



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

**DIAGNÓSTICO DE LAS ONDAS DE CALOR DURANTE EL PERIODO DE 1980-2014 EN**  
**YUCATÁN, MÉXICO**

**TESIS**  
**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**JOSÉ ALBERTO ZAMORA SALVADOR**

**TUTORA:**  
**DRA. RUTH CERZO MOTA, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**SISAL, YUCATÁN, MÉXICO. MAYO 2018**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Ojeda Casillas Elena  
Secretario: Dr. Appendini A. Christian M.  
Vocal: Dra. Cerezo Mota Ruth  
1<sup>er</sup>. Suplente: Dra. Allende Arandía María Eugenia  
2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Méndez Pérez Juan Matías

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, LIPC-UNAM Sisal, Yucatán, México.

**TUTOR DE TESIS:**  
**DRA. RUTH CEREZO MOTA**

---

FIRMA



# ABSTRACT

In the current work, we analyze extreme temperature events known as Heat Waves (HW), these are calculated for maximum (tmax) and minimum temperature (tmin) over the Yucatan state. To do this, daily data from 17 climatological stations were used, these stations belong to the National Water Commission (CONAGUA), with data recorded over 35 years (from 1980 to 2014), to which a quality control, homogeneity test and group analysis were applied, the last one to identify which stations had a similar behavior with respect to temperature. The main objective was to establish an adequate criterion to define a HW, and identify their duration patterns, intensity and frequency over the state. To evaluate the behavior of the temperature in each one of the sites, the data was separated (by decades) and submitted to a statistical test (Wilcoxon rank sum) to determine if each decade has to be treated as an independent sample.

Decadal extreme values (p95 decadal) and annual extreme values (p95 annual) were calculated for each one of these periods, based on the criteria of probability proposed by the IPCC (2007). Finally, with the decadal threshold (p95 decadal) hot years were identified (years where the value of the annual p95 was equal or higher than the value of the decadal p95) as well as hot days (tmax) and hot nights (tmin) (i.e., with temperature equal or higher than the value of the decadal p95). Results shown that, the variation of the annual extremal value is greater for the tmin, in 15 of the studied sites there was a considerable number of hot years, while for the tmax only in 10 of these sites a considerable number of hot years was recorded.

A HW for Yucatan is defined as: a consecutive period of four days (or more) with temperatures equal or higher than the decadal extreme value (p95 decadal). These events represent over 20% of the total HW registered in the last 35 years. The HW intensity can be ranked as medium and does not shown changes throughout the period analyzed. The frequency of this events is larger during the months of may and june, with an occurrence over the 28% for tmax, and 18% for tmin. In terms of its duration (i.e., how many days it last), HW with period equal to four and five consecutive days are the most frequent, representing more than 20% of events per decade.

# RESUMEN

En este trabajo se analizan los eventos extremos de temperatura conocidos como ondas de calor (HW), para la temperatura máxima ( $t_{max}$ ) y mínima ( $t_{min}$ ), en el estado de Yucatán. Para ello, se utilizaron datos diarios de 17 estaciones climatológicas pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con un registro temporal de 35 años (1980-2014); a los cuales se les aplicó un control de calidad, una prueba de homogeneidad y, un análisis de grupos para identificar a los sitios con un comportamiento de temperatura similar. El objetivo principal de este estudio, fue establecer un criterio adecuado para poder definir las HW, así como sus patrones de duración, intensidad y frecuencia en el estado. Para poder evaluar el comportamiento de la temperatura en cada uno de estos sitios, los registros de datos fueron divididos (décadas) y sometidos a una prueba estadística (suma de los rangos de Wilcoxon); para determinar si cada década podría considerarse como una muestra independiente.

Los valores extremales decadales ( $p_{95}$  decadal) y anuales ( $p_{95}$  anual) fueron calculados para cada uno de estos periodos, con base en el criterio de probabilidad propuesto por el IPCC (2007). Finalmente, con el umbral decadal ( $p_{95}$  decadal) se identificaron los años más cálidos (años en los que el valor anual del  $p_{95}$  igualaba o superaba el valor del  $p_{95}$  decadal, en la  $t_{max}$  y la  $t_{min}$ ) y días ( $t_{max}$ ) y noches ( $t_{min}$ ) cálidas (i.e., con temperatura igual o superior al valor del  $p_{95}$  decadal). Los resultados muestran que la variación del valor extremal anual es mayor para la  $t_{min}$ , ya que en 15 de las estaciones de estudio se presentó un número considerable de años cálidos, mientras que para la  $t_{max}$  tan solo en 10 sitios se registró un número considerable.

Para Yucatán una HW se puede definir como: un periodo de cuatro días (o más) consecutivos con temperatura igual o superior a su valor decadal extremal ( $p_{95}$  decadal). Estos eventos de cuatro días representan más del 20% del total de HW registradas en los últimos 35 años. Las HW presentaron una intensidad media (>40% del total de eventos registrados) para cada uno de los sitios analizados. La frecuencia de estos eventos es mayor durante los meses de mayo y junio, con más del 28% y 18% de ocurrencia en la  $t_{max}$  y la  $t_{min}$ , respectivamente. En cuanto a la persistencia, las HW con periodo de cuatro y cinco días son las más frecuentes, representando más del 20% de los eventos por década.

# CONTENIDO

<b>ABSTRACT</b>	<b>II</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b>X</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1.Ondas de calor (HW): algunas definiciones . . . . .	3
1.2.Antecedentes . . . . .	5
1.3.Planteamiento del problema . . . . .	6
1.4.Justificación . . . . .	7
1.5.Objetivos . . . . .	8
1.5.1.Objetivo generale . . . . .	8
1.5.2.Objetivos específicos . . . . .	8
<b>2.ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>9</b>
2.1.Descripción del área de estudios . . . . .	9
2.1.1.Orografía . . . . .	10
2.1.2.Clima . . . . .	11
<b>3.METODOLOGÍA</b>	<b>14</b>
3.1.Datos . . . . .	14
3.1.1.Control de calidad . . . . .	14
3.1.2.Generación de grupos . . . . .	19
3.2.Eventos extremos cálidos: ondas de calor . . . . .	20
3.2.1.Temperatura máxima y mínima por década . . . . .	20
3.2.2.Identificación de días cálidos: análisis del percentil 95 . . . . .	20
<b>4.RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	<b>22</b>
4.1.Clasificación en grupos . . . . .	22

4.2.Temperatura máxima y mínima promedio por década . . . . .	26
4.2.1.Temperatura máxima . . . . .	26
4.2.2.Temperatura mínima . . . . .	30
4.3.Variación decadal del percentil 95 . . . . .	32
4.3.1.Temperatura máxima . . . . .	32
4.3.2.Temperatura mínima . . . . .	33
4.4.Ondas de calor . . . . .	38
4.4.1.Duración . . . . .	38
4.4.2.Intensidad . . . . .	41
4.4.3.Frecuencia . . . . .	44
4.5.Persistencia . . . . .	49
<b>5.CONCLUSIONES</b>	<b>53</b>
<b>6.TRABAJO FUTURO</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>56</b>
Portales de interés revisados . . . . .	62
<b>ANEXOS</b>	<b>63</b>
<b>I.Generación de grupos</b>	<b>63</b>
<b>II.Variación del percentil 95</b>	<b>64</b>
<b>III.Ondas de calor</b>	<b>68</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Balance energético terrestre. Esquema conceptual de la interacción radiativa a través de la Tierra. Los valores indican la cantidad de energía absorbida o reflejada por las diferentes superficies sobre la Tierra en W/m <sup>2</sup> . Tomado de Ramanathan et al., (1989).	2
Figura 2.1. Ubicación geográfica del estado de Yucatán.	9
Figura 2.2. Localización de la Zona Intertropical en el mundo. La ZI se encuentra delimitada por líneas de color rojo; al norte colinda con el trópico de Cáncer y al sur con el trópico de Capricornio. Tomado de CONAGUA (2011).	10
Figura 2.3. Mapa climático del estado de Yucatán. Tomado de (Orellana et al. 2010).	12
Figura 2.4. Distribución media anual de a) temperatura (isotermas) y b) precipitación (isoyetas) sobre el estado de Yucatán. Tomado de Orellana et al. (2010).	13
Figura 3.1. Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas de CLICOM existentes en el estado de Yucatán. En color rojo se muestran las estaciones utilizadas en este trabajo.	15
Figura 3.2. Series a) original y b) homogeneizada de temperatura (°C) máxima para la estación de Chicxulub Puerto. Los puntos de quiebre se identifican en los días 07/09/1991, 28/09/2002 y 02/07/2004.	18
Figura 4.1. Clasificación de las estaciones climatológicas, los colores indican el grupo al que pertenece cada estación: región central (azul), región oeste (cian), región costera (amarillo) y región este (rojo).	23
Figura 4.2. Distribución espacial de las zonas urbanas y rurales del estado de Yucatán (en color negro) (Fuente de información: INEGI). En círculos de colores se muestra la clasificación de las estaciones climatológicas en grupos; región costera (amarillo), región central (azul), región este (rojo) y región oeste (cian); y con estrellas del mismo color, se presentan las estaciones utilizadas para describir los resultados en las secciones subsecuentes.	24
Figura 4.3. Comparación de la vegetación y uso de suelo para el estado de Yucatán (Fuente de información: CONABIO).	25
Figura 4.4. Temperatura máxima promedio por década para las estaciones a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color representan cada uno de los periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).	29
Figura 4.5. Temperatura mínima promedio por década para las estaciones a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color representan cada uno de los periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).	31

Figura 4.6. Promedio de a) días (tmax) y b) noches (tmin) calientes que igualan o superan el valor del percentil 95 decadal. Las barras de color indican los cuatro periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).	35
Figura 4.7. Variación del percentil 95 para la temperatura máxima para la estación de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color rojo representan el umbral de p95 de tmax por década y; las barras de color azul representan la variación anual.	36
Figura 4.8. Variación del percentil 95 para la temperatura mínima para la estación de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color rojo representan el umbral de p95 de tmax por década y; las barras de color azul representan la variación anual.	37
Figura 4.9. Frecuencia de eventos de HW para la temperatura a) máxima y b) mínima. En barras de color se indican la duración (en días) de las HW para el periodo de 1980-2014.	40
Figura 4.10. Número de eventos de las HW para la tmax por década para la estación de a) Holcá (región central), b) CIPAY (región oeste), C) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). En barras de color se muestra la frecuencia de eventos por mes para el periodo de 1980-2014.	47
Figura 4.11. Número de eventos de las HW para la tmin por década para la estación de a) Holcá (región central), b) CIPAY (región oeste), C) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). En barras de color se muestra la frecuencia de eventos por mes para el periodo de 1980-2014.	48
Figura 4.12. Persistencia de los eventos de HW de la tmax por década para las estaciones de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este).	51
Figura 4.13. Persistencia de los eventos de HW de latmin por década para las estaciones de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este).	52

# LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Estaciones climatológicas utilizadas para el análisis de datos de temperatura. . . . .	17
Tabla 4.1. Clasificación de las estaciones climatológicas en grupos. . . . .	22
Tabla 4.2. Principales elementos climáticos de los sitios analizados. Notaciones: tipo de clima $AW_0$ = cálido subhúmedo con lluvias en verano (0-60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal entre 5-10.2%); $AW_0(x')$ = cálido subhúmedo con lluvias en verano (<60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal del 5-10.2%); $AW_1(x')$ = cálido subhúmedo con lluvias en verano (<60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal mayor al 10.2%); $BS_0(h')(x')$ = árido cálido con lluvias intermedias en verano (con lluvia invernal mayor al 18%); TMA = temperatura media anual. Fuente de información CONABIO 2017. Flora: SBC = selva baja caducifolia; SMC = selva mediana caducifolia; SMSC = selva mediana subcaducifolia; SBC = selva baja caducifolia; SAP = selva alta perennifolia; VA = vegetación aparente; M = manglar; SMSP = selva mediana subperennifolia; SASP = selva alta subperennifolia. Fuente de información INAFED (2010). . . . .	25
Tabla 4.3. Estaciones utilizadas para mostrar los resultados del análisis de temperatura. . . . .	27
Tabla 4.4. Criterio de clasificación del índice de intensidad para los eventos de HW. . . . .	41
Tabla 4.5. Eventos de HW registrados por década para el periodo de 1980-2014, clasificados con base en el IIOC como eventos de (B) baja, (M) media y (A) alta intensidad. . . . .	43
Tabla 4.6. Estimación de eventos de HW en la $t_{max}$ por periodo analizado. . . . .	45
Tabla 4.7. Estimación de eventos de HW en la $t_{min}$ por periodo analizado. . . . .	46
Tabla I.1. Ubicación de las estaciones climatológicas por localidades, y número total de población. Tomado de INAFED (2010). . . . .	63
Tabla II.1. Resultados de la prueba de Wilcoxon para las series de temperatura máxima diaria separadas por periodo de estudio (1980-1990, 1990-2000, y 2000-2010). Los cuadros oscuros indican el rechazo de la hipótesis nula (es decir, los valores pertenecen a muestras con diferente distribución) a un nivel de significancia del 5%. . . . .	64
Tabla II.2. Resultados de la prueba de Wilcoxon para las series de temperatura mínima diaria separadas por periodo de estudio (1980-1990, 1990-2000, y 2000-2010). Los cuadros oscuros indican el rechazo de la hipótesis nula (es decir, los valores pertenecen a muestras con diferente distribución) a un nivel de significancia del 5%. . . . .	65
Tabla II.3. Variación por década del p95 para el periodo de 1980-2014. . . . .	66
Tabla II.4. Años en los que el p95 anual iguala/supera el valor extremal decadal (p95 decadal) para la $t_{max}$ y la $t_{min}$ , durante el periodo de 1980-2014. . . . .	67
Tabla III.1. Frecuencia mensual acumulada de las HW en Yucatán, para el periodo de 1980-2014. . . . .	68
Tabla III.2. Intensidad de los vientos de HW identificados durante el periodo 1980-2014 en Yucatán . . . . .	69

Tabla III.3. Número total de HW por década durante los años 1980-2014. . . . . 70

# LISTA DE ACRÓNIMOS

ECE	Eventos climáticos extremos
EEC	Eventos extremos cálidos
HW	Ondas de calor (Heat waves)
H <sub>0</sub>	Hipótesis nula
H <sub>1</sub>	Hipótesis alternativa
LWR	Radiación de onda larga (Long-wave radiation)
p90	percentil 90
p95	Percentil 95
PY	Península de Yucatán
SWR	Radiación de onda corta (Short-wave radiation)
t <sub>max</sub>	Temperatura máxima
t <sub>min</sub>	Temperatura mínima
ZI	Zona intertropical

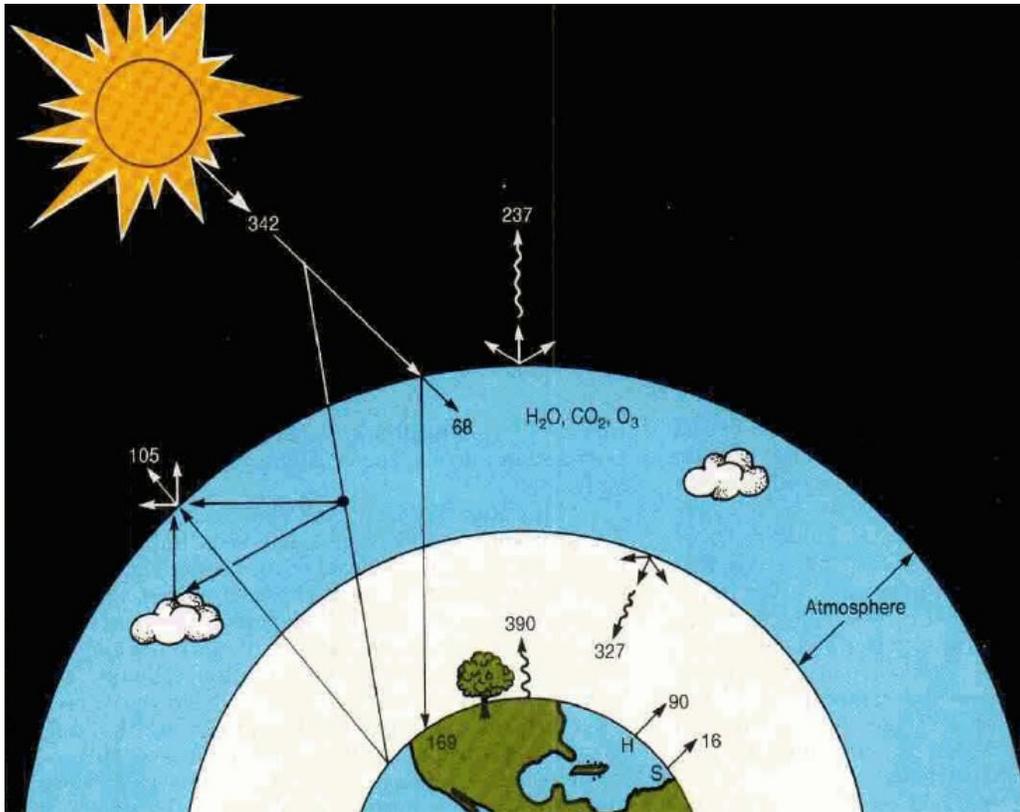
# 1. INTRODUCCIÓN

“El sistema climático terrestre, es un sistema complejo e interactivo entre la atmósfera, la superficie terrestre, los cuerpos de agua (océanos, nieve, hielo, etc.) y los seres vivos. No obstante, el sistema climático se transforma a través del tiempo, influenciado por su propia dinámica interna y los cambios de factores externos (llamados forzamientos) que modifican el clima” (IPCC, 2007). El principal motor de la interacción del sistema climático terrestre, es la radiación solar. De la radiación solar que entra al planeta ( $342 \text{ W/m}^2$ ) en forma de onda corta (SWR, por sus siglas en inglés), el 30% ( $105 \text{ W/m}^2$ ) es reflejada de vuelta al espacio por acción de las nubes, gases, aerosoles y la superficie terrestre (albedo<sup>1</sup>); mientras que, el 70% restante es retenida en un 50% ( $169 \text{ W/m}^2$ ) por la superficie terrestre, y en un 20% ( $68 \text{ W/m}^2$ ) por la atmósfera (16% por los componentes constituyentes atmosféricos y 4% por las nubes) en forma de onda larga (LWR, por sus siglas en inglés) (Fig. 1.1) (Ramanathan et al., 1989; Reyes, S., 2002; IPCC, 2013). Esta energía solar que entra a la Tierra se encuentra en equilibrio con la radiación terrestre que intenta salir (balance radiativo), por lo que, cualquier alteración o redistribución de esta energía dentro de la atmósfera puede afectar el clima (IPCC, 1995; Peralta-Hernandez et al., 2009).

Desde la formación de la Tierra hace más de 4.5 millones de años, el clima terrestre ha experimentado diferentes cambios a lo largo de tiempo, sin ningún tipo de alteración antropogénica, sólo la acción de la propia naturaleza. Sin embargo, las actividades humanas han estado alterando la composición química de la atmósfera, aumentando la concentración de gases como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ) y otros clorofluorocarbonos (CFCs) (Ramanathan et al., 1989; Hobbs, 1996).

Los aumentos en las concentraciones de estos gases reducen la eficiencia del planeta para enfriarse. La mayor parte de la radiación que es reflejada por la superficie terrestre hacia el espacio, es absorbida por la atmósfera. Lo que da como resultado un forzamiento positivo que tiende a calentar la propia atmósfera y las zonas adyacentes (masa continental), originando el denominado efecto invernadero<sup>2</sup> (IPCC, 1995).

- 
- 1 El albedo (del latín *albus*, que significa “blanco”) es la capacidad que tiene los cuerpos (objetos) de reflejar la luz. En el planeta existen cuerpos que reflejan y absorben radiación (llamados, cuerpos blancos y negros, respectivamente). Dentro de los cuerpos blancos se encuentran las nubes, el agua, el hielo, etc.; mientras que dentro de los cuerpos negros, se encuentran las selvas y las ciudades.
  - 2 Fenómeno por el cual la temperatura de la Tierra aumenta. Generado por la retención de la radiación infrarroja en la atmósfera.



**Figura 1.1.** Balance energético terrestre. Esquema conceptual de la interacción radiativa a través de la Tierra. Los valores indican la cantidad de energía absorbida o reflejada por las diferentes superficies sobre la Tierra en  $W/m^2$ . Tomado de Ramanathan et al., (1989).

De acuerdo con el cuarto informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), el sistema climático terrestre experimentó un incremento de  $0.74^{\circ}C$  en la temperatura global, entre los años 1906 y 2005, atribuido principalmente al incremento de los gases de efecto invernadero, calentándose más rápidamente las regiones terrestres (distribuyéndose con mayor intensidad en latitudes altas) que los océanos.

Estudios globales muestran cambios importantes en las tendencias anuales de temperatura. De acuerdo con Alexander et al. (2006), durante el periodo de 1951 al 2003, el 73% de la superficie terrestre experimentó un incremento de temperatura (25 días por año) en la ocurrencia anual de noches cálidas, así como un aumento significativo en la frecuencia de días calientes sobre el 41% de la superficie mundial. De tal forma que, la ocurrencia de noches cálidas ha incrementado en un 55% durante los últimos 60 años (1950-2010), en casi toda la superficie terrestre (98%) (Donat et al., 2013). Por lo que los eventos extremos cálidos (EEC) serán más comunes en los próximos años (Coumou & Robinson, 2013).

