo con percentiles

De acuerdo con Wilks (2016), un percentil es un número que, teniendo las mismas unidades que los

datos, excede una proporción de los datos p , tal que $0 \leq p \leq 1$; es decir, la muestra o población se divide en 100 partes iguales, por lo que cada percentil p_i con $i=1, \dots, 100$, contiene el 1% de las observaciones.

Con base en las recomendaciones de McGregor et al. (2015), en esta investigación se han determinado –a partir de las observaciones de temperatura máxima– los percentiles 90 y 95 (P90 y P95) para definir los umbrales y evaluar las frecuencias de incidencia de calor extremo a lo largo del estado de Veracruz; incluyendo en el análisis también al percentil 99 (P99) con la finalidad de caracterizar los eventos más extremos.

Con los datos obtenidos de temperatura máxima de los veinte sitios de observación seleccionados, se llevó a cabo un análisis a nivel mensual y estacional para evaluar los tres percentiles (90, 95 y 99), a partir de las series de tiempo de datos diarios para cada mes y/o estación del año. Los percentiles fueron calculados mediante la siguiente expresión:

$$P_k = L_i + \frac{1}{f_i} \left(\frac{kN}{100} - f_a \right) \quad (1)$$

TABLA 2. Identificación de eventos de calor extremo en El Tejar para el mes de marzo durante el año 1991.

| Año | Día | T. Max | Percentil 90 | Percentil 95 | Percentil 99 |
|------|-----|--------|--------------|--------------|--------------|
| 1991 | 1 | 39.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 2 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 3 | 39.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 4 | 28.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 5 | 31.5 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 6 | 35.5 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 7 | 33.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 8 | 30.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 9 | 38.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 10 | 26.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 11 | 30.5 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 12 | 31.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 13 | 32.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 14 | 33.5 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 15 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 16 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 17 | 34.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 18 | 28.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 19 | 31.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 20 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 21 | 37.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 22 | 41.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 23 | 31.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 24 | 32.5 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 25 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 26 | 35.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 27 | 37.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 28 | 39.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 29 | 28.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 30 | 30.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |
| 1991 | 31 | 26.0 | 34.5 | 36.0 | 39.5 |

TABLA 3. Número de casos de calor extremo en El Tejar para el mes de marzo de 1991 acuerdo a varios percentiles y números de días consecutivos.

| Año | Días consecutivos 2 días | | | 3 días | | | 4 días | | | 5 días | | | ≥ 6 días | | | |
|------|--------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|--------|-----|-----|----------|-----|-----|-----|
| | Percentil | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 |
| 1981 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1991 | | 1 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1992 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2010 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Donde k es el porcentaje de casos del percentil, L_i es el límite inferior del valor donde se encuentra el percentil, f_i es la frecuencia del valor donde se encuentra el percentil, N es el total de observaciones y f_a es la frecuencia acumulada hasta el límite inferior del valor donde se encuentra el centil.

Posteriormente, con los umbrales de temperatura (P90, P95 y P99) obtenidos para cada mes, fue posible cuantificar las frecuencias de casos de calor extremo por cada año del período de estudio (1981-2010).

De acuerdo con lo indicado por la OMM (WMO TT-DEWCE, 2015) en su definición de ola de calor, se consideró como tal todos los casos en que la temperatura máxima fuese igual o estuviese por encima del valor del umbral definido (un percentil dado, en este caso), por al menos dos días consecutivos, obteniendo como resultado un número total de casos por mes para cada percentil y para diversos números de días consecutivos (2, 3, 4, 5 o más), como ejemplifican las Tablas 2 y 3.

Una vez cuantificadas las frecuencias de los eventos de calor extremo, con distintos umbrales y duraciones, se procedió a realizar la climatología del número de eventos de calor extremo para cada sitio de observación,

TABLA 4. Ejemplo del cálculo de climatología de calor extremo (marzo a septiembre) para El Tejar con base en los umbrales del percentil 90 para dos días consecutivos.

| Año | Percentil 90 2 Días consecutivos | | | | | | | | Total |
|-----------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-------|
| | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | | |
| 1981 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | |
| 1982 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 1983 | 0 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 7 | |
| 1984 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 6 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 2010 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 | |
| Promedio | | | | | | | | 4 | |

obteniendo los promedios del total de eventos de calor extremo de marzo a septiembre en el período de 1981 a 2010, para cada percentil y número de días consecutivos. Por ejemplo, en la estación El Tejar, en el año 1981 con el percentil 90 y para dos días consecutivos se identificaron 0 casos en marzo, 0 en abril, 1 en mayo, 0 en junio, 0 en julio, 1 en agosto y 0 en septiembre, dando un total de 2 casos en 1981. Aplicando las mismas condiciones para todos los años, se obtienen 30 diferentes totales y la climatología (4 eventos en El Tejar) (Tabla 4).

3.2. Comparación de los umbrales de calor extremo con un caso reciente

Con fines de validar los umbrales de calor extremo determinados con el método de percentiles, se realizó un análisis del desempeño de dichos umbrales para un evento de calor extremo recientemente observado en el estado de Veracruz (27 al 31 de mayo de 2018), identificado por la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz (CEPM-SPCVer). Para ello, se llevó a cabo también la comparación cuantitativa entre los umbrales obtenidos con base en percentiles y los valores temperatura máxima observados durante los días del evento reciente, con el fin de identificar si dicho evento

superaba o igualaba los valores de temperatura (°C) correspondiente a los percentiles P90, P95 y/o P99 para ser considerados como evento de calor extremo.

4. Resultados

4.1. Umbrales de temperatura

En la Tabla 5 se muestran los valores puntuales obtenidos mediante el cálculo de los percentiles 90, P95 y P99 de cada mes para cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas. Se observan que los valores más altos se encuentran en P99, ya que corresponden al 1% de la muestra de las series de temperaturas máximas (es decir, las extremadamente altas) mientras que, en P90 y P95 se encuentran el 10% y el 5% de los valores más altos de la muestra, respectivamente.

Con el fin de visualizar el patrón de distribución geográfica de los percentiles, se elaboraron mapas con los umbrales de temperatura obtenidos de acuerdo al mes (marzo-septiembre) para el estado de Veracruz. A modo de ejemplo, en la Figura 2, se visualizan los umbrales de temperatura para los percentiles 90, 95 y 99 correspondientes al mes de mayo. En ella se muestra que con el percentil 90 (Figura 2a)

TABLA 5. Valores de temperatura (°C) correspondiente a los percentiles para los meses de marzo-septiembre durante el periodo de 1981-2010.