Uno de los eventos climáticos más importantes es el aumento de la temperatura superficial (IPCC, 1995), lo cual se observa en el aumento de la ocurrencia de meses extremadamente calientes (Twardosz & Kossowska-Cezak, 2013). De acuerdo con el PNUD (2007), los EEC pueden afectar el desarrollo humano en cinco ámbitos de la vida, como: 1) la producción agrícola y la seguridad alimentaria, 2) la falta de agua, 3) el aumento en el nivel medio del mar y la exposición a desastres meteorológicos, 4) la transformación de los ecosistemas y la disminución de la biodiversidad, y 5) los impactos en la salud humana.

En la última década, numerosos eventos extremos de temperatura ocurrieron alrededor del planeta, los cuales se vieron reflejados en cuantiosos daños para la sociedad y los ecosistemas (WMO, 2011; Coumou & Rahmstorf, 2012). Un ejemplo de lo anterior, son las ondas de calor (HW, por sus siglas en inglés) registradas sobre Europa en los años 2003 y 2010. Las cuales fueron causantes de, más 70,000 muertes en 16 países Europeos (Europa central y occidental, principalmente) durante el verano de 2003 (Robine et al., 2008); y una pérdida económica de aproximadamente 15 mil millones de dolares (equivalente al 1% del producto interno bruto) para Rusia en el verano de 2010 (Barriopedro et al. 2011).

Con respecto al cambio climático, México es un país vulnerable a sus impactos (IPCC 2007). Estudios relacionados a los EEC, mostraron un incremento positivo en la temperatura máxima (tmax), en comparación con la temperatura mínima (tmin), con tendencias que contrastan entre las regiones del noroeste y centro de la República Mexicana (Englehart & Douglas, 2005; Pavia et al., 2009), en las últimas dos décadas del siglo XX. Con respecto a la parte sur del país, la temperatura máxima presentó una tendencia positiva (con incrementos de 0.167°C por década), así como una mayor ocurrencia de días cálidos (Peralta-Hernandez et al., 2009).

## **1.1. Ondas de calor (HW): algunas definiciones**

El impacto de los evento extremos es más severo cuando las condiciones climáticas prevalecen durante largos lapsos de tiempo. Por tal razón, periodos prolongados de temperaturas extremas son estudiados con frecuencia (Beniston & Stephenson, 2004).

Durante el transcurso del siglo XX, algunos estudios se han centrado en fenómenos climáticos de temperaturas extremas, como las HW, debido al impacto que puede tener sobre la salud humana y el medio ambiente (Díaz et al., 2002; PNUD 2007; Coumou & Rahmstorf, 2012; Watts et al., 2015; Zuo

et al., 2015). No obstante, aún no existe una definición universal para este fenómeno, ya que varía de acuerdo a la región y a la época del año (Martínez-Austria et al., 2016); al igual que su intensidad, duración y frecuencia (Robinson, 2001).

Existen diferentes definiciones para estos eventos, de acuerdo a la disponibilidad de datos de temperatura disponibles (Radinović & Ćurić, 2012). Una de las definiciones considera un umbral fijo de  $t_{max}$  (por ejemplo  $30^{\circ}\text{C}$ ), en el que, un periodo de días consecutivos sobre dicho valor es considerado una HW. Por ejemplo, el Instituto Holandés de Meteorología, define como HW, a un periodo de al menos cinco días consecutivos con  $t_{max}$  superior o igual a  $25^{\circ}\text{C}$ , o tres días consecutivos con  $t_{max}$  mayor o igual a  $30^{\circ}\text{C}$  (Garsen et al. 2005).

En otros estudios se ha utilizado como umbral el promedio de la  $t_{max}$  diaria calculada para el periodo 1961-2000, y considera como una HW, a un periodo de al menos cinco días consecutivos con  $t_{max} > 5^{\circ}\text{C}$  por encima de dicho umbral (Unkašević & Tošić, 2009). Un tercer método se basa en la probabilidad de ocurrencia durante un periodo de varios años. De acuerdo con el IPCC (2007), los eventos extremos, por su propia definición son raros, dado que la frecuencia con que ocurren es menor o igual al 10%, por lo que los percentiles 90 y 95 ( $p_{90}$  y  $p_{95}$ , respectivamente) son utilizados como umbrales para los EEC; de tal modo que, una HW puede ser definida como un periodo de varios días consecutivos con valores de  $t_{max}$  por encima de dichos percentiles.

Por otra parte, existen algunos autores que utilizan procedimientos más extensos para la definición de HW en su territorio. Por ejemplo, el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos, con base en el índice de calor (Ecuación 1) y a umbrales de temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$  y  $26^{\circ}\text{C}$  (para el día y la noche, respectivamente), clasifica como una HW a un periodo de al menos dos días seguidos con temperaturas iguales o superiores a estos umbrales (Robinson, 2001).

$$\begin{aligned}
 H_I = & 16.923 + 0.185212T + 5.37941R \\
 & - 0.100254TR + 9.4169 \cdot 10^{-3} T^2 \\
 & + 7.28898 \cdot 10^{-3} R^2 + 3.45372 \cdot 10^{-4} T^2 R \\
 & - 8.14971 \cdot 10^{-4} TR^2 + 1.02102 \cdot 10^{-5} T^2 R^2 \\
 & - 3.8646 \cdot 10^{-5} T^3 + 2.91583 \cdot 10^{-5} R^3 \\
 & + 1.42721 \cdot 10^{-6} T^3 R + 1.97483 \cdot 10^{-7} T R^3 \\
 & - 2.18429 \cdot 10^{-8} T^3 R^2 + 8.43296 \cdot 10^{-10} T^2 R^3 \\
 & - 4.81975 \cdot 10^{-11} T^3 R^3 + 0.5
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:  $H$  es el índice de calor,  $T$  es la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{F}$ ) y  $R$  es la humedad relativa (en %).

Otros estudios consideran como umbral una combinación entre la temperatura ambiente y los efectos sobre la salud humana, es decir, la respuesta del cuerpo humano a las temperaturas extremas (e.g., Whitman et al., 1997; Croitoru et al., 2016), o también consideran índices de calor que relacionan la temperatura ambiente y la humedad relativa para definir una HW (e.g., Robinson, 2001; Oueslati et al., 2017).

En México, los pocos estudios realizados sobre HW utilizan también diferentes definiciones. Por ejemplo: Jáuregui (2009) para la ciudad de México, define a las HW cuando la  $t_{max}$  y la temperatura promedio diaria superan los 30°C y 24°C, respectivamente, durante tres o más días consecutivos (con base en las medidas de prevención que la población toma para aliviar el estrés por calor). Mientras que, Cueto et al. (2010) determinan que para la ciudad de Mexicali, Baja California, una HW se presenta cuando la  $t_{max}$  diaria supera el percentil 90 (p90) de temperatura (44°C) por al menos dos días consecutivos. No obstante, cabe destacar que la mayoría de los trabajos relacionados a las HW en la República Mexicana, se desarrollan sobre las regiones del centro y noroeste del país (e.g., Jáuregui, 2009; Cueto et al., 2010; Martínez-Austria et al., 2016) por ser zonas con una alta densidad poblacional (CONAGUA, 2011).

## **1.2. Antecedentes**

A escala global, Trenberth et al. (2007) indican que el número de HW aumentó a partir del año 1950. Trabajos recientes determinaron que la frecuencia, intensidad y duración de las HW se incrementaron en varias regiones del mundo durante los últimos años (Coumou & Rahmstorf, 2012; Twardosz & Kossowska-Cezak, 2013; Rusticucci et al., 2015). Como la acontecida en 1995 al oeste de los Estados Unidos reportada por Whitman et al. (1997), quienes utilizaron la  $t_{max}$  y el índice de calor como identificadores de este fenómeno.

En el año 2003 Europa sufrió uno de los veranos más cálidos del siglo, el cual ocasionó alrededor de 500 muertes (31 julio-13 agosto) en Holanda (Garssen et al., 2005), y más de 13,700 decesos (3-15 agosto) sobre Francia (Rey et al., 2007). En total, 16 países Europeos fueron afectados por este evento extremo (en especial, las regiones central y occidental), con más de 70,000 muertes relacionadas al exceso de calor (Robine et al., 2008).

Una de las HW más extremas para Europa central y oriental ocurrió en el verano (junio-agosto) de 2010. De acuerdo con Twardosz & Kossowska-Cezak (2013), este evento abarcó la mayor extensión geográfica registrada entre 1951 y 2010 (cubrió Rusia Europea, el Golfo de Finlandia y Riga, Polonia

oriental, Ucrania y el noroeste de Rumania), así como la mayor temperatura ( $>30^{\circ}\text{C}$ ) y duración (15-20 días en la región norte y oeste, 50-60 días en la zona centro y este, y más de 80 días en el extremo sureste). Este evento ocasionó diversos daños en Rusia y Ucrania, por lo que se refiere a Rusia, durante el verano registró valores muy altos de temperatura durante el día y la noche (e.g.,  $38.2^{\circ}\text{C}$  en Moscow y  $25^{\circ}\text{C}$  en Kiev, respectivamente), ocasionando la muerte de 55,000 personas, la quema de un millón de hectáreas (a causa de los incendios forestales), el daño en aproximadamente el 25% de la cosecha anual, y una pérdida económica de 15 mil millones de dolares (Barriopedro et al., 2011).

Por otra parte, también se han hecho estudios acerca de la variabilidad temporal y posible estacionalidad de las HW. Como el trabajo realizado por Tomczyk & Bednorz (2016) sobre Europa Central (Alemania, Polonia, República Checa y Eslovaquia), quienes determinaron que las HW para esa región ocurren entre los meses de abril/mayo a septiembre, con una mayor presencia de estos eventos durante el mes de julio ( $\sim 74\%$  de todas las HW); inclusive, identificaron que la mayor ocurrencia de las HW (80% de las estaciones utilizadas) se presentaron durante los años 2001 y 2010.

Croitoru et al. (2016) estudiaron los cambios en los índices de las HW entre los años de 1951 y 2010. Definieron como una HW, a una secuencia de al menos tres días consecutivos con temperaturas por encima del p90 de la serie temporal. Encontraron que el número anual de HW, así como la frecuencia de estos eventos sobre Rumania presentaron un incremento significativo de  $\sim 100\%$ .

Con respecto a los estudios realizados en nuestro país, Martínez-Austria et al. (2016) encontraron que el mayor número de HW registradas (82%) entre 1960 y 2010, ocurrieron en la ciudad de Mexicali, Baja California. Además, identificaron a los estados de Baja California y Sonora como los más vulnerables ante el calentamiento global, por experimentar el mayor aumento de temperatura en el transcurso de este siglo. Así mismo, Cueto et al. (2010) identificaron que la frecuencia de ocurrencia de las HW en Mexicali, incrementaron desde 1960, en particular entre los meses de junio y septiembre; y al mismo tiempo, observaron que la longitud de estos eventos aumentaron en todos los meses a partir de los años 60.

### **1.3. Planteamiento del problema**

Desde el inicio de la era industrial, las actividades humanas han modificado de manera considerable la composición química de la atmósfera, al aumentar la concentración de gases de efecto invernadero (e.g., Ramanathan et al., 1989; Hobbs, 1996). De acuerdo con el IPCC (2007), este incremento de gases en la atmósfera, es el principal causante del aumento de la temperatura superficial a nivel global, y del

cambio climático. El cual, ha sido el detonante de un número considerable de eventos climáticos extremos (ECE) alrededor del planeta (e.g., WMO, 2011; Coumou & Rahmstorf, 2012). De los eventos extremos que se han observado, las HW han sido los más devastadores en las últimas dos décadas; particularmente en Europa, donde la  $t_{max}$  ha registrado los valores más altos de los últimos tiempos, y han ocasionado numerosas muertes por exceso de calor, así como grave daños a la economía regional (e.g., Garssen et al., 2005; Rey et al., 2007; Robine et al., 2008; Barriopedro et al., 2011; Twardosz & Kossowska-Cezak, 2013).

Tomando en cuenta el aumento de la temperatura superficial a nivel global, se pronostica que en el transcurso de este siglo, la temperatura media global tenga un incremento de 4°C; por lo que, considerando este aumento de temperatura, se espera que los eventos extremos de  $t_{max}$  (HW) aumenten, ya sea en intensidad o en frecuencia (IPCC, 2013). No obstante, este incremento en la temperatura superficial no implica una similitud en los patrones (duración, intensidad y frecuencia) de las HW, ya que, cada evento se desarrolla bajo las condiciones ambientales regionales y/o locales. Por lo que es difícil utilizar un único método para caracterizar estos eventos extremos en todo el planeta. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo es caracterizar los patrones de duración, intensidad y frecuencia de las HW en el estado de Yucatán.

## **1.4. Justificación**

Las muertes por exceso de calor relacionados a las HW, aumentarán a causa del incremento en la intensidad y frecuencia de estos eventos (Hobbs, 1996; IPCC, 2007), principalmente; en los países en vías de crecimiento/desarrollo, como México. Lo anterior asociado a la falta de recursos necesarios para adaptarse a estos fenómenos climáticos extremos (Akhtar et al., 2001). La necesidad de conocer el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo, así como de conocer la duración, intensidad y frecuencia de las HW, es de suma importancia para un mejor entendimiento de los impactos asociados a estos eventos. Sobre todo en nuestro país, donde el estudio de estos eventos extremos se ha llevado a cabo en años recientes (e.g., Jáuregui, 2009; Cueto et al., 2010; Martínez-Austria et al., 2016), y su nivel de comprensión aún es limitado. Por todos los impactos que puede tener la ocurrencia de una HW en una región (desde pérdidas humanas, hasta daños materiales y pérdidas económicas), la falta de un estudio que caracterice las HW en la Península de Yucatán, y la clara necesidad de generar una definición de HW para esta región, este trabajo pretende realizar una caracterización de las HW en Yucatán, así como establecer un criterio para definir las y determinar sus características, que a su vez, expliquen la variabilidad temporal.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Caracterizar las ondas de calor en el estado de Yucatán, e identificar los patrones de intensidad, duración y frecuencia analizando la temperatura máxima y mínima durante el periodo de 1980 al 2014.

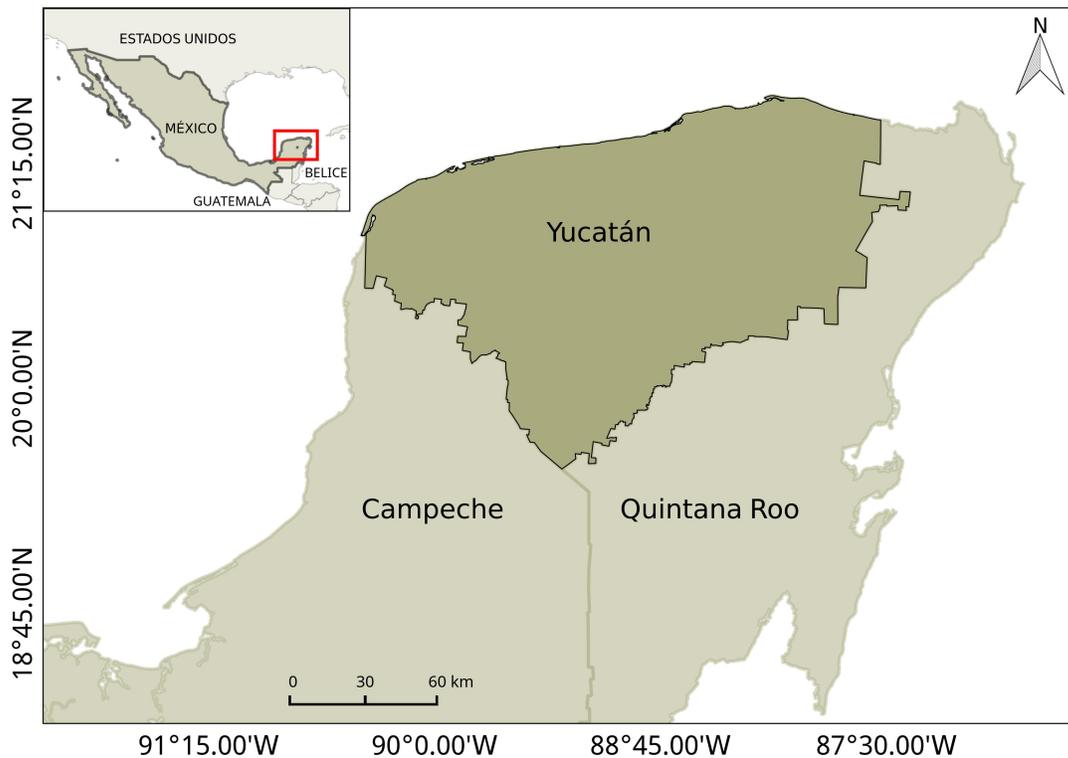
### **1.5.2. Objetivos específicos**

1. Determinar la climatología de la temperatura máxima y mínima en Yucatán a partir de observaciones diarias de estaciones climatológicas.
2. Definir y caracterizar las ondas de calor en función de su intensidad, duración y frecuencia.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

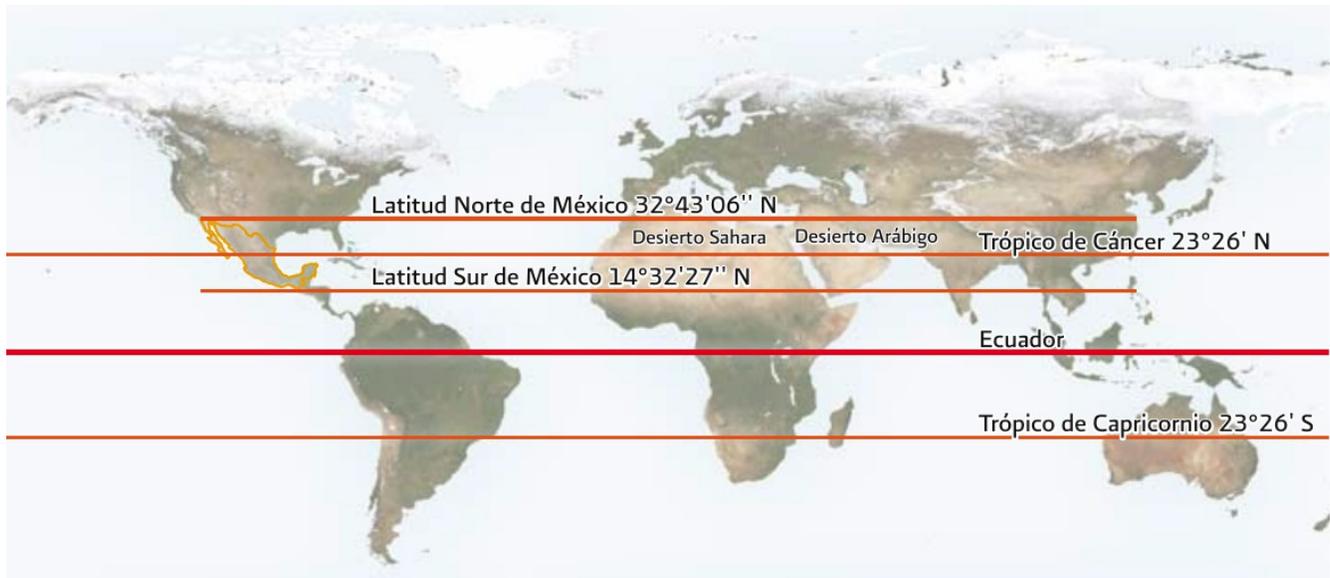
### 2.1. Descripción del área de estudios

El área de estudio, se sitúa al este de la República Mexicana, en la porción centro-norte de la Península de Yucatán (PY). Se localiza entre los 19°31'46" y los 21°37'21" de latitud norte; y los 87°22'08" y los 90°24'22" de longitud oeste (INEGI, 2002). El estado está conformado por 106 municipios, cuenta con una extensión territorial de 39,524 km<sup>2</sup> (INEGI, 2015) y 340 km de costa, representando el 2% de la superficie total del país, y el 3.1% de costa total nacional (INEGI, 2011; INEGI, 2015a; INEGI, 2015b). Limita al norte con el Golfo de México, al sureste con el estado de Quintan Roo y al suroeste con el estado de Campeche (Fig. 2.1).



**Figura 2.1.** Ubicación geográfica del estado de Yucatán.

Por la ubicación geográfica que tiene la PY, el estado de Yucatán se localiza dentro de la zona intertropical (ZI) (Fig. 2.2) (INEGI, 2002; CONAGUA, 2011). Por lo que la radiación solar que recibe el estado es elevada y uniforme durante todo el año, ocasionando que la temperatura anual tenga ligeras variaciones (Vidal, R., 2005). Además de la ubicación geográfica de la ZI, la PY se sitúa entre dos zonas generadoras de depresiones tropicales, la Sonda de Campeche y el mar de las Antillas, estas áreas constituyen zonas de bajas presión atmosférica formadas por el calentamiento del océano, en las que eventualmente se forma tormentas y/o huracanes (Orellana, 1999).



**Figura 2.2.** Localización de la Zona Intertropical en el mundo. La ZI se encuentra delimitada por líneas de color rojo; al norte colinda con el trópico de Cáncer y al sur con el trópico de Capricornio. Tomado de CONAGUA (2011).

### 2.1.1. Orografía

Aunque en términos geográficos, Yucatán sea considerado como un estado de poca orografía, la región tiene una variedad de relieves. Dentro de los diversos tipos de relieves se encuentran: 1) las planicies subhorizontales, 2) las planicies onduladas, 3) las planicies colinosas, 4) los valles interiores, y 5) los lomeríos. Las primeras abarcan el 28% de la superficie estatal, y se clasifican en dos grupos: las costeras, que son depósitos de arena y, las de tierra adentro, compuestas de caliza y/o roca calcárea. El segundo grupo ocupa la mayor parte de Yucatán con 50% del territorio, y al igual que el grupo anterior se clasifican en dos grupos: las planicies con inundaciones periódicas y las planicies cársticas. Las planicies periódicas se localizan entre la costa Yucateca y las zonas cársticas tierra adentro (en los municipios de Celestún y Hunucmá), mientras que, las planicies cársticas se ubican continente adentro en la zona oriental del estado (por ejemplo, en municipios como Espita, Tizimín, Sicilá, entre otros), se

caracterizan por tener montículos de hasta cinco metros de alto y la presencia de cenotes. El grupo tres ocupa tan sólo el 5% de la superficie del estado, se caracteriza por presentar terreno variable entre los 10 y 20 m de alto, y se puede observar en la parte sur del estado (Opichén, Muna, Ticul y Tekax). Al igual que el grupo anterior, los valles internos se localizan en la parte sur de Yucatán, y representan tan sólo el 1% de la superficie territorial; ubicados principalmente en los municipios de Tekax y Tzucacab, éstos se encuentran bordeados por altos lomeríos cársticos. Por último, el relieve de tipo lomeríos, se caracteriza por ser un grupo de lomas con alturas superiores a los 20m (no mayores a los 200m), representan el 9% de la superficial estatal; como ejemplo de ellos, se encuentran las sierritas de Ticul y Sayil, Oxkutzcab y Tekax (Bautista, F. et al., 2010).

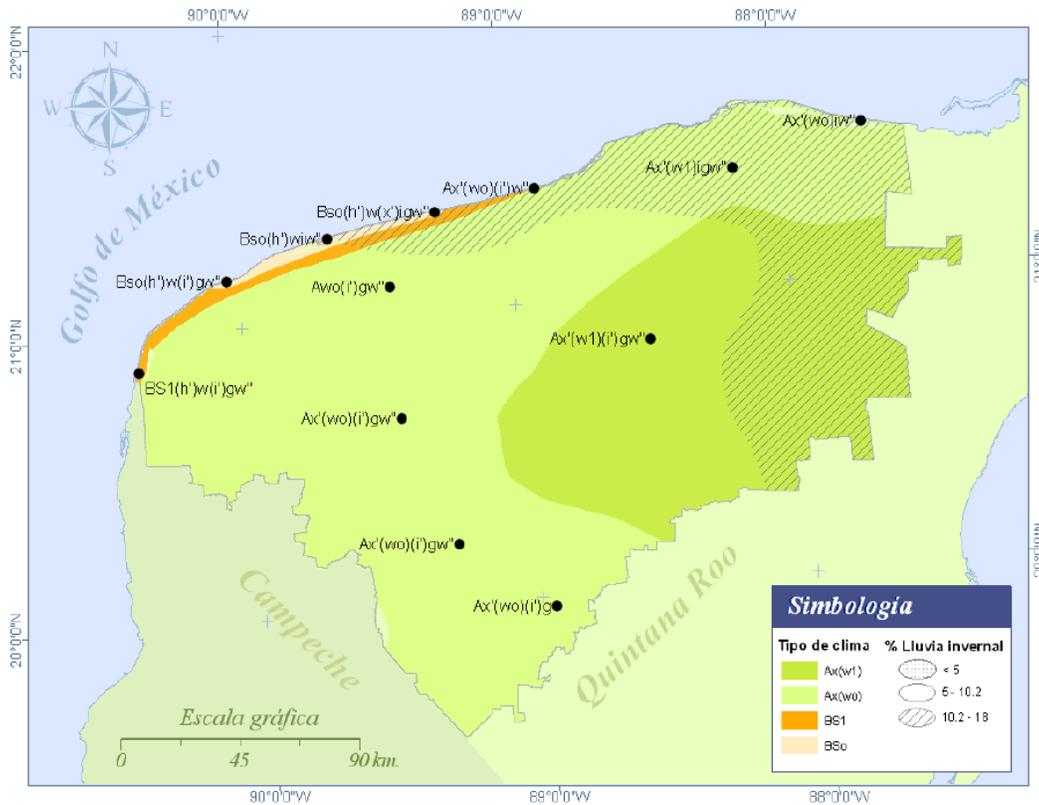
### **2.1.2. Clima**

Como se mencionó anteriormente, la ubicación de la PY dentro de la ZI y su orografía determinan en gran parte el clima de la región. No obstante, también se ve regulado por la influencia de las corrientes marinas, la circulación de los vientos alisios, las ondas tropicales, las depresiones o tormentas tropicales, y los nortes, así como su interacción con la orografía de la región (Orellana, 1999; Vidal, R., 2005).

La interacción de estos factores físicos con la cobertura vegetal sirve para clasificar los diferentes tipos de regímenes climáticos en la región. La mayor parte de la franja costera (parte noroeste) está dominada por climas de tipo seco (BS<sub>0</sub>) y semisecos cálidos (BS<sub>1</sub>), en contraste con gran parte del estado que se caracteriza por tener climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano (AW<sub>0</sub>, AW<sub>1</sub> y AW<sub>2</sub>) (Fig. 2.3) (INEGI, 2002; Orellana et al., 2010), y representan el 85.7% del territorio estatal (INEGI, 2015a). Estos regímenes climáticos, permiten que en Yucatán exista una gran variedad de vegetación, la cual cambia de dirección de norte a sur, de acuerdo al gradiente de humedad dominante en esa dirección (Flores et al., 2010).

Entre la vegetación presente sobre el estado, se encuentran: 1) la vegetación de dunas costeras, 2) los manglares, 3) la selva baja caducifolia, 4) la selva mediana subcaducifolia, y 5) la selva baja inundable. La primera de ellas, se desarrolla en regiones con temperatura promedio alta (29-30°C) y poca precipitación media anual (300-400mm). De manera similar, los manglares también se extienden sobre todo el litoral del estado, sin embargo, son más comunes en los climas BS y AW<sub>0</sub>; típicos de las lagunas costeras y riadas (con las mejores poblaciones desarrolladas en Ría Lagartos, Ría Celestún y las Bocas de Dzilam). Dentro de los distintos tipos de selva, la selva baja caducifolia se presenta como la segunda más extensa sobre el estado, con aproximadamente 20,000 km<sup>2</sup> se localiza en los tipos de clima AW<sub>0</sub> y AW<sub>1</sub> (con temperatura media entre los 26-27°C, y precipitación media anual de 728-1000mm); la selva

mediana subcaducifolia por otra parte, es la más extensa, ocupa una superficie de 29,309 km<sup>2</sup> y se distribuye sobre los climas cálidos subhúmedos con precipitación media anual alta (1078-1220mm), y temperatura promedio alrededor de los 26°C. Por último, la selva baja inundable se puede localizar tanto en la parte norte (costa noroeste) como en la parte sur (cono sur) del estado, en los tipos de clima AW<sub>0</sub>, AW y AW<sub>2</sub> (Flores et al., 2010).

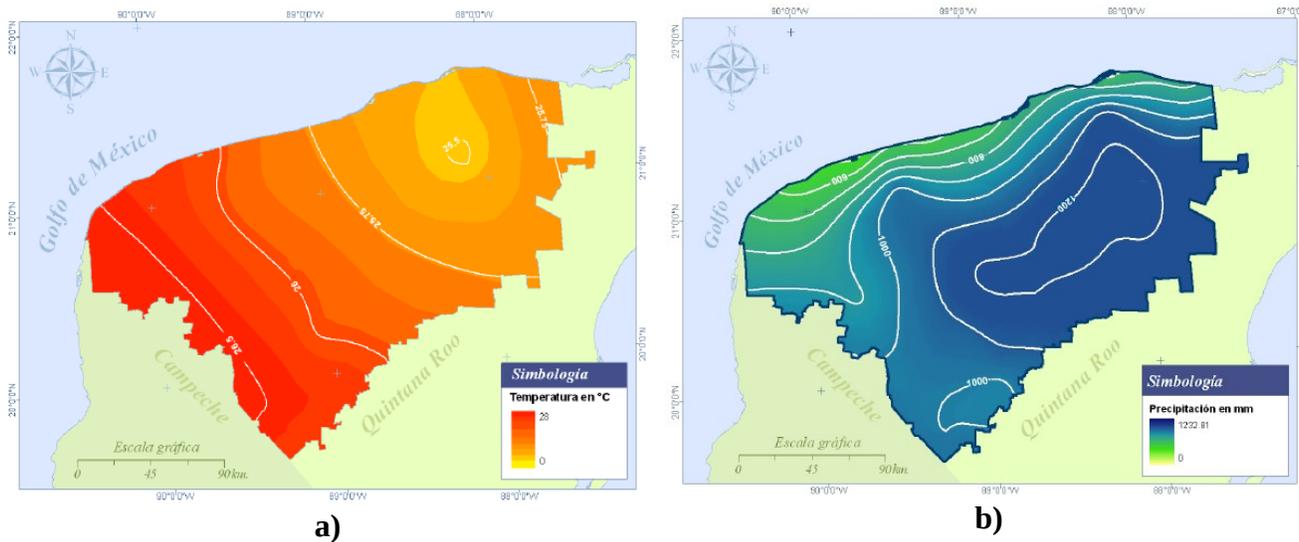


**Figura 2.3.** Mapa climático del estado de Yucatán. Tomado de (Orellana et al. 2010).

En términos generales, Yucatán presenta una temperatura anual promedio de 26°C (INEGI, 2002), en la que se forman dos zonas térmicas: la cálida con temperaturas entre los 24°C y 26°C, y la muy cálida con temperaturas mayores a los 26°C (Fig. 2.4a) (Orellana et al., 2010). La temporada más cálida se presenta durante los meses de mayo a agosto, con una temperatura anual promedio entre los 25°C y 28°C, siendo mayo el mes más caliente; por otra parte, el periodo más frío se registra durante los meses de diciembre a febrero, con una temperatura media anual entre los 22°C y 24°C, donde el mes más frío pudiera ser diciembre y/o enero (INEGI 2002).

Para Yucatán la estación seca se divide en dos periodos: la temporada de nortes que abarca los meses de noviembre a febrero, que se caracteriza por la presencia de vientos que llegan del norte con rachas

violentas y bajas temperaturas (INEGI, 2002); y la temporada de secas durante los meses de febrero a abril (INEGI, 2002; Vidal, R., 2005).



**Figura 2.4.** Distribución media anual de a) temperatura (isotermas<sup>3</sup>) y b) precipitación (isoyetas<sup>4</sup>) sobre el estado de Yucatán. Tomado de Orellana et al. (2010).

Los regímenes de precipitación en el estado están modulados por la circulación atmosférica (vientos alisios), los nortes y las tormentas tropicales que transportan las masas húmedas de aire hacia tierra adentro (INEGI 2002). La temporada de lluvia sobre el estado comprende los meses de mayo a octubre (siendo septiembre el mes más lluvioso), con una precipitación media anual que se intensifica hacia el sureste del estado (Fig. 2.4b), de modo que las regiones más secas están cerca de la costa, con valores menores a los 500mm anuales; y las zonas más lluviosas se localizan cerca del límite con el estado de Quintana Roo, con valores por encima de los 1,200mm anuales (INEGI, 2002; Orellana et al., 2010).

El régimen pluvial de Yucatán, tiene una gran variabilidad anual en el estado, por lo que es posible identificar tres épocas distintas de humedad: la época de lluvia, que abarca los meses de mayo a octubre y se caracteriza por lluvias torrenciales; la época de nortes o de lluvias escasas, durante los meses de noviembre a febrero; y la época de secas, entre los meses de marzo y abril, con algunas lluvias ocasionales (INEGI, 2002).

3 Líneas que unen puntos de la superficie terrestre con la misma temperatura, en una unidad de tiempo considerada.

4 Líneas que unen puntos de la superficie terrestre que presentan la misma precipitación, en una unidad de tiempo considerada.

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Datos**

En México, las observaciones del clima y el tiempo se encuentran disponibles en diferentes bases de datos. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene la misión de administrar la base nacional del clima en México (de carácter público), en especial, los datos de la red de estaciones climatológicas convencionales administradas en el sistema clima computarizado (CLICOM), que contiene la información para el estudio del clima para las entidades federativas (Vazquez-Aguirre, J. L., 2010).

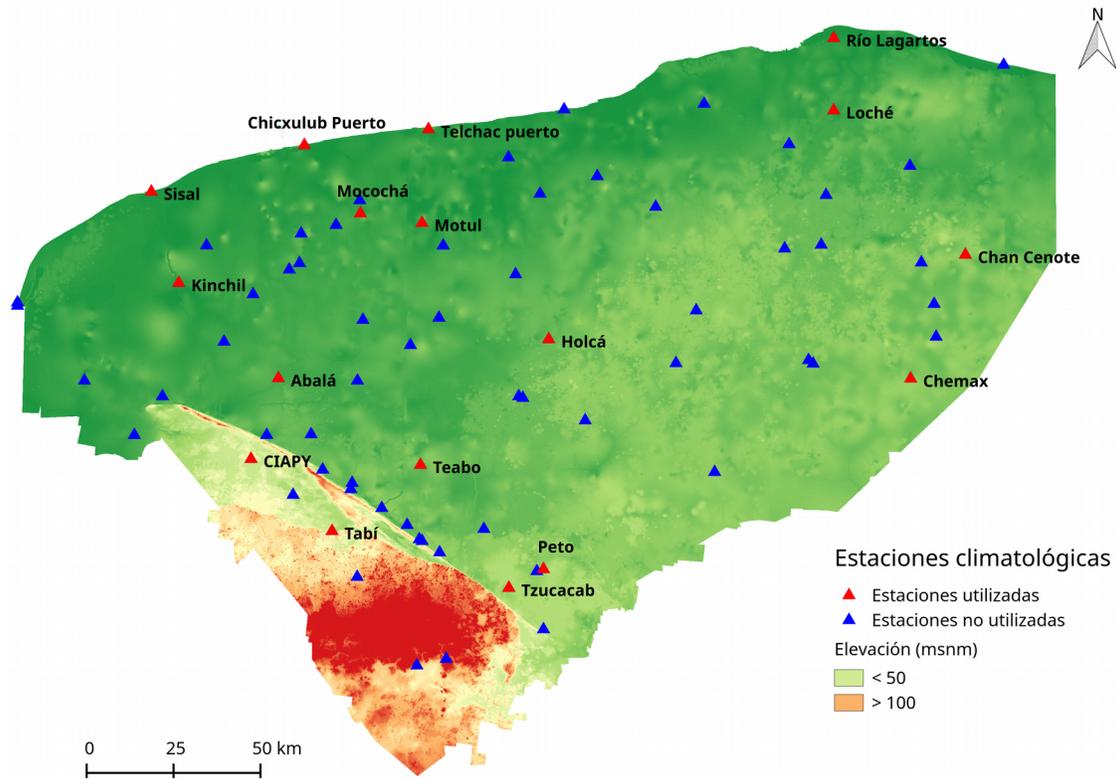
La importancia de analizar datos climáticos de alta resolución espacial y/o temporal, radica en comprender el impacto del calentamiento global en regiones específicas del planeta. Sin embargo, los datos de las estaciones climatológicas pueden conllevar errores asociados. De acuerdo con Guijarro (2004) los factores que pueden proporcionar dichos errores, pueden agruparse en: 1) errores aislados, de lectura o transcripción, o a errores puntuales en el sensor; 2) vacíos en las series temporales, debido a los cambios de instrumentación o de las condiciones de instalación de los aparatos; y 3) derivas graduales en las series ocasionadas por la falta de calibración de los aparatos (i.e., crecimiento urbano, cambio de uso de suelo, etc.).

De acuerdo con la OMM (Organización Meteorológica Mundial; 2011), los datos climáticos resultan más útiles cuando se han editado y sometido a un control de calidad, el cual consiste en verificar si los datos notificados son propios de la medición o se han visto afectados por factores externos. Por esta razón, a continuación se describe el control de calidad realizado a los registros de temperatura.

#### **3.1.1. Control de calidad**

Para analizar el comportamiento de la distribución de temperatura a lo largo del tiempo, es necesario contar con series temporales lo suficientemente largas (de al menos 30 años). Por tal motivo, el periodo de estudio seleccionado para este trabajo fue de 35 años de datos continuos, de 1980 a 2014. Con datos diarios de temperatura máxima y mínima tomados por 17 estaciones climatológicas de la CONAGUA (pertenecientes a la base de datos CLICOM) ubicadas en el estado de Yucatán (Fig. 3.1). Las

temperaturas máxima y mínima hacen referencia a la toma diaria (un valor registrado para cada variable) de datos realizada por cada estación, en la que la primer variable está asociada a la lectura de la temperatura ambiente registrada durante el día, mientras que la segunda indica la temperatura ambiente registrada durante la noche.



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica de las estaciones climatológicas de CLICOM existentes en el estado de Yucatán. En color rojo se muestran las estaciones utilizadas en este trabajo.

Las estaciones mostradas en la Tabla 3.1, fueron seleccionadas de entre 86 después de analizar las series de datos disponibles y determinar que este era el periodo que tenían en común (1980-2014), además de haber pasado por un control de calidad. El cual se llevó a cabo para verificar la existencia de datos cuestionables.

Para realizar el control de calidad se llevaron a cabo cinco pasos, los cuales se describen a continuación:

1. Inspección visual de los datos: los datos colectados en cada una de las estaciones climatológicas fueron graficados e inspeccionados en búsqueda de huecos o discontinuidades en los registros

diarios de temperatura. Las estaciones que presentaron huecos o discontinuidades en más de un año consecutivo dentro de sus registros temporales fueron descartadas.

2. Búsqueda de años sin registro de datos: después de seleccionar a las estaciones cuyas discontinuidades aparentes dentro de las series de datos resultaron ser pequeñas ( $\sim 1$  año). A estas estaciones se les realizó una segunda inspección en busca de huecos dentro la serie temporal. A diferencia del paso anterior, en este se verificó que para cada una de las series disponibles la pérdida de información estuviera estrictamente por debajo del año de datos perdidos. Las estaciones cuyas series temporales contenían 365 días o más sin registro continuo de datos fueron descartadas.
3. Pérdida de información dentro de los registros: se examinó que la pérdida de información dentro de los datos registrados no estuvieran por encima del 10%, esto para las estaciones que cumplían los pasos anteriores.
4. Búsqueda de datos cuestionables: se verificó que no existieran valores de temperatura máxima diaria, menores que valores de temperatura mínima diaria y viceversa. Además se revisó la existencia de valores extremos. Estos valores poco comunes, pueden ser errores en las series de datos, aunque en algunos casos pueden ser registro reales de situaciones poco probables (eventos extremos).
5. Y por último, a las series de tiempo se les realizó una prueba de homogeneidad. La cual tiene como objetivo garantizar que las variaciones observadas en las series temporales correspondan a registros de procesos climáticos y no a otros factores.

Estas pruebas de homogeneidad, son de crucial importancia en los procesos estadísticos para garantizar la calidad de los datos, son usadas en el análisis de varianzas, en el análisis de regresión, entre otros (Correa et al., 2006). Para este último paso (5), dicha prueba se aplicó mediante la herramienta `RHtestV4` en lenguaje R, la cual es una extensión del `RHtestV3` que integra una función máxima F penalizada (PMF, por sus siglas en inglés) capaz de detectar la posición de los puntos de cambio/quiebre en una base de datos sin ayuda de una serie de referencia (Wang & Feng, 2013).