| Estación | Mar | | | Abr | | | May | | | Jun | | | Jul | | | Ago | | | Sep | | |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 | P90 | P95 | P99 |
| Actopan | 35.0 | 36.0 | 38.5 | 37.0 | 38.0 | 39.5 | 37.5 | 38.4 | 40.0 | 36.7 | 38.0 | 39.0 | 35.1 | 36.0 | 37.0 | 35.5 | 36.0 | 37.0 | 35.5 | 36.0 | 37.0 |
| Ángel Cabada | 36.0 | 37.0 | 39.0 | 38.0 | 39.0 | 40.5 | 38.5 | 39.5 | 41.0 | 37.1 | 38.0 | 40.0 | 35.0 | 36.0 | 37.0 | 35.0 | 35.5 | 36.5 | 35.0 | 35.5 | 36.5 |
| Azueta | 38.4 | 39.0 | 41.0 | 41.0 | 41.5 | 42.5 | 41.0 | 42.0 | 43.0 | 39.0 | 40.0 | 41.7 | 36.0 | 37.0 | 38.0 | 36.0 | 36.5 | 37.5 | 36.0 | 36.5 | 38.0 |
| El Tejar | 34.5 | 36.0 | 39.5 | 37.0 | 39.0 | 41.0 | 38.0 | 39.0 | 41.0 | 36.0 | 37.5 | 40.0 | 34.6 | 35.0 | 37.0 | 34.0 | 35.0 | 35.5 | 34.0 | 35.0 | 36.0 |
| Los Ídolos | 36.5 | 38.0 | 41.0 | 38.5 | 40.0 | 42.4 | 39.2 | 40.0 | 42.5 | 38.0 | 39.0 | 41.0 | 36.0 | 37.0 | 38.5 | 37.0 | 37.5 | 38.7 | 36.5 | 37.0 | 39.0 |
| Jaltipán | 37.5 | 38.0 | 39.0 | 39.0 | 40.0 | 41.0 | 40.0 | 40.0 | 42.0 | 38.5 | 39.0 | 41.0 | 36.0 | 37.0 | 38.5 | 36.0 | 36.5 | 37.5 | 35.0 | 36.0 | 37.0 |
| Las Perlas | 35.5 | 36.5 | 39.0 | 38.0 | 38.5 | 40.0 | 39.0 | 39.5 | 41.5 | 38.0 | 39.0 | 40.5 | 36.5 | 37.5 | 39.0 | 36.0 | 37.0 | 39.0 | 36.0 | 37.0 | 38.5 |
| Loma Fina | 35.0 | 36.0 | 39.0 | 37.0 | 38.0 | 40.0 | 37.0 | 38.4 | 40.6 | 36.5 | 37.5 | 39.0 | 34.7 | 35.0 | 36.3 | 35.0 | 35.0 | 36.0 | 35.0 | 35.0 | 36.0 |
| Martínez | 33.5 | 35.0 | 38.5 | 36.0 | 37.5 | 40.0 | 37.5 | 38.0 | 40.5 | 37.5 | 38.0 | 40.0 | 36.5 | 37.0 | 38.0 | 36.5 | 37.0 | 38.5 | 35.5 | 36.5 | 38.0 |
| Papantla | 33.0 | 34.0 | 37.0 | 36.0 | 37.0 | 39.0 | 37.0 | 38.0 | 39.9 | 36.5 | 37.5 | 39.5 | 36.0 | 36.5 | 37.5 | 35.5 | 36.0 | 37.5 | 35.0 | 36.0 | 37.6 |
| Platón | 37.0 | 38.5 | 42.2 | 40.0 | 41.5 | 44.3 | 41.0 | 42.0 | 44.0 | 40.0 | 41.0 | 42.8 | 38.0 | 38.5 | 40.0 | 38.0 | 39.0 | 40.5 | 37.5 | 38.0 | 39.5 |
| Poza Rica | 35.5 | 36.5 | 39.4 | 38.0 | 39.0 | 42.0 | 39.5 | 40.5 | 42.5 | 39.0 | 40.0 | 41.0 | 37.5 | 38.0 | 39.0 | 37.0 | 38.0 | 38.5 | 37.0 | 37.5 | 38.7 |
| San Juan | 36.0 | 37.0 | 38.5 | 38.0 | 39.0 | 40.0 | 39.0 | 40.0 | 41.0 | 38.0 | 39.0 | 41.0 | 35.1 | 36.0 | 37.0 | 35.0 | 35.5 | 36.0 | 35.0 | 35.5 | 36.5 |
| Tempoal | 36.0 | 38.0 | 41.0 | 38.5 | 40.5 | 43.3 | 39.5 | 40.5 | 44.0 | 39.0 | 40.0 | 42.0 | 37.0 | 37.6 | 39.0 | 37.5 | 38.0 | 39.0 | 36.5 | 37.0 | 39.0 |
| Terrerillos | 34.5 | 36.5 | 39.5 | 37.5 | 39.0 | 42.0 | 38.5 | 40.0 | 43.0 | 38.5 | 39.5 | 41.0 | 35.5 | 36.5 | 37.6 | 36.0 | 36.5 | 37.5 | 35.0 | 35.5 | 38.2 |
| Las Vigas | 24.0 | 25.0 | 27.0 | 26.0 | 27.0 | 29.0 | 27.0 | 28.0 | 30.0 | 25.0 | 26.0 | 28.0 | 22.0 | 23.0 | 24.0 | 22.0 | 23.0 | 24.0 | 22.0 | 22.0 | 24.0 |
| Pánuco | 34.0 | 35.0 | 39.0 | 36.0 | 38.0 | 42.0 | 37.0 | 38.5 | 41.5 | 38.0 | 38.5 | 40.0 | 36.0 | 37.0 | 38.0 | 37.0 | 38.0 | 38.5 | 36.0 | 37.0 | 38.0 |
| Sontecomapan | 34.0 | 35.0 | 36.5 | 36.0 | 37.0 | 39.5 | 36.0 | 37.6 | 39.0 | 34.5 | 36.0 | 39.0 | 32.5 | 33.5 | 34.5 | 32.5 | 33.0 | 34.2 | 33.0 | 33.5 | 35.0 |
| Presa Paso | 34.0 | 36.0 | 38.2 | 37.0 | 38.0 | 41.0 | 38.0 | 39.0 | 41.0 | 37.1 | 38.5 | 40.5 | 36.0 | 37.0 | 38.0 | 36.0 | 37.0 | 39.0 | 35.0 | 36.0 | 38.0 |
| Huatusco | 28.0 | 29.5 | 31.5 | 30.0 | 31.0 | 33.0 | 29.3 | 30.5 | 33.0 | 28.0 | 29.0 | 30.8 | 26.0 | 26.5 | 28.0 | 26.0 | 26.5 | 28.0 | 26.0 | 26.5 | 27.3 |