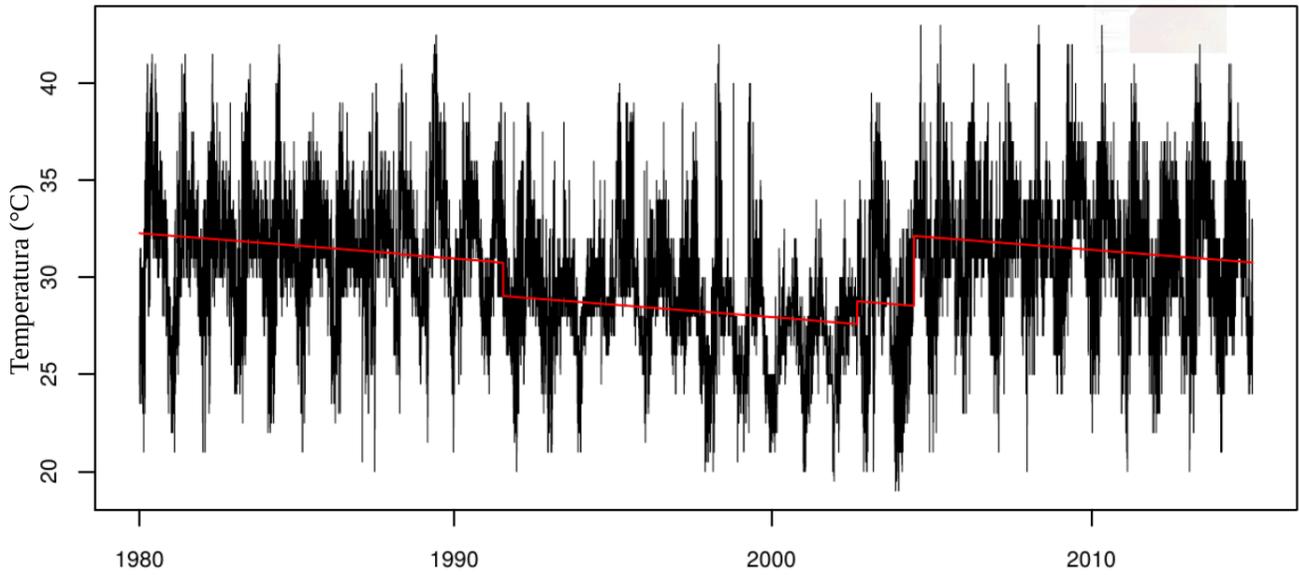
Este algoritmo localiza los puntos de quiebre dentro de las series de datos, también determina si esos puntos son relevantes o no. De igual manera, calcula los valores ya homogeneizados de las series de temperatura con base en diferentes ajustes. Wang & Feng (2013) sugieren utilizar el método Quantile-Matching (QM, por sus siglas en inglés), que considera un ajuste cuantil en donde la media de los datos es ajustada y homogeneizada a partir de la distribución de los datos.

**Tabla 3.1.** Estaciones climatológicas utilizadas para el análisis de datos de temperatura.

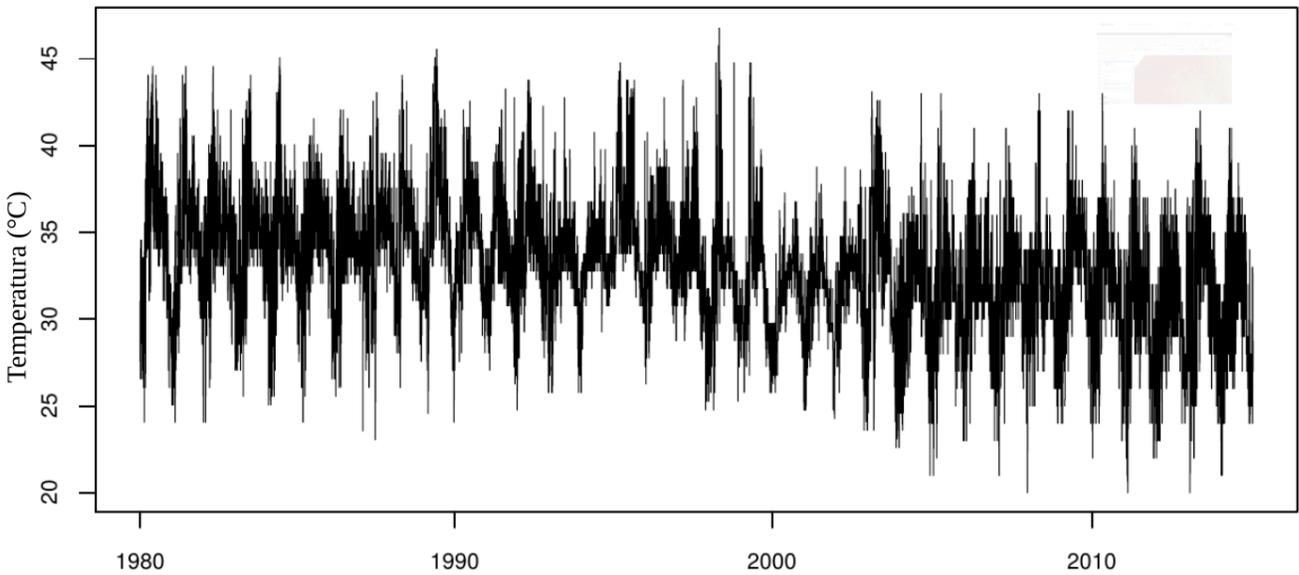
Clave	Ubicación		Coordenadas		Altitud (m)
	Nombre	Municipio	Latitud (N)	Longitud (W)	
31001	Abalá	Abalá	20.6500	-89.6800	17
31005	CIAPY	Muna	20.4267	-89.7556	50
31007	Chicxulub Puertto	Progreso	21.2939	-89.6083	3
31016	Kinchil	Kinchil	20.9131	-89.9550	8
31017	Loché	Panabá	21.3900	-88.1475	15
31020	Motul	Motul	21.0789	-89.2836	7
31022	Peto	Peto	20.1222	-88.9483	35
31024	Río Lagartos	Río Lagartos	21.5897	-88.1475	4
31029	Sisal	Hunucmá	21.1653	-90.0306	4
31031	Telchac Puerto	Telchac Puerto	21.3378	-89.2658	2
31056	Mocochá	Mocochá	21.1050	-89.4536	20
31062	Tabí	Oxkutzcab	20.2275	-89.5319	50
31068	Chan Cenote	Tizimín	20.9908	-87.7839	30
31069	Chemax	Chemax	20.6486	-87.9350	26
31071	Holcá	Kantunil	20.7575	-88.9339	22
31072	Teabo	Teabo	20.4103	-89.2878	26
31073	Tzucacab	Tzucacab	20.0706	-89.0439	36

A manera de ejemplo, se muestran las series de tmax para la estación de Chicxulub Puerto (Figs. 3.2a y 3.2b). La figura 3.2a es la serie original de temperatura en la cual se observan tres puntos de quiebre importantes (los días 07/09/1991, 28/09/2002 y 02/07/2004), los cuales indican que la serie temporal cuenta con alguno de los errores descritos en la sección 3.1. La figura 3.2b muestra la serie de temperatura ya corregida al aplicar el ajuste QM.

**a) Serie original**



**b) Serie homogeneizada**



**Figura 3.2.** Series a) original y b) homogeneizada de temperatura (°C) máxima para la estación de Chicxulub Puerto. Los puntos de quiebre se identifican en los días 07/09/1991, 28/09/2002 y 02/07/2004.

### 3.1.2. Generación de grupos

Una vez realizado el control de calidad a los datos de temperatura máxima y mínima, el siguiente paso consistió en agrupar las estaciones climatológicas. El objetivo de esta agrupación fue, identificar las estaciones que poseen el mismo comportamiento de temperatura; por lo que, los valores máximos diarios de temperatura (1980-2014) se tomaron como referencia.

Para llevar a cabo el agrupamiento, se utilizó la función *kmeans* de las herramienta del Matlab. Esta función, es un método no jerárquico de clasificación que se utiliza para hacer la partición de un conjunto de  $n$  observaciones en  $k$  grupos, en el que cada valor de  $n$  pertenece al grupo  $k$  cuyo valor medio es más cercano. Es decir, representa cada uno de los grupos con la media (o media ponderada) obtenida de los puntos. Por lo que, los objetos dentro de un mismo grupo tienen la mayor similitud posible. Además, calcula los grupos a partir de la suma de los errores cuadráticos, empleando una norma euclidiana para caracterizar la distancia entre dos puntos (Serber 1984; Spath 1985).

## **3.2. Eventos extremos cálidos: ondas de calor**

### **3.2.1. Temperatura máxima y mínima por década**

Para obtener el promedio de temperatura máxima y mínima por década, se utilizaron los datos diarios de  $t_{max}$  y  $t_{min}$ , y a partir de éstos se obtuvieron los promedios mensuales y decadales. Los promedios decadales obtenidos fueron para los periodos de 1980 (01/01/1980 – 31/12/1989), de 1990 (01/01/1990 – 31/12/1999), de 2000 (01/01/2000 – 31/12/2009) y de 2010; esta última con datos disponibles hasta el año 2014 (01/01/2010 – 31/12/2014). A estos periodos se les realizó una prueba estadística de Wilcoxon, el objetivo de esta prueba fue determinar si los cuatro periodos de estudios debían ser tomados como muestras independientes, o se debía considerar a los 35 años como (1980-2014) como una única muestra.

La prueba de la suma de los rangos de Wilcoxon es una prueba estadística no paramétrica que compara dos muestras para determinar si pertenecen a una misma distribución, con una misma mediana. Para llevar a cabo esto, se determina si se acepta o no nuestra hipótesis nula ( $H_0$ ), la cual indica que no existe una diferencia significativa entre ambas muestras. Para llevar a cabo esta prueba, se utilizó la función *ranksum* de Matlab. Primero ordena las dos muestras de datos en orden descendente, asignando un rango a cada valor de los grupos de datos. Posteriormente, encuentra la suma de los rangos para ambos grupos y calcula el estadístico de las observaciones de ambas poblaciones. Y finalmente en base a ese estadístico se acepta o rechaza la  $H_0$  (Gibbons, 1985; Hollander & Wolfe, 1999).

### **3.2.2. Identificación de días cálidos: análisis del percentil 95**

Como se mencionó anteriormente, las ondas de calor son eventos extremos que pueden identificarse por medio de diversos métodos, debido a que cada uno de estos eventos extremos varía de acuerdo a los patrones climáticos que rige la región donde se desarrolla. No obstante, estudios llevados a cabo en diversas regiones del planeta, utilizan el criterio de densidad de probabilidad propuesto por el IPCC (2007) para identificarlas, ya que un evento meteorológico puede definirse como un evento extremo si se encuentra por arriba del p90.

Se analizaron las variables de temperatura (máxima y mínima) mediante el método de percentiles (IPCC, 2007) ya reportado en diferentes estudios (e.g., Jiménez et al., 2005; Cardós et al., 2007; Rey et al., 2007; Cueto et al., 2010; Tomczyk & Bednorz, 2014; Tomczyk et al., 2014; Croitoru et al., 2016;

Tomczyk & Bednorz, 2016). Se cálculo el percentil 95 por año y por década (p95 anual y decadal, respectivamente) para las series de tmax y tmin. Con estos umbrales se identificaron los años calientes, años en los que el valor del p95 anual es mayor o igual al valor del p95 decadal. De esta forma se definió a las HW como un exceso de temperatura sobre el umbral asociado al valor del p95 por década, de los datos de tmax y tmin. La finalidad de este umbral fue establecer un valor fijo de temperatura, con el se identificaron los días (tmax) y noches (tmin) cálidas, al igual que la persistencia e intensidad de los mismos; con los cuales se procedió a la búsqueda de los eventos de HW diurnas (tmax) y nocturnas (tmin). Por día o noche cálida nos referimos a los días que registraron una temperatura igual o superior al p95 decadal.

## 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 4.1. Clasificación en grupos

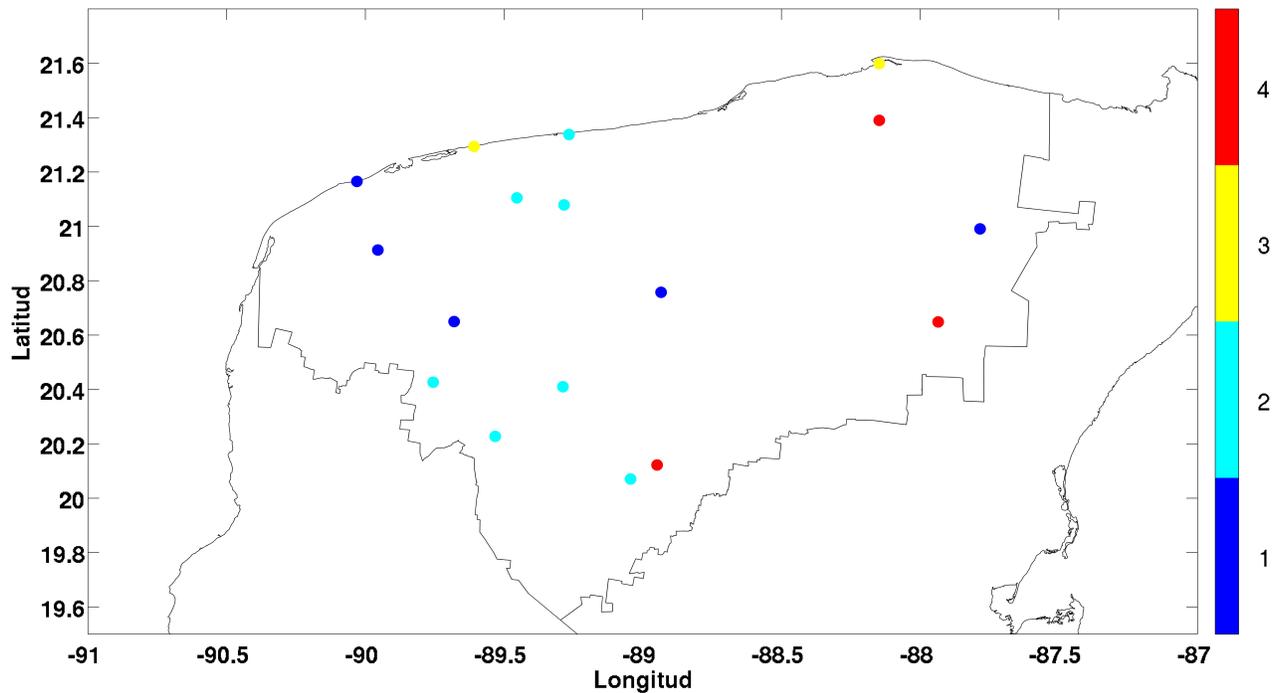
Para analizar el comportamiento de la temperatura en el periodo de estudio, y poder determinar la similitud entre cada uno de los sitios estudiados, se realizó la agrupación de las estaciones climatológicas. La Tabla 4.1 muestra el resultado de la agrupación de las 17 estaciones climatológicas en base a la similitud de los datos diarios de  $t_{max}$ . Dado que el método utilizado para hacer estas agrupaciones (*kmeans*) requiere que el número de particiones/agrupaciones  $k$  sea predefinido, se llevaron a cabo varias pruebas para determinar el número  $k$  óptimo. Las pruebas determinaron que un número  $k$  grande ( $>5$ ) produce un sesgo en la información, al dejar tan sólo una estación climatológica en más de un grupo; mientras que un número pequeño ( $<4$ ) no es suficiente para realizar una clasificación adecuada. Después de haber realizado estas pruebas, se determinó que cuatro grupos son suficientes para proveer una adecuada clasificación. La figura 4.1 muestra la clasificación de las 17 estaciones climatológicas utilizadas para este trabajo.

**Tabla 4.1.** Clasificación de las estaciones climatológicas en grupos.

<b>Grupos</b>			
<b>I. Región central</b>	<b>II. Región oeste</b>	<b>III. Región costera</b>	<b>IV. Región este</b>
I.1 Abalá	II.1 CIAPY	III.1 Chicxulub Puerto	IV.1 Chemax
I.2 Chan Cenote	II.2 Mochá	III.2 Río Lagartos	IV.2 Loché
I.3 Holcá	II.3 Motul		IV.3 Peto
I.4 Kinchil	II.4 Tabí		
I.5 Sisal	II.5 Teabo		
	II.6 Telchac Puerto		
	II.7 Tzucacab		

Si bien, el método utilizado (*kmeans*) para llevar a cabo la clasificación de las estaciones climatológicas (Tabla 4.1) no toma en cuenta ningún tipo de factor externo, únicamente los datos diarios de temperatura; se observa que las agrupaciones son consistentes con otras variables climáticas, como se muestra en la Tabla 4.2. En ella se observan características muy similares para cada uno de los grupos

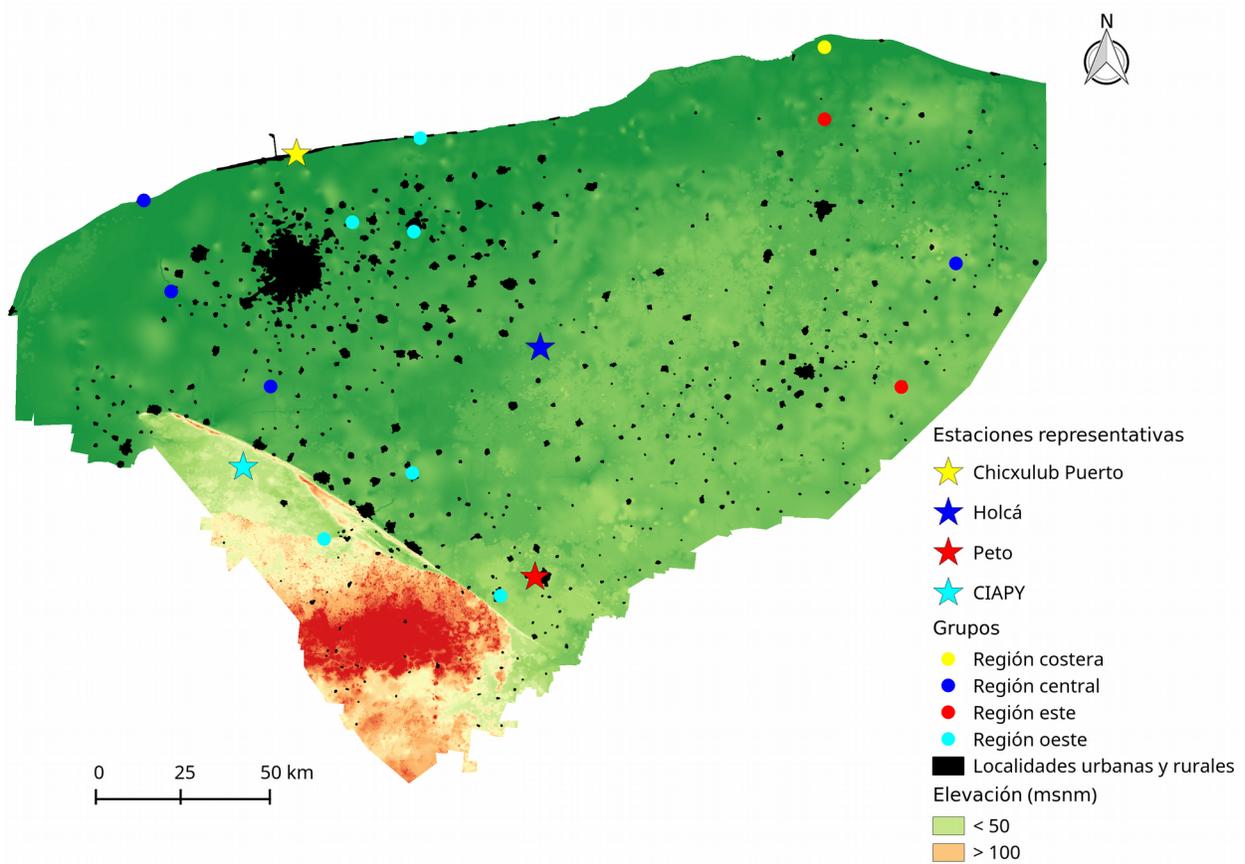
generados; por ejemplo, el tipo de clima cálido subhúmedo, los regímenes de temperatura media anual, y la flora dominante de cada uno de estos sitios (del tipo caducifolia). Para investigar si los factores fisiográficos están influenciando de alguna manera la distribución de los grupos, se comparó la ubicación de los grupos contra mapas de cobertura vegetal y de uso de suelo. Esto último porque la temperatura local puede estar relacionada a la degradación y cambio de uso de suelo que induce el hombre sobre el terreno, como lo sugieren Englehart & Douglas (2005).



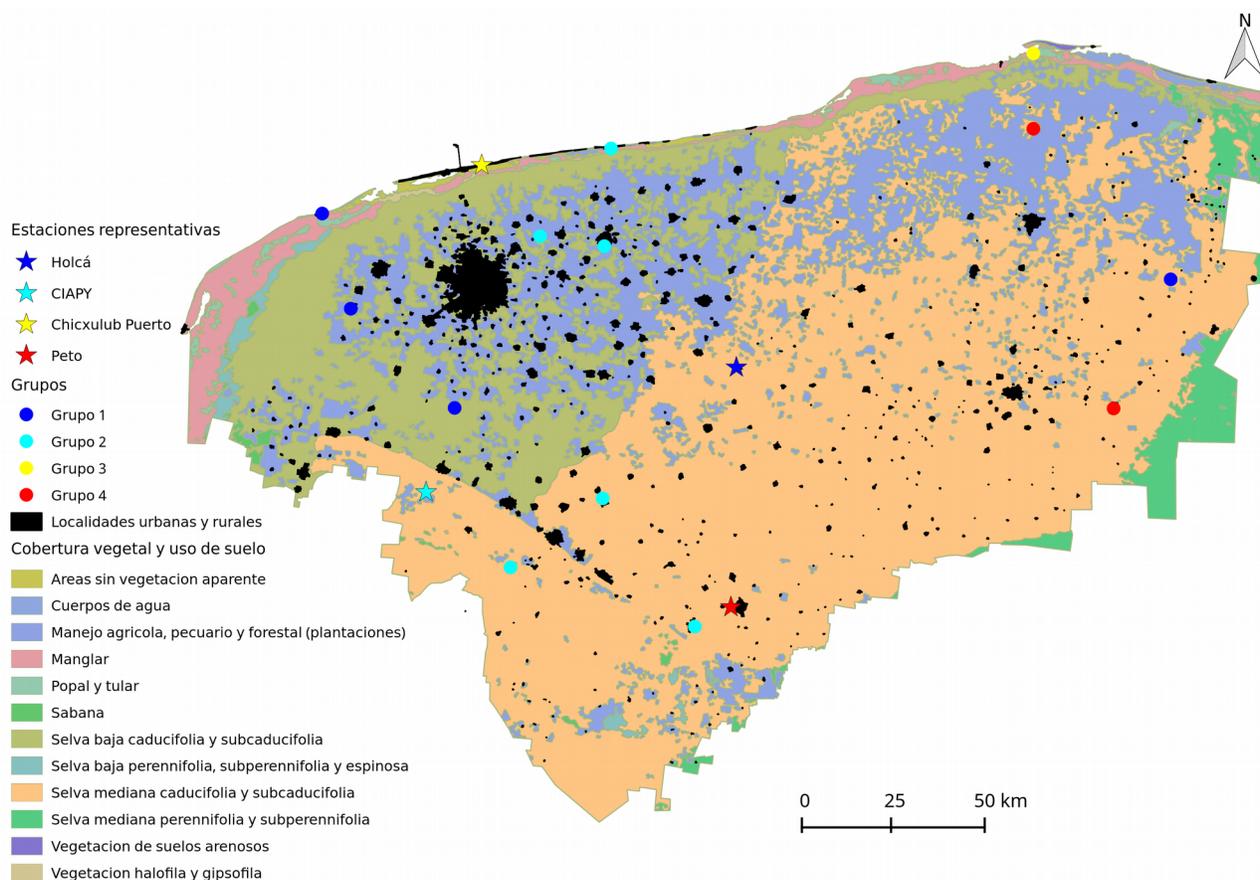
**Figura 4.1.** Clasificación de las estaciones climatológicas, los colores indican el grupo al que pertenece cada estación: región central (azul), región oeste (cian), región costera (amarillo) y región este (rojo).

La figura 4.2 muestra la ubicación de las principales zonas urbanas y rurales en Yucatán. De las 17 estaciones analizadas en este trabajo, nueve se localizan dentro de cabeceras municipales (zonas urbanas) (Abalá, Kinchil, Mocochoá, Motul, Teabo, Tzucacab, Chicxulub Puerto, Chemax y Peto); mientras que, las ocho restantes se ubican sobre poblados pequeños (Chan Cenote, Holcá, Sisal, CIAPY, Tabí, Telchach Puerto, Río Lagartos y Loché) (ver Anexo I Tabla III.1). La cercanía de estas estaciones a zonas urbanas, sugiere que la temperatura de dichos sitios podría comportarse diferente al de las estaciones localizadas en zonas no urbanizadas. Sin embargo, este factor no parece estar modulando la distribución de la temperatura máxima en la región. Al analizar la cobertura vegetal (Fig. 4.3) se observa que el 59% de los sitios analizados (10 estaciones) se localizan en zonas con gran cobertura vegetal caducifolia y subcaducifolia; 29% (5 estaciones) en sitios destinados para el manejo agrícola, y el 12% restante (2 estaciones) se sitúa en lugares con vegetación del tipo manglar, popal y

tular. A pesar de que las estaciones climatológicas se distribuyen sobre distintos tipos de suelo, los resultados obtenidos muestran que el comportamiento de la temperatura no está modulado por las variaciones espaciales en la vegetación.



**Figura 4.2.** Distribución espacial de las zonas urbanas y rurales del estado de Yucatán (en color negro) (Fuente de información: INEGI). En círculos de colores se muestra la clasificación de las estaciones climatológicas en grupos; región costera (amarillo), región central (azul), región este (rojo) y región oeste (cian); y con estrellas del mismo color, se presentan las estaciones utilizadas para describir los resultados en las secciones subsecuentes.



**Figura 4.3.** Comparación de la vegetación y uso de suelo para el estado de Yucatán (Fuente de información: CONABIO).

**Tabla 4.2.** Principales elementos climáticos de los sitios analizados. Notaciones: tipo de clima  $AW_0$  = cálido subhúmedo con lluvias en verano (0-60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal entre 5-10.2%);  $AW_0(x')$  = cálido subhúmedo con lluvias en verano (<60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal del 5-10.2%);  $AW_1(x')$  = cálido subhúmedo con lluvias en verano (<60 mm durante el mes más seco, con lluvia invernal mayor al 10.2%);  $BS_0(h')(x')$  = árido cálido con lluvias intermedias en verano (con lluvia invernal mayor al 18%); TMA = temperatura media anual. Fuente de información CONABIO 2017. Flora: SBC = selva baja caducifolia; SMC = selva mediana caducifolia; SMSC = selva mediana subcaducifolia; SBC = selva baja caducifolia; SAP = selva alta perennifolia; VA = vegetación aparente; M = manglar; SMSP = selva mediana subperennifolia; SASP = selva alta subperennifolia. Fuente de información INAFED (2010).

Estación	Municipio	Clima	TMA (°C)	Flora
Abalá	Abalá	$AW_0$	26-28	SBC
Chan Cenote	Tizimín	$AW_1(x')$	24-26	-
Holcá	Kantunil	$AW_0(x')$	26-28	SBC
Kinchil	Kinchil	$AW_0$	26-28	-

Sisal	Hunucmá	$BS_o(h')(x')$	24-26	SBC
CIAPY	Muna	$AW_1(x')$	24-26	SBC
Mocochá	Mocochá	$AW_o$	26-28	SBC
Motul	Motul	$AW_o$	26-28	SBC
Tabí	Oxkutzcab	$AW_1(x')$	26-28	SMC
Teabo	Teabo	$AW_o(x')$	26-28	SMSC
Telchac Puerto	Telchach Pto.	$BS_o(h')(x')$	24-26	SBC
Tzucacab	Tzucacab	$AW_o(x')$	26-28	SAP-SMSC
Chicxulub Pto.	Progreso	$BS_o(h')(x')$	24-26	VA
Río Lagartos	Río Lagartos	$AW_o(x')$	24-26	M-SBC-SMSC
Chemax	Chemax	$AW_1(x')$	24-26	SMSC-SMSP
Loché	Panabá	$AW_o(x')$	24-26	SMSC
Peto	Peto	$AW_o(x')$	26-28	SASP-SMSC

## 4.2. Temperatura máxima y mínima promedio por década

### 4.2.1. Temperatura máxima

En las secciones subsecuentes y para facilitar el análisis de temperatura se muestran los resultados de una sola estación por grupo (Tabla 4.3). Lo anterior con base en la variabilidad de temperatura observada para cada uno de los grupos analizados, en donde el comportamiento decadal de la  $t_{max}$  y la  $t_{min}$  presentaron patrones similares. Las figuras 4.4a-d muestran la variación por década de la  $t_{max}$  para cada uno de los grupos analizados. El grupo 1, que corresponde a la región central de Yucatán (Fig. 4.4a) presentó en las décadas de 1980 y 1990 un máximo de temperatura ( $>33^{\circ}\text{C}$ ) en mayo, en los meses posteriores se observa un descenso de la  $t_{max}$  (con ligeras variaciones para la década del 1990), que fue interrumpido por un segundo máximo de menor intensidad en el mes de agosto. Para la década del 2000 el comportamiento de la temperatura cambió, la  $t_{max}$  alcanzó su valor más alto ( $>32^{\circ}\text{C}$ ) en abril y mayo, y al igual que las décadas anteriores presentó un segundo máximo de menor intensidad en agosto. Un comportamiento similar se aprecia en el último periodo analizado (2010-2014). Cabe señalar que la temperatura promedio decadal presentó variaciones importantes, principalmente entre la década de 1990 (década más cálida) y el periodo 2010-2014 (periodo menos cálido) con aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  de diferencia.

**Tabla 4.3.** Estaciones utilizadas para mostrar los resultados del análisis de temperatura.

No. de grupo	Estación
I. Región central	Holcá
II. Región oeste	CIAPY
III. Región costera	Chicxulub Puerto
IV. Región este	Peto

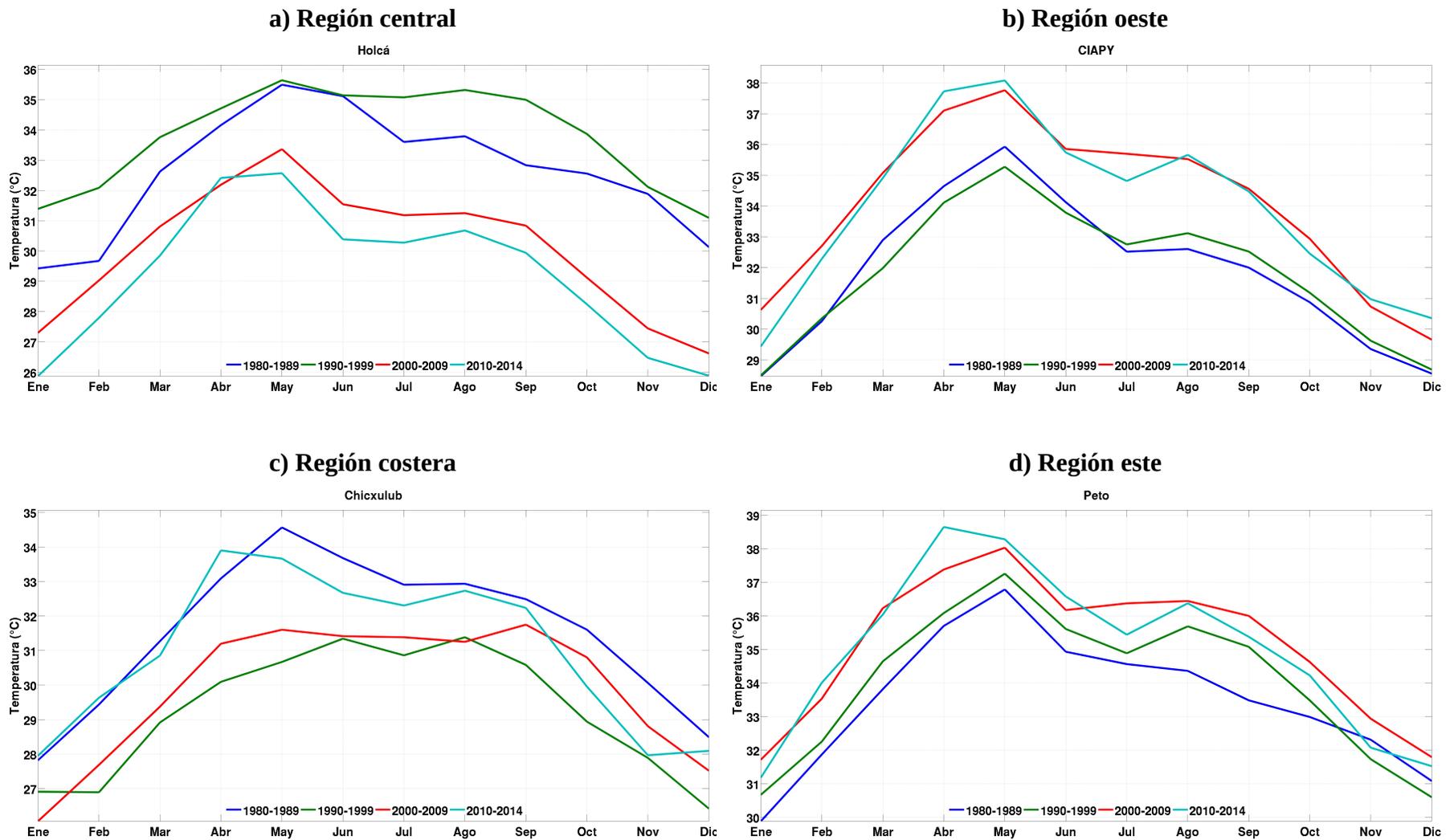
En la región oeste la  $t_{max}$  tiene un comportamiento diferente al de la región central. En la figura 4.4b se observa que para este grupo (oeste) el ciclo anual de la  $t_{max}$  en la última década (2010) es más cálida que en la década de 1980. El máximo de temperatura se registró en mayo (para los cuatro periodos analizados) en el que la diferencia de temperatura media entre la década de 1980 y el periodo 2010-2014 es aproximadamente 2°C.

En las estaciones ubicadas en la región costera (Fig. 4.4c) la  $t_{max}$  presentó una mayor variabilidad decadal. Si bien el promedio del ciclo anual es del tipo bimodal (con dos máximos), en las décadas de 1990 y 2000 los máximos no son tan evidentes y ocurren entre los meses de mayo-junio y agosto-septiembre. Por otra parte, en estas dos últimas décadas se registran temperaturas más frías, la diferencia entre las medias decadales para el mes de mayo es aproximadamente 4°C. La década de 1980 fue la más cálida de los cuatro periodos analizados seguida del periodo 2010-2014.

La región este (Fig. 4.4d) muestra un comportamiento similar al observado en la región oeste (Fig. 4.4b), sin embargo, a diferencia de ésta última en la región este la temperatura media por década muestra un aumento, en el sentido que cada década es más cálida que la anterior. La década de 1980 es aproximadamente 3°C menos cálida que el último periodo analizado (2010-2014). Cabe mencionar que para estos dos grupos, en los años estudiados a partir de 2010 el máximo de temperatura se desplaza mensualmente, es decir, para todas las estaciones en la primera década la  $t_{max}$  ocurría en mayo y para el final del periodo de estudio el máximo ocurre en el mes de abril.

Estos máximos mensuales en la  $t_{max}$  promedio decadal, coinciden con el final de la época de secas (abril-mayo), periodo en el que se registran las temperaturas más altas sobre el estado de Yucatán. Después de este periodo, la  $t_{max}$  muestra pequeños descensos de temperatura que se hacen más evidentes a partir del mes de noviembre. Lo anterior está asociado a diversos procesos atmosféricos, como: la temporada de “Nortes” (noviembre-febrero) caracterizada por vientos intensos y bajas temperaturas; y las brisas marinas, que desplazan las masas de aire hacia el sureste del estado modificando las trayectorias de las masas de aire (INEGI, 2002).

Los resultados muestran que para las regiones este y oeste del estado de Yucatán, la  $t_{max}$  promedio decadal presentó un constante aumento a lo largo de nuestro periodo de estudio (1980-2014). Lo cual es consistente con los resultados presentados en el último informe del IPCC (2013), en el cual se identificó una disminución importante en el número de noches frías por año, ocasionado por el aumento de la temperatura superficial a nivel mundial en los últimos 50 años. Cabe resaltar que en este trabajo no se utilizó la temperatura media, sino la máxima y la mínima.



**Figura 4.4.** Temperatura máxima promedio por década para las estaciones a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color representan cada uno de los periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).

## 4.2.2. Temperatura mínima

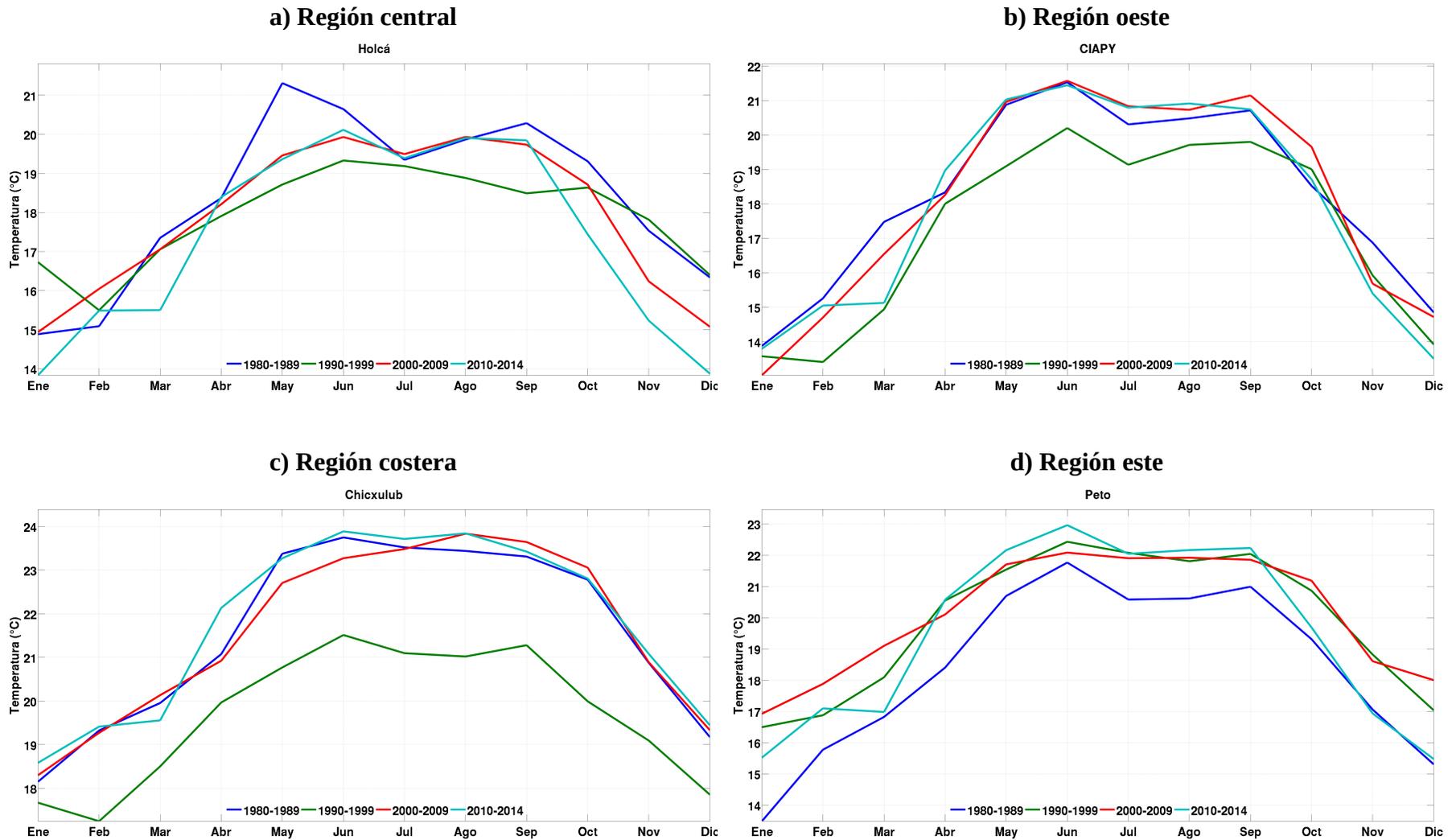
Al analizar la  $t_{min}$  promedio decadal de la región central (Fig. 4.5a), se observó que el valor más alto se presenta en el mes de mayo, en la década de 1980; mientras que para las décadas posteriores (1990-2000) y el periodo 2010-2014 este máximo se registró en junio, en ambos casos este máximo de temperatura superó los 19°C. Al igual que en la  $t_{max}$ , la  $t_{min}$  presenta una distribución bimodal sólo que para esta última el segundo máximo ocurre en el mes de septiembre. El último periodo analizado (2010-2014) es aproximadamente 2°C más frío que la década de 1980.

En las estaciones de la región oeste ( Fig. 4.5b) se observa a la década de 1990 como la más fría de los cuatro periodos analizados. Las décadas de 1980, 2000 y el periodo 2010-2014 muestran un comportamiento similar en el ciclo anual de la  $t_{min}$ , al igual que en la ocurrencia de sus máximos. La distribución de la  $t_{min}$  para esta región es de tipo bimodal, con sus máximos en junio y septiembre, éste último de menor intensidad.

Para la región costera (Fig. 4.5c) se observa una distribución bimodal en la carrera anual de la  $t_{min}$  media decadal. La década de 1990 es la más fría en comparación con los otros tres periodos de estudio, con dos máximos de similar intensidad (~22°C) en junio y septiembre. Con respecto a las décadas restantes (1980 y 2000) y el periodo 2010-2014, el registro muestra que éstos mantienen una variabilidad similar en sus valores de temperatura, sin embargo se observó que para estos tres periodos los máximos registrados presentaron un desfase de un mes en la ocurrencia del segundo valor.

Con respecto a la región este, en la figura 4.5d se observa una distribución bimodal con los máximos de temperatura en los meses de junio y septiembre, en los cuatro periodos analizados. Opuesto a lo observado en las regiones centro, oeste y costera, la década de 1990 es la más fría (~2°C) con respecto al último periodo de estudio (2010-2014). Las décadas de 1990 y 2000 muestran una variabilidad similar en la carrera anual de la  $t_{min}$ , con máximos de temperatura cercanos a los 22°C en junio y septiembre.

En general, se observa que para la  $t_{min}$  promedio por década los máximos mensuales se presentan después de la temporada de secas, entre los meses de mayo y junio con valores de temperatura que oscilan los 19-24°C. Los cuales presentan poca variabilidad de temperatura con respecto al segundo máximo, en el mes de septiembre. Para Yucatán, la temporada más fría comprende los meses de diciembre a febrero con temperaturas por debajo de los 19-20°C, y es consistente en los 35 años analizados.



**Figura 4.5.** Temperatura mínima promedio por década para las estaciones a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color representan cada uno de los periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).