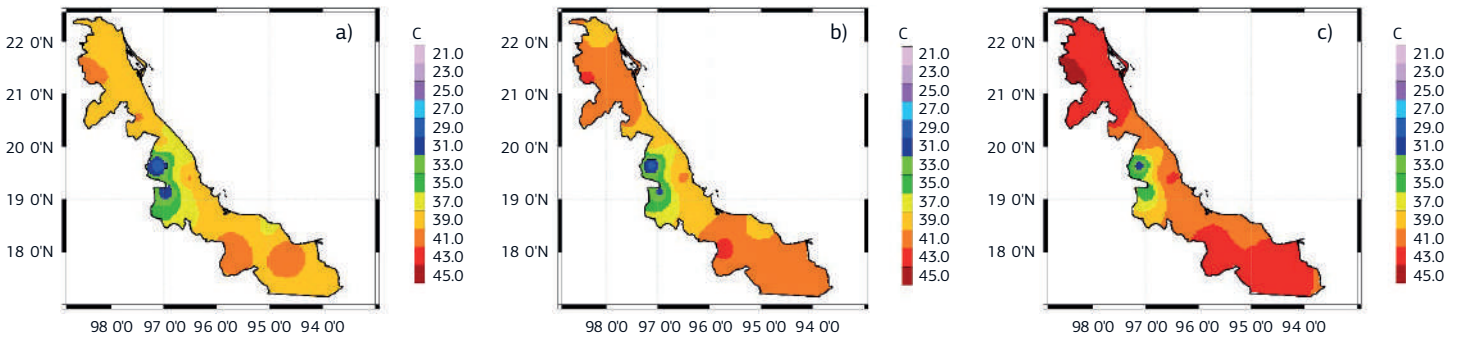


FIGURA 2. Temperatura máxima (°C) correspondiente a los percentiles P90 (a), P95 (b) y P99 (c) para el mes de mayo.

los umbrales de temperatura máxima predominantes se encuentran entre los 37° y 39°C, mientras que, con el percentil 95 este oscila entre los 39-41°C (Figura 2b). En el caso del percentil 99, el umbral predominante se encuentra entre los 41° y 43°C (Figura 2c).

De manera general, en los mapas generados para cada mes, se puede observar que umbrales más bajos de temperatura máxima se encuentran en la zona montañosa central del estado. Estos oscilan entre los 21 °C y 33 °C, aunque se encuentran con mayor acentuación en los meses de marzo, julio, agosto y septiembre.

También es posible notar que los umbrales de temperatura más altos se encuentran en mayo, independientemente del percentil estimado, seguido de abril y junio, aunque con intensidades menores, esto debido a que corresponden a los meses más calurosos del año para esta región.

4.2. Climatología de eventos de calor extremo

Con los umbrales identificados, se determinaron las climatologías para cada temporada cálida, con el fin de determinar el número de eventos de calor extremo que ocurren en promedio de marzo a septiembre; estos valores climatológicos (1981-2010) presentan el valor promedio de eventos de calor extremo para cada uno de los 20 sitios de observación con base en los umbrales de los percentiles 90 y 95 y 99 y el número de días consecutivos (dos, tres, cuatro, cinco o más días consecutivos). Cabe señalar que, aunque se realizó la climatología para el percentil 95 y 99, no se muestran ya que los valores promedios fueron cero en la mayoría de los casos.

La Figura 3, muestra que para el percentil 90, en promedio ocurren entre dos y tres eventos, al menos durante dos días consecutivos por temporada, en la mayoría de los sitios de medición, a excepción de la

estación *El Tejar* donde el valor promedio es de cuatro eventos (Figura 3a).