### **4.3. Variación decadal del percentil 95**

Con base en los resultados obtenidos, y para verificar si los cambios decadales de la temperatura son estadísticamente significativos, para considerar de manera independiente cada una de las década, se realizó la prueba de Wilcoxon a los datos de  $t_{max}$  y  $t_{min}$ . Esta prueba se llevó a cabo utilizando el registro temporal por década para ambas series de datos. Los resultados de la prueba se muestran en la Tabla II.1 y Tabla II.2 (Anexo II). La prueba demostró que en el 88% de los sitios estudiados (15 de las 17 estaciones) los cambios de temperatura entre décadas, resultaron ser significativos a un nivel de confianza del 5%. Como la prueba llevada a cabo compara la distribución de las muestras (datos) y determina si ambos conjuntos de datos pertenecen a una misma distribución, el rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) sugiere que las muestras (datos) presentan distribuciones diferentes. Por lo que, con base en esto cada uno de las décadas se consideró como muestra independiente para el cálculo del percentil 95.

Para estudiar el comportamiento extremal de la temperatura máxima y mínima, se calcularon los valores extremales (p95) decadales y anuales para cada una de las series de temperatura. El p95 decadal se calculó con base en los datos decadales, tanto para la  $t_{max}$  como para la  $t_{min}$ , y el p95 anual se calculó para cada uno de los años contenidos en cada una de las décadas analizadas. Los valores del p95 decadal ( $t_{max}$  y  $t_{min}$ ), como se menciona en la metodología, fueron utilizados para identificar a las HW dentro del periodo de 1980-2014 en Yucatán. Los valores del p95 decadal se muestran en el Anexo II (Tabla II.3).

#### **4.3.1. Temperatura máxima**

Respecto a la variación decadal del p95, en las estaciones de la región central (Fig. 4.7a) se presentaron variaciones (p95 decadal) del orden de 0.5°C y 3°C entre en los cuatro periodos de estudio. Para el último periodo analizado (2010-2014) el valor del p95 decadal fue menor (de 1°C a 4°C) al observado en la década de 1980, sin embargo, este descenso en el valor extremal no fue significativo como para verse reflejado en la  $t_{max}$  media decadal.

A diferencia de lo observado en la región central, en la región oeste (Fig. 4.7b) la variabilidad del p95 decadal fue menor (de 0.5°C a 2°C) para cada uno de los cuatro periodos de interés, mientras que para el periodo 2010-2014 el valor decadal del p95 fue mayor (entre 0.5°C y 2°C) al registrado en la década de 1980. Además de la variabilidad del p95 decadal registrada, durante los 35 años de estudio se observaron cambios importantes en el p95 anual. Por ejemplo, se observó que la primera mitad de la década de 1990 fue más fría que el resto del periodo analizado (década 1990), en la que ésta

disminución en el p95 anual durante la primera mitad fue lo suficientemente importante para que en esta región el promedio decadal de la tmax sea menor que el resto del periodo analizado (35 años) (ver Fig.4.4b). Cabe señalar que estos cambios anuales no modifican el valor del p95 decadal.

Por otra parte, para la región costera sucede algo similar a lo descrito en la región oeste, solo que para los primeros tres años de la década del 2000 (Fig. 4.7c). Esta disminución en el valor anual del p95 fue significativa, tal que cambió el comportamiento de la tmax promedio decadal (ver Fig. 4.4c) Lo anterior significa que el valor medio de la temperatura máxima en estas décadas estuvo modulada por el valor de los extremos (p95 anual). En esta región al igual que en la región central del estado, se observó una disminución (de menor intensidad) en valor decadal extremal, de 0.5°C a 1°C entre la primera década y el periodo 2010-2014.

Para la región este los extremos decadales (p95) presentaron una variabilidad del orden de 1°C y 2°C en los cuatro periodos de estudio. Se observó que para los años analizados a partir del año 2010 en la estación de Peto (Fig. 4.7d), el p95 decadal mostró un aumento de 2°C en comparación con la década de 1980. Por el contrario las estaciones restantes (dos) registraron el mismo valor extremal para estos periodos (1980 y 2010-2014).

Las variaciones en los valores extremos del p95 (decadales y anuales) ya descritos, indican que en las regiones oeste y este la tmax presentó un aumento a lo largo del periodo de estudio. Además de lo anterior, en estas dos regiones se observa un número considerable de años en los que el valor anual del p95 mantiene una intensidad igual o superior al valor decadal extremal (ver Anexo II Tabla II.4), así como una mayor frecuencia en el número de días cálidos que superan este valor (Fig. 4.6a). Sin embargo lo anterior no se observa en las regiones central y costera.

### **4.3.2. Temperatura mínima**

A diferencia de la tmax, en la tmin la variabilidad del p95 decadal en la región central fue menor, entre cada uno de los periodos de estudio este extremo presentó un rango de entre 0.5°C y 2°C. No obstante, pese a registrar una variabilidad extremal menor por década que la tmax, en ésta región también se observó una disminución del p95 (de 2°C a 3°C) para el periodo de 2010-2014, en comparación con la década de 1980 (Fig. 4.8a). Lo anterior es consistente con lo registrado el promedio decadal de la tmin (ver Fig. 4.5a) para este último periodo.

En cuanto a la región oeste, en cinco de las estaciones el p95 decadal registró variaciones del orden de 0.5°C y 3°C en los periodos de interés, mientras que para las dos estaciones restantes de este grupo el

valor extremal decadal no varió. Sin embargo, al igual que en la  $t_{max}$ , para esta región la primera mitad de la década de 1990 fue más fría (Fig. 4.8b). Esta disminución en el valor del p95 anual se puede asociar al promedio decadal de la  $t_{min}$ , ya que esta década fue la más fría en los 35 años del periodo de estudio (ver Fig. 4.5b).

Por otra parte, en la región costera los extremos decadales (p95) registraron variaciones menores a los observados en la regiones centro y oeste, entre los cuatro periodos analizados el valor extremal varió de  $0.5^{\circ}\text{C}$  a  $1^{\circ}\text{C}$ . No obstante, también se observó que para esta región la década de 1990 presentó una variabilidad importante en el valor anual del p95 (Fig. 4.8c). La cual puede asociarse con el descenso en el promedio decadal de la  $t_{min}$  (ver Fig. 4.5c).

Al igual que la región costera, la región este (Fig. 4.8d) presentó poca variabilidad del p95 decadal en los periodos analizados (entre  $0.5^{\circ}\text{C}$  y  $1^{\circ}\text{C}$ ). Sin embargo, a diferencia de la región anterior (costera), en esta parte del estado se observó un aumento de entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $2^{\circ}\text{C}$  para el periodo de 2010-2014. Cabe destacar que para esta región el p95 anual mantuvo valores cercanos al p95 decadal durante los 35 años de estudio.

Al analizar la cantidad de años en los que el valor anual del p95 se mantiene cerca o por encima del valor extremal decadal, se observa que para la  $t_{min}$  la cantidad de éstos es mayor con respecto a la  $t_{max}$  (ver Anexo II Tabla II.4), lo cual sugiere que la temperatura nocturna en Yucatán se ha incrementado durante los últimos años, es decir, las noches son cada vez más cálidas (Fig. 4.6b). Estos resultados concuerdan con lo reportado en el cuarto informe del IPCC (2007), en el cual se concluye que los días y noches cálidas han incrementado en los últimos 50 años (1906-2005). Así mismo, este incremento de noches cálidas coinciden con los resultados reportados por Alexander et al. (2006) y Donat et al. (2013), quienes identificaron un incremento en el número de noches cálidas, en más del 73% de la superficie terrestre a partir de 1950.

Promedio de días/noches cálidos

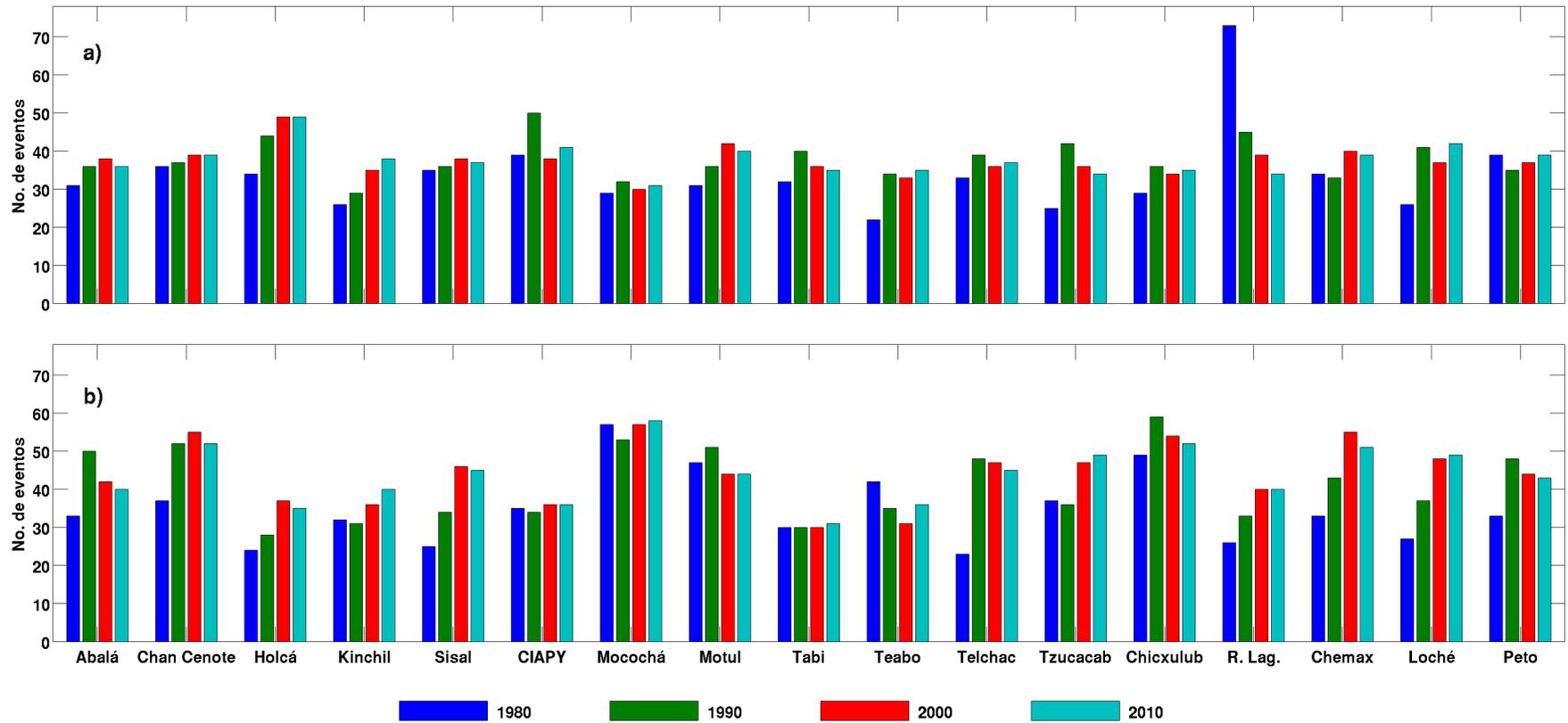
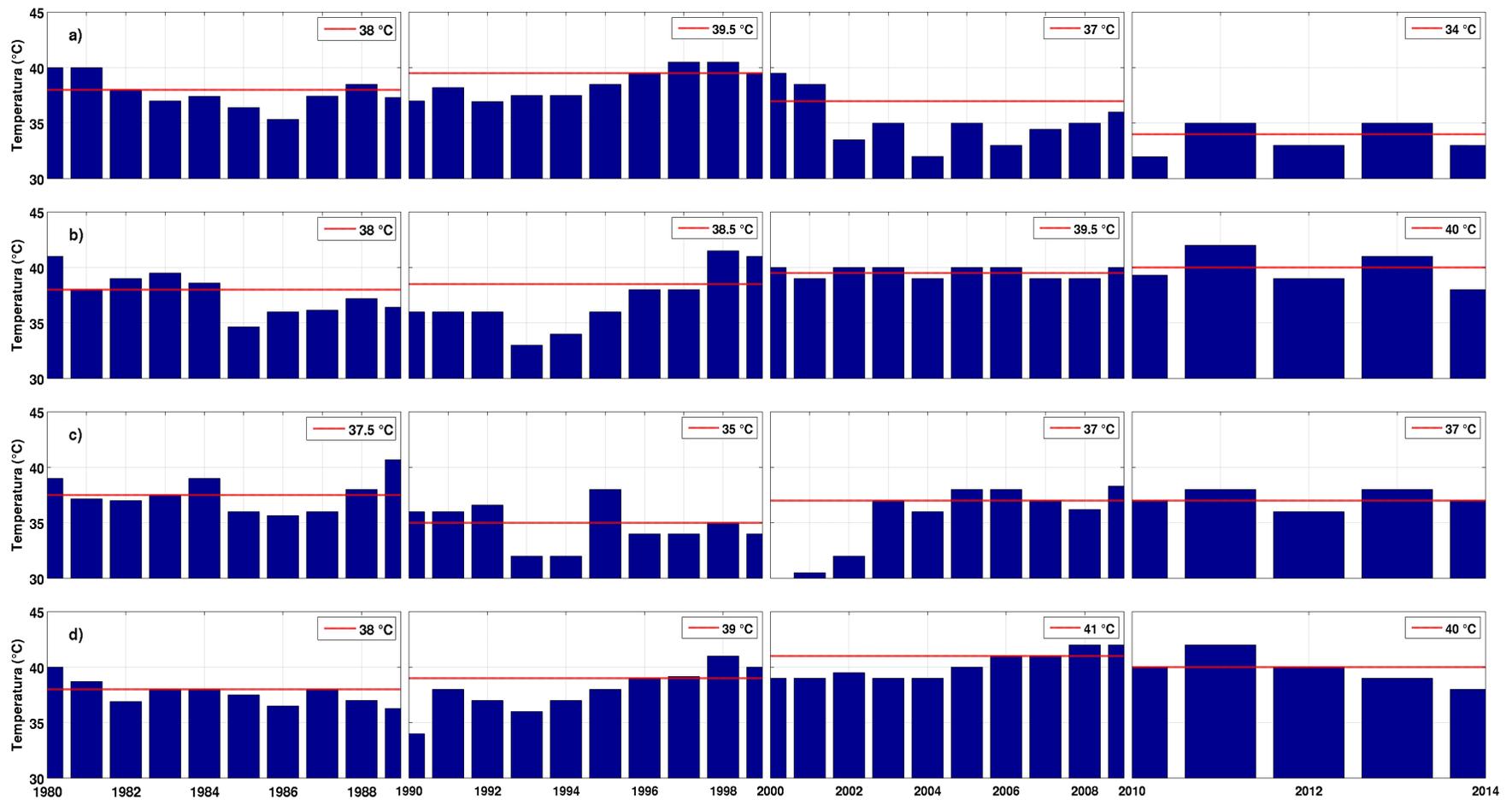
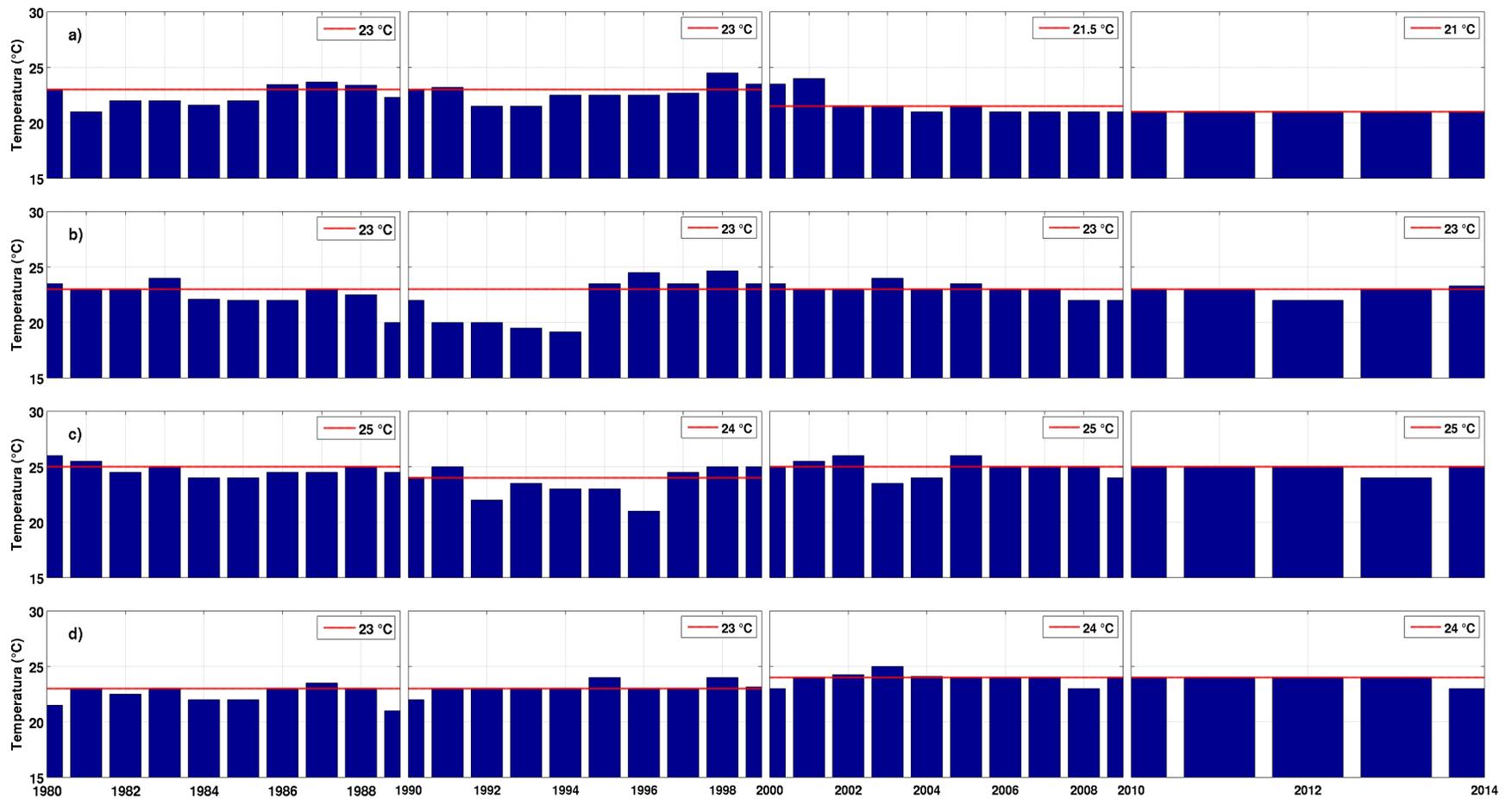


Figura 4.6. Promedio de a) días (tmax) y b) noches (tmin) calientes que igualan o superan el valor del percentil 95 decadal. Las barras de color indican los cuatro periodos analizados, 1980-1989 (azul), 1990-1999 (verde), 2000-2009 (rojo) y 2010-2014 (cian).



**Figura 4.7.** Variación del percentil 95 para la temperatura máxima para la estación de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color rojo representan el umbral de p95 de tmax por década y; las barras de color azul representan la variación anual.



**Figura 4.8.** Variación del percentil 95 para la temperatura mínima para la estación de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). Las líneas de color rojo representan el umbral de p95 de tmax por década y; las barras de color azul representan la variación anual.