Con respecto a los eventos con duración de tres días consecutivos, se muestra que el número normal de eventos es de uno con excepción de la estación Las Perlas donde el valor es cero (Figura 3b); por el contrario, en los

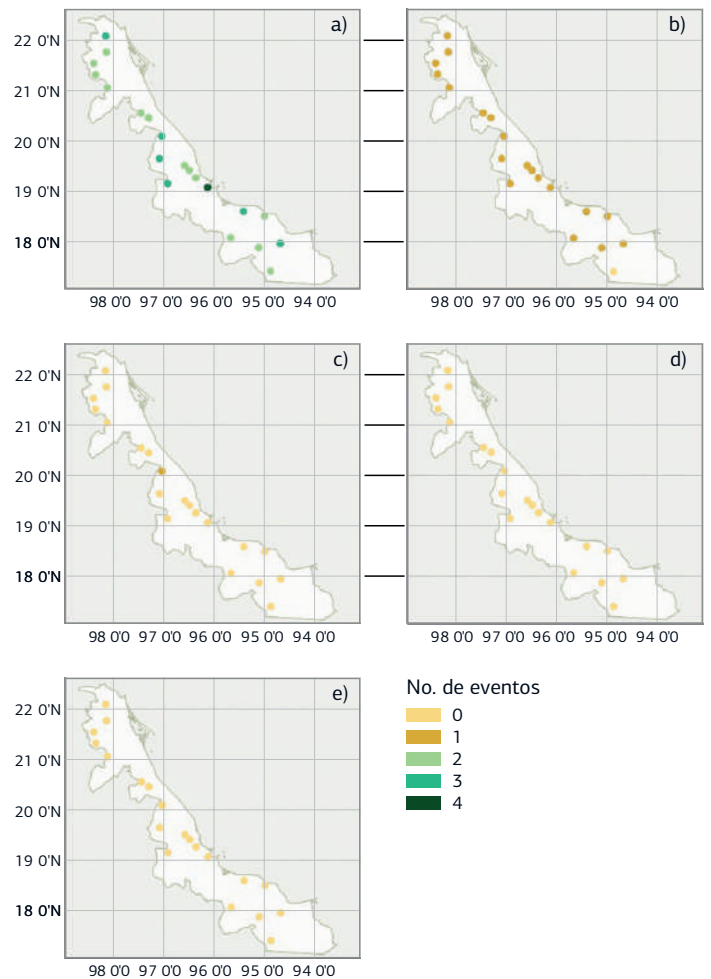


FIGURA 3. Climatología de eventos de calor extremo con el percentil 90 para dos (a), tres (b), cuatro (c), cinco (d) o más (e) días consecutivos.

eventos de cuatro días consecutivos (Figura 3c) sólo la estación Martínez de la Torre indica un valor promedio de uno mientras que el resto cero. En los casos de cinco o más días consecutivos, lo normal es que no ocurran este tipo de eventos en ninguna de las estaciones (Figura 3d-e).

4.3. Comparación de umbrales con un caso reciente (27-31 de mayo del 2018)

En la Tabla 6 se muestran los umbrales de temperatura máxima para calor extremo identificados por medio de

TABLA 6. Valores registrados del 27 al 31 de mayo del 2018 en algunos sitios de observación comparados con los umbrales de calor extremo por percentiles.

| Estación | Día | Registro | P90 | P95 | P99 | Normal |
|----------------------|--------|----------|------|------|------|--------|
| Poza Rica | 27-may | 33 | 39.5 | 40.5 | 42.5 | 35.7 |
| | 28-may | 32 | | | | |
| | 29-may | 33 | | | | |
| | 30-may | 37 | | | | |
| | 31-may | 37 | | | | |
| Pánuco | 27-may | 37.4 | 37.0 | 38.5 | 41.5 | 34.2 |
| | 28-may | - | | | | |
| | 29-may | 36.8 | | | | |
| | 30-may | 36.6 | | | | |
| | 31-may | 36.7 | | | | |
| Papantla | 27-may | - | 37.0 | 38.0 | 39.9 | 33.2 |
| | 28-may | 29 | | | | |
| | 29-may | 30 | | | | |
| | 30-may | 30 | | | | |
| | 31-may | 30 | | | | |
| El Tejar | 27-may | 35 | 38 | 39 | 41 | 33.7 |
| | 28-may | 36 | | | | |
| | 29-may | 36 | | | | |
| | 30-may | 36 | | | | |
| | 31-may | 37 | | | | |
| Las Vigas | 27-may | 21 | 27 | 28 | 30 | 23 |
| | 28-may | 23 | | | | |
| | 29-may | 23.5 | | | | |
| | 30-may | 26.5 | | | | |
| | 31-may | 26.5 | | | | |
| Ángel R. Cabada | 27-may | 32.5 | 38.5 | 39.5 | 41 | 34.8 |
| | 28-may | 34.5 | | | | |
| | 29-may | 33.5 | | | | |
| | 30-may | 34.5 | | | | |
| | 31-may | 35 | | | | |
| San Juan Evangelista | 27-may | 34.5 | 39 | 40 | 41 | 35.8 |
| | 28-may | 36.5 | | | | |
| | 29-may | 37 | | | | |
| | 30-may | 36.5 | | | | |
| | 31-may | 37 | | | | |
| Azueta | 27-may | 35 | 41.0 | 42.0 | 43.0 | 37.1 |
| | 28-may | - | | | | |
| | 29-may | 36 | | | | |
| | 30-may | 37 | | | | |
| | 31-may | 38 | | | | |
| Tempoal | 27-may | 39.4 | 39.5 | 40.5 | 44.0 | 35.5 |
| | 28-may | 39.3 | | | | |
| | 29-may | 39.3 | | | | |
| | 30-may | 38.6 | | | | |
| | 31-may | 39.6 | | | | |
| Martínez de la Torre | 27-may | 36 | 37.5 | 38.0 | 40.5 | 33.8 |
| | 28-may | 32 | | | | |
| | 29-may | 36 | | | | |
| | 30-may | 37 | | | | |
| | 31-may | 38 | | | | |
| Platón | 27-may | 37.9 | 41.0 | 42.0 | 44.0 | 36.7 |
| | 28-may | - | | | | |
| | 29-may | 37.3 | | | | |
| | 30-may | 36.9 | | | | |
| | 31-may | 38.4 | | | | |
| Ídolos | 27-may | 33 | 39.2 | 40 | 42.5 | 35.6 |
| | 28-may | 35 | | | | |
| | 29-may | 34 | | | | |
| | 30-may | 34 | | | | |
| | 31-may | 34 | | | | |
| Actopan | 27-may | 32.5 | 37.5 | 38.4 | 40.0 | 34.4 |
| | 28-may | 33 | | | | |
| | 29-may | 33 | | | | |
| | 30-may | 33.5 | | | | |
| | 31-may | 34.5 | | | | |
| Las Perlas | 27-may | - | 39 | 39.5 | 41.5 | 35.1 |
| | 28-may | 41 | | | | |
| | 29-may | 41.5 | | | | |
| | 30-may | 38 | | | | |
| | 31-may | 39 | | | | |
| Sontecomapan | 27-may | 33 | 36.0 | 37.6 | 39.0 | 32 |
| | 28-may | 34 | | | | |
| | 29-may | 35 | | | | |
| | 30-may | 35 | | | | |
| | 31-may | 36 | | | | |

percentiles en este estudio con los datos de temperatura máxima registrados por el Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC-CONAGUA) durante el evento reciente (en mayo 2018) con el fin de analizar si los umbrales detectan el evento en términos cuantitativos y si numéricamente su intensidad corresponde a la gran difusión mediática que recibió.

De la tabla anterior, se observa que con base en el método de los percentiles y de acuerdo al número de días consecutivos que recomienda la OMM (mínimo 2), objetivamente sólo la estación de *Las Perlas* presentó un evento de calor extremo, donde la temperatura máxima estuvo por arriba del percentil 90 y 95 e igualó al percentil 99 durante dos días consecutivos (indicado en rojo). Con respecto a las demás estaciones, las temperaturas máximas registradas, pese a que fueron relativamente altas, no lograron superar y/o igualar ninguno de los tres umbrales en días consecutivos y otros se encontraron por debajo de su climatología mensual.

5. Conclusiones

Después de realizar el análisis correspondiente de calor extremo para el estado de Veracruz, se llegó a las siguientes conclusiones:

Se considera como evento de calor extremo todos los casos en que la temperatura máxima supere o iguale los umbrales obtenidos con los percentiles 90, 95 y/o 99 por al menos dos días consecutivos.

Es posible aplicar umbrales de temperatura máxima para identificar y monitorear el calor extremo a partir de los datos de temperatura máxima históricos para el Estado de Veracruz utilizando el método de cálculo de percentiles, lo cual requiere utilizar una combinación de los sitios con observaciones históricas y de los sitios que reportan observaciones en tiempo real.

La determinación de umbrales para la región de Veracruz mostró que, independientemente del percentil que se tratara, los umbrales de temperatura son más altos en mayo, por lo cual se considera uno de los meses más calurosos del año para la región de Veracruz.