## 4.4. Ondas de calor

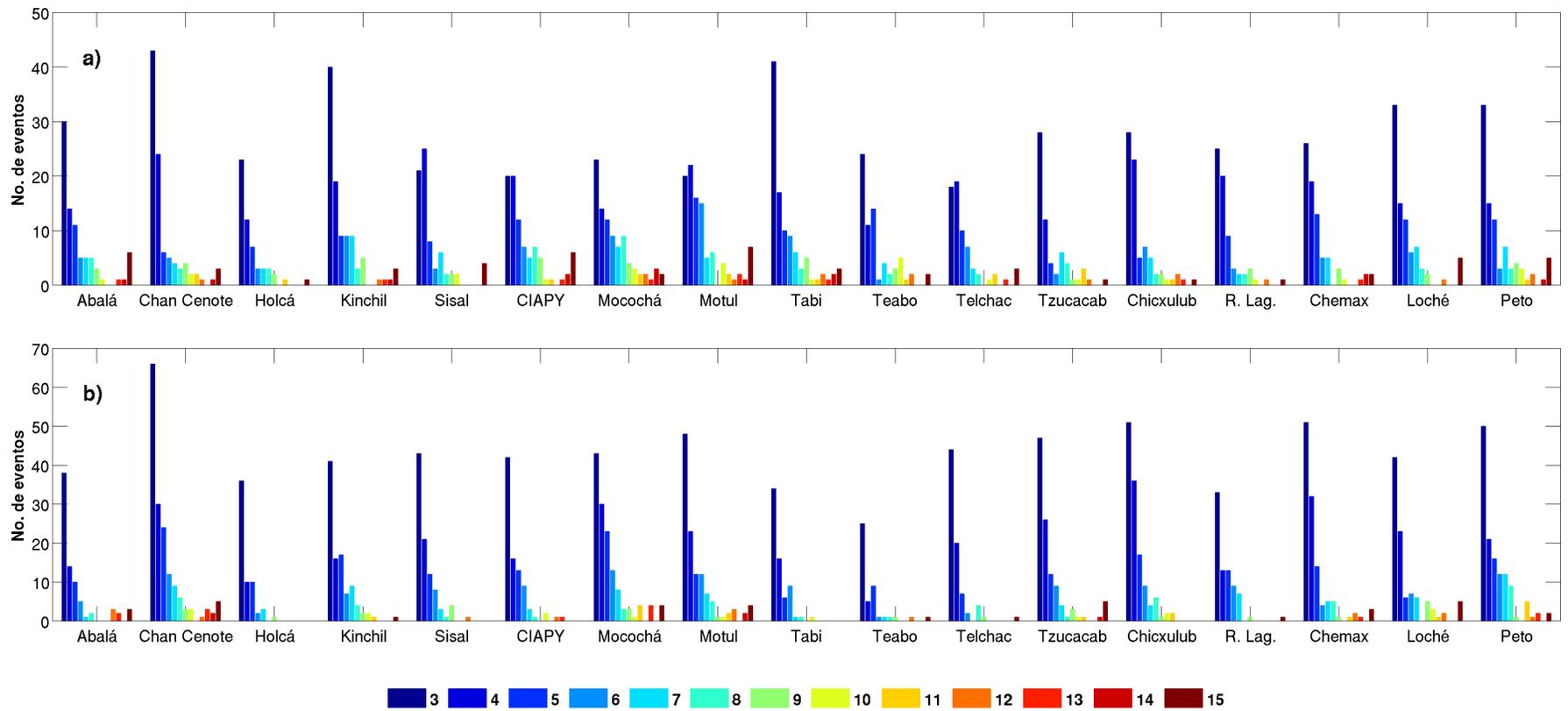
### 4.4.1. Duración

Como las HW son eventos climáticos directamente relacionados al aumento de la temperatura, éstas podrían estar directamente relacionadas con el aumento de los eventos extremos, ya sea en número o persistencia (duración). Por lo que en esta sección, se identificaron: 1) la presencia de los años calientes (años en los que el valor anual del p95 excede o iguala el valor extremal decadal) para cada los cuatro periodos de estudio (1980-89, 1990-99, 2000-09 y 2010-14); y 2) la persistencia/duración de los días y noches calientes (días/noches con temperatura igual o superior al p95 decadal) en los años cálidos. Una vez identificados los días/noches calientes dentro de un año cálido, se estableció una definición para las HW en Yucatán. Las figuras 4.9a (tmax) y 4.9b (tmin) muestran el total de eventos de HW, es decir, el número de días que de manera consecutiva se igualó o sobrepasó el p95 decadal durante el periodo de 1980-2014. Cabe señalar que por duración, se hace referencia al número exacto de días que persistieron las condiciones.

Con respecto a la tmax (Fig. 4.9a), en 12 de las 17 estaciones analizadas se observa que las HW que ocurren con mayor frecuencia son las de 3 días, con el 30% del total de HW registradas; en las 5 estaciones restantes estos eventos representan el 20% del total de los registrados en los 35 años de estudio. A partir de los eventos de 4 días y conforme aumenta la duración de las HW, su frecuencia disminuye. Por otra parte se observaron tres casos especiales en los que se registraron eventos con más de 30 días de duración, tal fue el caso de las estaciones pertenecientes a la región oeste; CIAPY (32 días) y Teabo (31 días) en mayo de 1980 y 2011, respectivamente; y la estación Río Lagartos (33 días) de la región costera en mayo de 1980.

Al analizar el número de HW registrados en la tmin (Fig. 4.9b) se observó que al igual que la tmax, para cada uno de los grupos las HW con mayor frecuencia son las de 3 días, con más del 30% del total de los eventos registrados. Por otra parte, también en la tmin se registraron HW con periodos superiores a los 30 días, como se observa en la estación Chan Cenote (31/05/1998 -30/06/1998) de la región central, y las estaciones Peto (24/08/1995 – 24/09/1995) y Loché (17/06/2007 – 21/07/2007) de la región este. A diferencia de la tmax, los eventos mayores a 30 días ocurrieron en los meses de mayo, junio y agosto.

Con base en los resultados de este estudio las HW en Yucatán se pueden definir como una secuencia de al menos cuatro días o noches consecutivos con temperatura superior o igual al valor del p95 decadal para la  $t_{max}$  y la  $t_{min}$ , según corresponda. Para la elección del número de días (4 días para el caso de Yucatán) con que se identifica un evento de HW, se consideraron los estudios que toman en cuenta la respuesta humana ante el aumento de temperatura. Los estudios reportan que tres días consecutivos con clima muy cálido son suficientes para aumentar la tasa de mortalidad (e.g., Saez et al. 1995; Nairn & Fawcett 2014).



**Figura 4.9.** Frecuencia de eventos de HW para la temperatura a) máxima y b) mínima. En barras de color se indican la duración (en días) de las HW para el periodo de 1980-2014.

#### 4.4.2. Intensidad

Una vez definido el concepto de HW para el estado de Yucatán, se procedió a cuantificar la intensidad de estos eventos extremos. Para ello se estableció una intensidad media con la cual se identificó si las HW en Yucatán están incrementando o disminuyendo en intensidad.. Para determinar la intensidad, se empleó el índice de intensidad de onda de calor reportado por Cardós et al., (2007), el cual ha sido utilizado para definir la intensidad de este tipo de eventos extremos en otras regiones del país como es el caso del estado de Veracruz (Díaz Lázaro, 2011). El índice de intensidad se define como:

$$IIOC = \frac{1}{2} \left( \frac{Pp}{Pmp} + \frac{Tp}{Tmp} \right) \quad (2)$$

donde:

IIOC: es el índice de intensidad de las HW.

Pp: es la duración del evento de HW (en días).

Pmp: es la duración máxima de todos los eventos de HW (en días).

TP: es la temperatura promedio de la tmax/tmin del evento de HW.

Tmp: es la temperatura máxima de la tmax/tmin de todos los eventos de HW.

Cabe señalar que entre más se acerque a 1 este índice mayor es la intensidad de las HW. La intensidad de las HW se dividió en 3 categorías (Tabla 4.4), bajo, medio y alto (para ello se obtuvieron los terciles del índice de intensidad).

**Tabla 4.4.** Criterio de clasificación del índice de intensidad para los eventos de HW.

Clasificación del IIOC		
Intensidad	Tmax	Tmin
Baja	< 0.59	< 0.62
Media	0.59 – 0.69	0.62 – 0.74
Alta	> 0.69	> 0.74

La Tabla 4.5 muestra la cantidad de HW registradas en cada uno de los periodos de estudio por categoría. Se encontró que tanto para la tmax como para la tmin, en los 35 años analizados la intensidad de estos eventos se encuentra en la categoría media (aproximadamente con un 40% del total de eventos registrados en esta categoría) del 100% de los sitios analizados (17 estaciones).

Si bien desde su tercer informe, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2001) menciona que para el Hemisferio Norte se espera un aumento tanto en frecuencia como en intensidad de estos eventos extremos a causa del aumento de la temperatura a nivel global. Nuestros resultados reflejan que para Yucatán, las HW no han presentado un aumento en su intensidad durante los últimos 35 años, y se han mantenido con una intensidad media en el 100% de los sitios analizados tanto para la  $t_{max}$  como para la  $t_{min}$ . A diferencia de los eventos más intensos que sólo representan aproximadamente el 25% del total de eventos encontrados en los 35 años de estudio (ver Tabla III.2 Anexo III). Lo anterior muestra que las proyecciones de los modelos climáticos globales no necesariamente resuelven de manera adecuada todas las regiones del planeta. Lo que pone de manifiesto la necesidad de estudios como el presente que sirven para caracterizar las HW y establecer una línea base para el estudio de eventos extremos, y cómo es que éstos podrían estar variando en un futuro.

**Tabla 4.5.** Eventos de HW registrados por década para el periodo de 1980-2014, clasificados con base en el IIOC como eventos de (B) baja, (M) media y (A) alta intensidad.

Estaciones		1980			1990			2000			2010		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
Abalá	Tmax	-	11	6	4	5	2	4	9	5	4	2	-
	Tmin	-	5	4	4	10	6	5	2	-	1	3	-
Chan Cenote	Tmax	5	11	7	-	5	3	4	4	3	5	7	1
	Tmin	4	10	3	-	14	10	16	23	9	3	4	2
Holcá	Tmax	1	6	3	-	4	3	4	6	-	4	3	3
	Tmin	2	2	1	-	4	1	3	3	2	1	5	2
Kinchil	Tmax	1	10	5	2	7	4	4	6	5	8	7	1
	Tmin	-	11	4	1	7	6	1	7	2	12	5	3
Sisal	Tmax	4	9	4	3	7	4	2	7	5	3	4	-
	Tmin	5	4	2	2	4	4	5	15	5	-	3	1
CIAPY	Tmax	8	10	3	5	6	5	4	12	3	-	6	6
	Tmin	2	11	1	2	6	5	4	5	4	3	2	1
Mocochá	Tmax	2	8	4	7	10	4	4	8	4	4	8	5
	Tmin	-	19	4	20	4	6	-	22	11	-	7	2
Motul	Tmax	4	10	6	7	6	6	4	15	7	5	11	1
	Tmin	8	14	7	8	16	6	-	2	-	2	4	5
Tabí	Tmax	4	8	3	4	10	6	4	9	5	3	3	1
	Tmin	-	8	3	-	-	-	6	7	4	2	3	1
Teabo	Tmax	-	5	-	6	6	5	2	9	5	3	2	1
	Tmin	1	1	-	1	-	-	1	3	-	1	8	5
Telchac Puerto	Tmax	3	5	1	-	10	2	6	6	4	3	3	5
	Tmin	2	-	2	-	6	3	7	7	3	-	4	1
Tzucacab	Tmax	6	4	2	2	4	3	-	8	4	-	2	-
	Tmin	-	8	2	-	7	1	6	12	9	8	6	3
Chicxulub Puerto	Tmax	1	10	4	4	3	5	2	9	1	5	6	3
	Tmin	2	11	3	13	7	6	1	15	6	1	8	4
Río Lagartos	Tmax	4	5	4	1	4	1	2	8	3	2	7	1
	Tmin	-	4	1	-	6	6	9	10	3	1	4	-
Chemax	Tmax	4	7	3	3	5	1	5	10	5	1	3	4
	Tmin	2	7	-	8	6	4	7	14	10	-	7	3
Loché	Tmax	-	9	1	-	8	5	3	6	5	9	3	1
	Tmin	1	5	-	9	1	-	2	17	10	2	7	4
Peto	Tmax	7	6	2	4	9	2	-	10	4	2	4	6
	Tmin	4	8	3	15	16	11	-	11	2	-	7	4

### 4.4.3. Frecuencia

En esta sección se describe la frecuencia mensual de las HW en Yucatán para la  $t_{max}$  y la  $t_{min}$ .

En la figura 4.10a se presenta la variabilidad mensual de las HW para el grupo 1. Se observa que para la década de 1980 la mayor ocurrencia de estos eventos extremos se presenta durante los meses de abril a agosto, registrándose el mayor número de eventos en el mes de abril. A partir de la década de 1990 el máximo de ocurrencia de las HW es en mayo y se llegan a registrar HW incluso en algunos meses invernales. La década de los 1990 presenta la menor ocurrencia de HW y esto es consistente con lo observado en el promedio decadal de la  $t_{max}$  (Fig. 4.4a), en el que ésta década es la más fría.

En la región oeste (Fig. 4.10b) se registra una aparente disminución en el número de HW durante el periodo 2010-2014. A diferencia de la región central, en la región oeste el mes de mayor ocurrencia de las HW es mayo, para los 35 años de estudio.

El periodo de ocurrencia de HW en la región costera (Fig. 4.10c) se mantiene acotado a los meses de abril a junio, en el que en la década de 1990 se observó un menor número de eventos de HW, sin embargo se observa una mayor distribución de los eventos a lo largo del año (de marzo a agosto).

En el grupo 4 (Fig. 4.10d) las tres primeras décadas tienen el máximo número de HW en mayo, y durante el último periodo analizado (2010-2014) este máximo se desfasa a mes de junio.

Al analizar la frecuencia de las HW para la  $t_{max}$  (Figs. 4.10a-d y la Tabla III.1 del Anexo III), se observó que aunque en Yucatán el periodo de ocurrencia de estos eventos extremos varía para cada uno de los grupos, la mayor parte de las HW ocurren durante los meses de abril-mayo en la década 1980, mientras que para los periodos subsecuentes se observa un desfase en el máximo de ocurrencia de mayo-junio.

Ya que para el último periodo de estudio solo se están usando 5 años, y para evitar tener un sesgo en la estimación de la frecuencia de eventos, se realizó un promedio de número de eventos para cada periodo de estudio (considerando que para el último “periodo” solo se cuenta con 5 años; Tabla 4.6). Se observa que en general ha habido más HW en los últimos 5 años que en la primera década del periodo de estudio, y aunque esto no es del todo concluyente (hasta no tener los datos de los 2010 completos) se puede conjeturar que si bien la intensidad de las HW no ha aumentado si ha aumentado su frecuencia.

**Tabla 4.6.** Estimación de eventos de HW en la tmax por periodo analizado.

<b>Estaciones</b>	<b>1980-89</b>	<b>1990-99</b>	<b>2000-09</b>	<b>2010-14</b>
Holcá	1.0	0.7	1.0	2.0
CIAPY	2.1	1.6	1.9	2.6
Chicxulub Puerto	1.5	1.2	1.2	2.8
Peto	1.5	1.5	1.4	2.4

Para la tmin, en la figura 4.11a (región central) las HW se presentan durante los meses de abril a septiembre. En la década de 1980 estos eventos se registraron entre los meses de mayo a agosto, con el mayor número de HW en junio. Durante la década de 1990 las HW no presentaron un aumento en cuanto a número, sin embargo estuvieron presentes de abril a noviembre. Para la década de 2000 y el periodo 2010-2014, se observó un desfase en cuanto al mes de mayor ocurrencia. Para la década de 2000 se registró un máximo en abril, mientras que en el último periodo (2010-2014) se presentó en septiembre.

En la Fig 4.11b (región oeste) se observa que para las primeras tres décadas (1980-2009) la frecuencia máxima de las HW se presenta durante el mes de junio. En el periodo de 2010-2014 la ocurrencia de estos eventos es menor y el máximo de ocurrencia se adelanta a mayo, además se observó una disminución en el número de HW para este último periodo.

En la región costera (Fig. 4.11c), la frecuencia de estos eventos extremos es mayor durante el mes de junio en los cuatro periodos de estudio. La década de 1990 presenta la mayor cantidad de HW, y posterior a ésta, en la década de 2000 y el periodo 2010-2014 se observó una disminución gradual en la ocurrencia de estos eventos extremos.

Por otra parte, e la región este (Fig. 4.11d) el periodo de ocurrencia de HW comprende los meses de marzo a noviembre, con la mayor concentración de eventos en el periodo mayo-julio. Al igual que en la región anterior (costera), se observa que el máximo de las HW se presenta en junio para las cuatro periodos analizadas, así como una disminución de los eventos extremos a partir de la década de 1990.

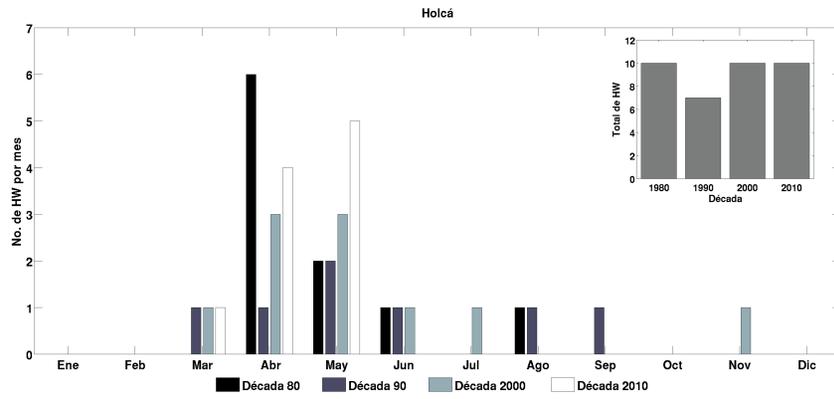
Analizando la frecuencia de las HW de la tmin (Figs. 4.11a-d y Tabla III.1 del Anexo III), se observó que para tres de los grupos analizados (regiones oeste, costera y este), junio tiende a ser el mes con mayor ocurrencia de eventos extremos (18% del total registrados) para las primeras tres décadas (1980-2009), mientras que a partir del año 2010 el máximo de las HW se desfasa entre los meses de mayo y junio.

En cuanto al número de HW presentes en cada una de los periodos de interés (Tabla 4.7), se observó que para la tmin, estos eventos extremos son más frecuentes durante las primeras tres décadas, respecto a los últimos 5 años. No obstante, como ya se mencionó en la sección anterior, la falta de un registro completo para este último periodo (2010-2014) no permite hacer una adecuada comparación respecto al aumento de eventos a partir del año 2010; por lo que, con estos resultados se puede decir que para la tmin la frecuencia de los eventos extremos no han presentado una tendencia en aumento durante este último periodo.

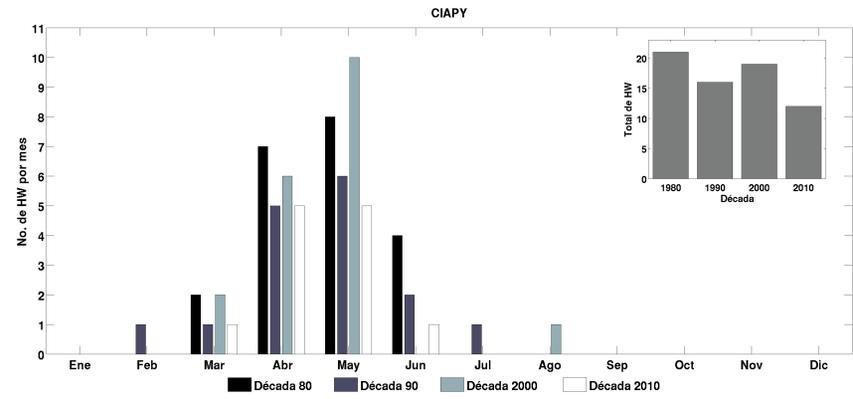
**Tabla 4.7.** Estimación de eventos de HW en la tmin por periodo analizado.

<b>Estaciones</b>	<b>1980-89</b>	<b>1990-99</b>	<b>2000-09</b>	<b>2010-14</b>
Holcá	0.5	0.5	0.8	1.6
CIAPY	1.4	1.3	1.3	1.2
Chicxulub Puerto	1.6	2.6	2.2	2.6
Peto	1.5	4.2	1.3	2.2

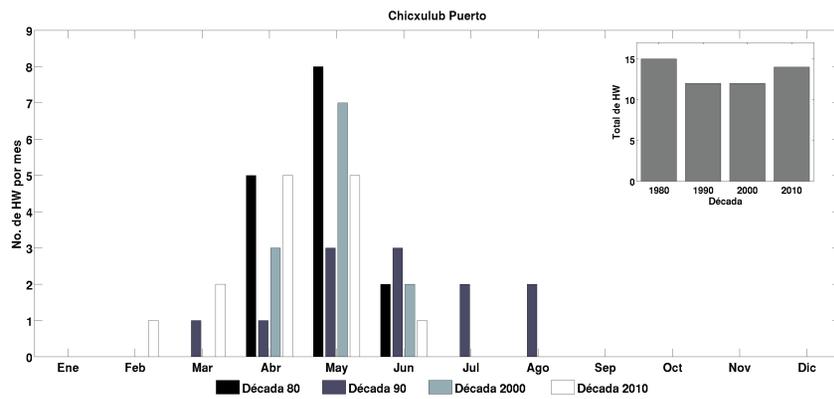
### a) Grupo 1



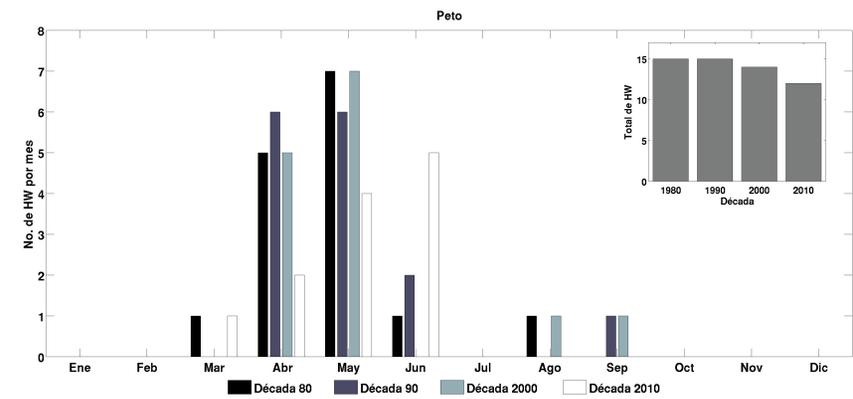
### b) Grupo 2



### c) Grupo 3

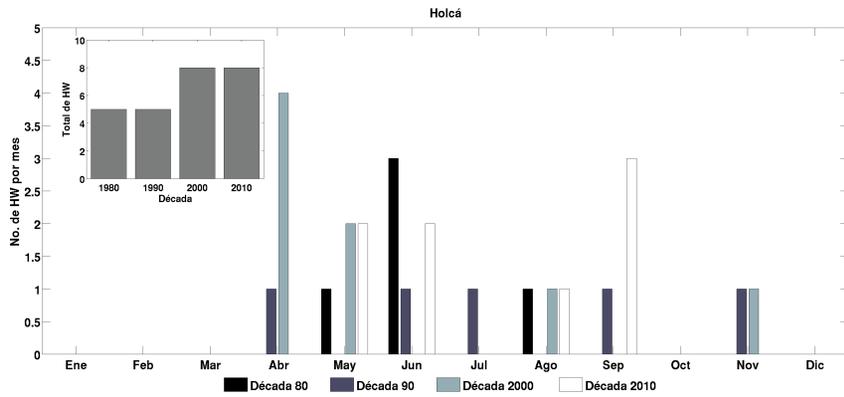


### d) Grupo 4

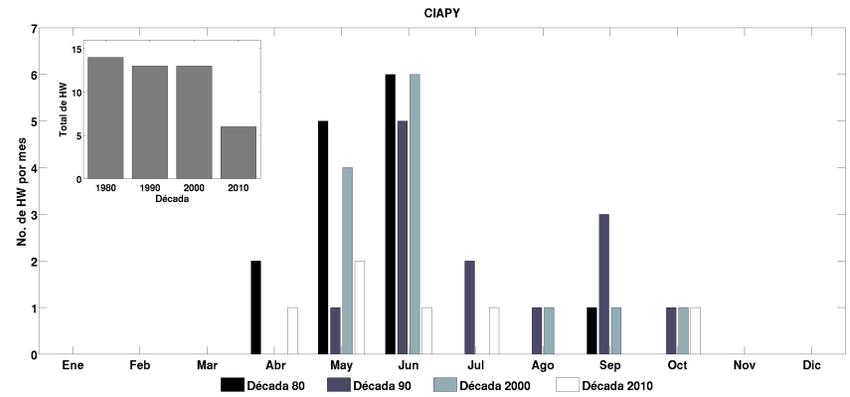


**Figura 4.10.** Número de eventos de las HW para la tmax por década para la estación de a) Holcá (región central), b) CIPAY (región oeste), C) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). En barras de color se muestra la frecuencia de eventos por mes para el periodo de 1980-2014.