En promedio, el mayor número de eventos de calor extremo tienen una duración de dos días para el percentil 90. Los eventos con mayor duración presentaron en su mayoría valores promedios del orden de uno y cero eventos.

Aunque sólo en una de veinte estaciones se detectó el evento de calor extremo difundido por CEPM-SPCVer,

es factible implantar un sistema inicial de alerta temprana, basada en percentiles de temperatura máxima, que funcione como indicador o precursor de posibles eventos de calor extremo. Sin embargo, para una mejor evaluación en términos de afectación en la salud humana, se requiere utilizar índices de confort, los cuales se encuentran ligados a la humedad relativa y al viento. No obstante, este enfoque requiere mejoras significativas en la cobertura de la red de observación de la humedad ya que el estado sólo cuenta con cinco puntos de medición para dichas variables.

RESUMEN CURRICULAR

CITLALI VILLA FALFÁN. Licenciada en Ciencias Atmosféricas por la Universidad Veracruzana. Miembro de la Red de Desastres asociados a Fenómenos Meteorológicos y Climáticos (REDESClim) del CONACYT. Desarrolló las bases para el Sistema de Alerta Temprana ante calor extremo en el estado de Veracruz en colaboración con la Universidad de Arizona y la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz; anteriormente participó en la investigación sobre el uso del índice estandarizado de precipitación (SPI) para monitoreo de la sequía en las cuencas del Tuxpan al Jamapa. Actualmente es consultora asociada a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento “Datos, predicción y servicios climáticos” de la Universidad Veracruzana, en donde he participado en el proyecto que se realiza en colaboración con la Agencia Alemana para el Desarrollo GIZ México. (citlalivf95@gmail.com)

JORGE LUIS VÁZQUEZ AGUIRRE. Realizó estudios de posgrado en la UNAM, en el Reino Unido y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Miembro de la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial (Grupos de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático, ETCCDI y Grupo de Tarea para implementar el Marco Mundial de Servicios Climáticos). Miembro de la Red de Desastres asociados a Fenómenos de origen Hidrometeorológico y Climático REDESCLIM-CONACYT. Fue Gerente de Información Meteorológica de AGROASEMEX, S.A., y Director de Pronóstico a Mediano Plazo del Servicio Meteorológico Nacional. Consultor de agencias nacionales e internacionales. Académico de la Universidad Veracruzana en Cs. Atmosféricas donde fundó la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento “Datos, predicción y servicios

climáticos”. Colaborador del Proyecto Mesoamérica y de la Alianza de Servicios Climáticos de Norteamérica.(J.ClimSci@gmail.com)

ÓSCAR SÁNCHEZ MARTÍNEZ. Consultor independiente. Miembro de la Red para la reducción de Desastres de origen Hidrometeorológico y Climático (REDESCLIM) del CONACYT. Asociado a la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento “Datos, predicción y servicios climáticos” de la Universidad Veracruzana. Anteriormente fue consultor en calidad y optimización de datos climáticos, FONDEN y pronóstico estacional, destacando el procesamiento y visualización de datos climáticos para uso operacional en monitoreo. Además, fue consultor especialista en hidrometeorología en la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua (con sede en Xalapa).lcaossanchez@gmail.com

BIBLIOGRAFIA

- Agencia Estatal de Meteorología. (2017). Olas de calor en España desde 1975: Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. Extraído el 12 de julio del 2017 desde <http://www.aemet.es/>.
- Espinoza-Tamarindo, B. E. (2013). Variabilidad de las ondas de calor observadas en el Noroeste de México (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.
- García Cueto, R. O., Martínez, A. T., y Ostos, E. J. (2009). Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*, 54(4), 335-345. doi:10.1007/s00484-009-0283-7.
- Herrera-Alanís, J. L. (2012). Análisis de las olas de calor en la república mexicana (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México.
- McGregor, G. R., Bessemoulin, P., Ebi, K. L. y Menne, B. (2015). Heatwaves and health: guidance on warning-system development. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. 76 pp.
- National Integrated Heat Health Information System (NIHHIS) (2017). Consultado en <https://toolkit.climate.gov/nihhis/>.
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Second Ed. International Geophysics Series Vol. 91. ELSEVIER. 24-25 pp.
- WMO TT-DEWCE. (2015). Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Extraído el 28 de mayo del 2018, desde <https://www.wmo.int>.

@