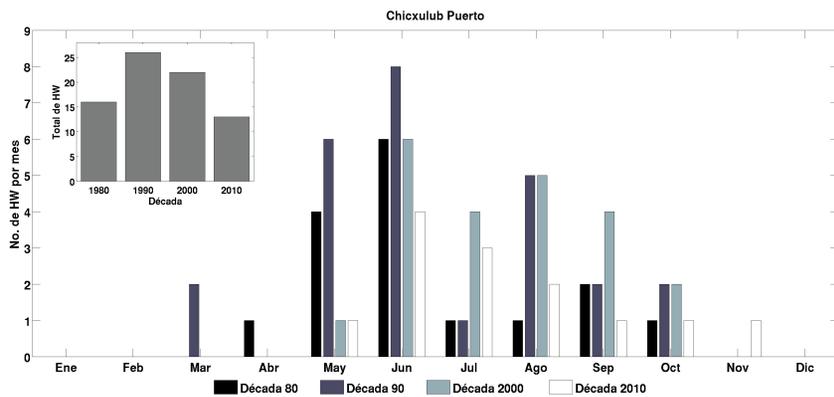
a) Grupo 1



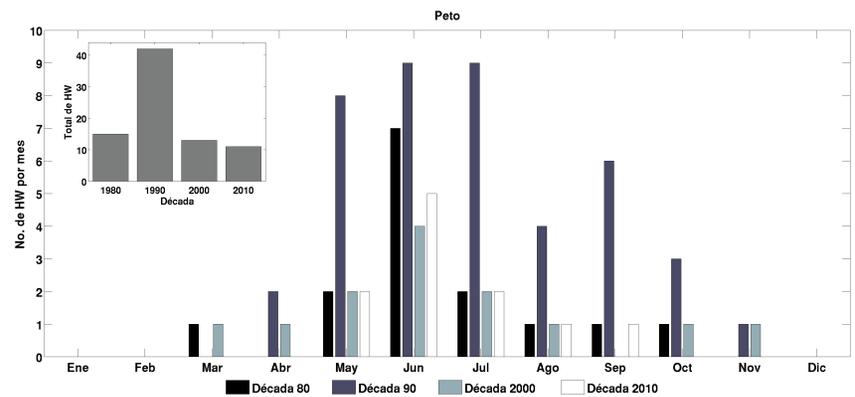
b) Grupo 2



c) Grupo 3



d) Grupo 4



**Figura 4.11.** Número de eventos de las HW para la tmin por década para la estación de a) Holcá (región central), b) CIPAY (región oeste), C) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este). En barras de color se muestra la frecuencia de eventos por mes para el periodo de 1980-2014.

## 4.5. Persistencia

En este apartado se describe la persistencia de los eventos extremos cálidos para cada uno de las regiones de estudio.

En la región central (Fig. 4.12a) se observó a los eventos de menor duración (cuatro días) como los más frecuentes, con más del 30% del total de HW registradas en las primeras tres décadas (1980-2009). Para el periodo 2010-2014 la persistencia de las HW cambió, siendo más frecuentes los eventos con una duración igual a cinco días. Cabe señalar que conforme aumenta la duración de estos eventos su frecuencia de ocurrencia es menor.

Para la región oeste se presenta un patrón similar al observado en la región central. En las primeras tres décadas de estudio (Fig. 4.12b) los eventos con cuatro días de duración tienen mayor ocurrencia (>31% del total de eventos), mientras que para el último periodo analizado estos eventos están por debajo del 11%. Para este último periodo (2010-2014) las HW más frecuentes registraron nueve días de duración (~27%), seguidas de los eventos de seis días (~18%).

A diferencia de las regiones anteriores, en la región (Fig. 4.12c) oeste los eventos extremos con periodo igual a cuatro días fueron lo más frecuente en los cuatro periodos de estudio. Inclusive se observó que para el periodo 2010-2014 éstas aumentaron aproximadamente un 10%.

Por otra parte, para la región este (Fig. 4.12d) se presenta un patrón distinto al observado en las tres regiones anteriores. Las HW con cuatro días de duración son más frecuentes en la década de 1980 y el periodo 2010-2014 (>30% del total registradas), mientras que en las décadas intermedias (1990 y 200) las HW con cinco días presentan la mayor ocurrencia (>33%).

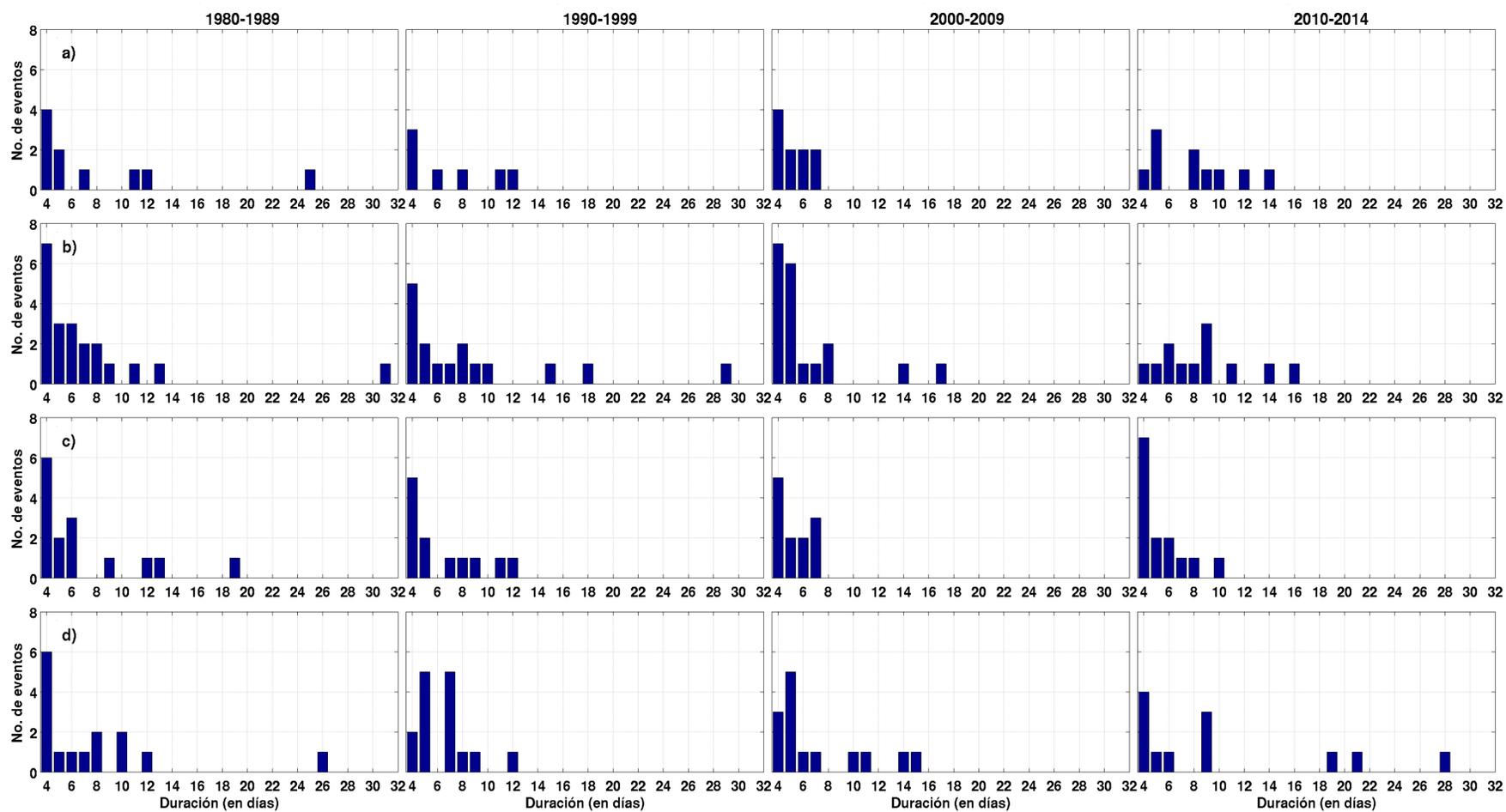
En cuanto a la  $t_{min}$ , en la figura 4.13a (región central) se observa como eventos más frecuentes a las HW de cuatro y cinco días de duración. Para las décadas de 1980 y 1990 estos eventos registraron la misma cantidad (~40% del total de HW registradas). En la década de 2000 las HW más frecuentes son aquellas con un periodo igual a cuatro días (>50%), mientras que para el periodo 2010-2014 lo son las de cinco días (>50%).

En contraste con lo observado en la región central, para la región oeste (Fig. 4.13b) los eventos más frecuentes son las HW con cuatro días de duración, para las décadas de 1990, 2000 y el periodo 2010-

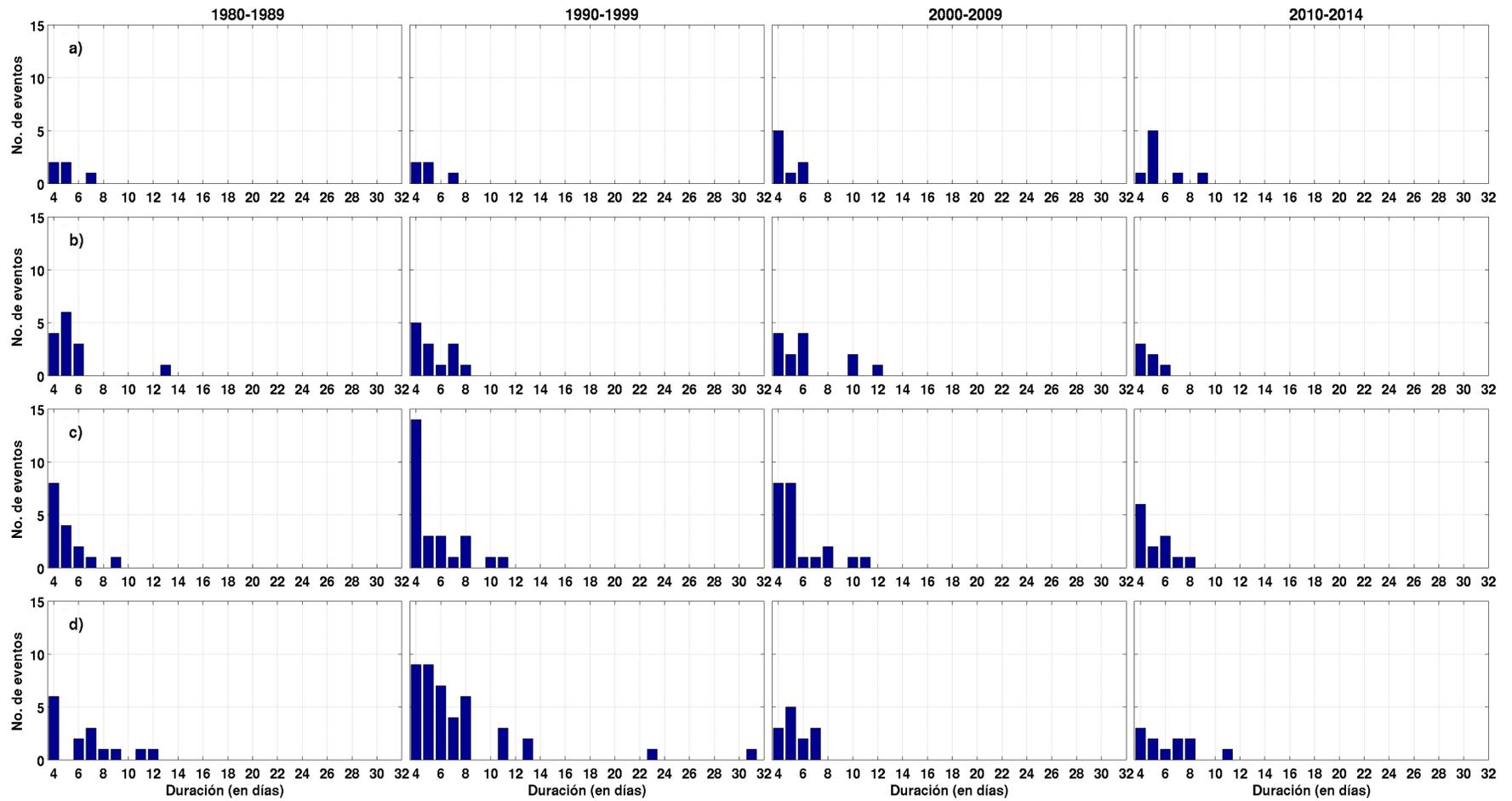
2014 con más del 30% del total de eventos registrados. En la década de 1980 las HW de cinco días presentaron la mayor ocurrencia.

Para la región costera (Fig. 4.13c) se observó a los eventos de HW con duración de cuatro días como los más frecuentes para los cuatro periodos de estudio. Similar a lo observado en la  $t_{max}$  para el mismo grupo.

En cuanto a la región este (Fig. 4.13d), las décadas intermedias (1990 y 2000) presentaron como eventos más frecuentes a las HW con cinco días, en cambio, para la década de 1980 y el periodo 2010-2014 las HW con mayor frecuencia son las de cuatro días. Lo anterior es consistente a lo observado en la  $t_{max}$  para la misma región.



**Figura 4.12.** Persistencia de los eventos de HW de la tmax por década para las estaciones de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este).



**Figura 4.13.** Persistencia de los eventos de HW de latmin por década para las estaciones de a) Holcá (región central), b) CIAPY (región oeste), c) Chicxulub Puerto (región costera) y d) Peto (región este).

## 5. CONCLUSIONES

Este trabajo describe y analiza los patrones asociados a los eventos de HW (duración, intensidad y frecuencia) sobre el estado de Yucatán en el periodo de 1980-2014. Para ello, se analizaron datos de temperatura máxima y mínima diaria medidos por las estaciones climatológicas de la CONAGUA pertenecientes a la base de datos CLICOM. Se llevaron a cabo un control de calidad y una prueba de homogeneidad con la cuales se garantizó que las mediciones colectadas (datos) correspondieran únicamente a factores climáticos, generando una adecuada base de datos (17 estaciones) para el estudio del clima en Yucatán. Con base en los registros temporales de temperatura máxima se llevó a cabo un análisis de grupos (conglomerados). Los resultados de este análisis mostraron que para el estudio de la climatología en Yucatán las estaciones podían ser separadas en cuatro regiones: centro, oeste, costero y este.

Se realizó la climatología de la temperatura máxima y mínima para las cuatro regiones partidas en cuatro periodos: 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 y 2010-2014. Los resultados muestran que el comportamiento decadal de la temperatura se encuentra modulado por los valores extremos anuales y decadales (p95), tanto para la tmax como para la tmin. Lo anterior se observa al evaluar la variabilidad de los valores extremos en las cuatro periodos analizados para cada uno de grupos estudiados.

Para el estado de Yucatán, una HW se puede definir como una secuencia de al menos cuatro días (tmax) o noches (tmin) consecutivos que presentan una temperatura superior o igual al valor decadal del p95. Con esta definición, se observó que para el periodo de 1980-2014 estos eventos de corta duración (4 días) son los más frecuentes para el estado, con más del 20% del total de los eventos registrados en las 17 estaciones analizadas, tanto para la tmax como para la tmin.

En cuanto a la intensidad de los eventos extremos, utilizando el índice de intensidad (IIOC) se determinó que para Yucatán las HW no presentaron un aumento a lo largo del tiempo, sin embargo, se encontró que durante los 35 años estudiados más del 40% de estos eventos registraron una intensidad media (tanto en la tmax como en la tmin) en relación con los eventos de alta intensidad, los cuales representan aproximadamente el 25% del total de eventos.

Con respecto a la frecuencia mensual de las HW, se identificó que para la tmax estos eventos son más propensos a ocurrir durante los meses de marzo a agosto. Periodo en el cual se identificó al mes de

mayo como el de mayor frecuencia en las 17 estaciones de estudio (>28% del total registrados). Para la  $t_{min}$  por el contrario, se observó que el periodo de ocurrencia de las HW es de abril a noviembre, en el cual junio es el mes con mayor frecuencia de estas para 15 (88%) de las estaciones analizadas.

La persistencia de estos eventos extremos tanto en la  $t_{max}$  como en la  $t_{min}$ , no mostró un incremento en el periodo de 1980-2014. Para Yucatán las HW con una persistencia de cuatro y cinco días son las más frecuentes, lo que supera el 20% del total de eventos por década.

## 6. TRABAJO FUTURO

De los resultados obtenidos en este estudio, se pueden generar una serie de trabajos futuros que puedan ayudar a complementar la información aquí presentada. Las investigaciones subsecuentes permitirán tener una mejor comprensión en cuanto al desarrollo y posibles afectaciones que estos eventos extremos puedan ocasionar sobre Yucatán. Entre las líneas de investigación a desarrollar se recomiendan:

- Analizar las condiciones de circulación atmosférica dominantes de la región asociadas a la persistencia de giros anticiclónicos, los cuales podrían favorecer el transporte de masas de aire más cálidas capaces de modular la intensidad y/o extender la persistencia de las HW.
- Investigar la mortalidad y morbilidad asociada a las temperaturas extremas en el estado, evaluando la incidencia de pacientes en los hospitales por el efecto de ésta. Evaluando principalmente los síntomas de cada paciente, al igual que los grupos de edad más afectados.
- Generar reportes sobre umbrales de temperatura máxima permisible accesibles al público.

# REFERENCIAS

1. Akhtar, R. et al., (2001). Human Health. Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 451-485.. Disponible en: [http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/pdf/WGII\\_TAR\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/pdf/WGII_TAR_full_report.pdf)
2. Alexander, L. V. et al., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(5), pp.1-22.
3. Barriopedro, D. et al., 2011. The Hot Summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, Vol. 332(6026), pp.220-224.
4. Bates, J. et al., 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, p. 881.
5. Bautista, F. et al., 2010. El Relieve. En Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, México: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, pp. 7-9.
6. Beniston, M. & Stephenson, D. B., 2004. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), pp.1-9.
7. Cardós, C., Barrera, E. & Sanz, R., 2007. Un estudio sobre episodios de temperatura extremas en Canarias. *Calendario Meteorológico*, pp. 239-248.
8. Correa, J., Iral, R. & Rojas, L., 2006. Estudio de potencias de prueba de homogeneidad de varianza. *Revista Colombiana de Estadística*, 29(1), pp.57-76.
9. Coumou, D. & Rahmstorf, S., 2012. A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), pp.491-496. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nclimate1452>

10. Coumou, D. & Robinson, A., 2013. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes. *Environmental Research Letters*, 8(3), p.34018. Disponible en: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/034018/pdf>
11. Croitoru, A. E. et al., 2016. Changes in heat waves indices in Romania over the period 1961-2015. *Global and Planetary Change*, pp.109-121.
12. Cueto, R.G.O., Martínez, A. T. & Ostos, E. J., 2010. Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: Current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*, 54(4), pp.335-345.
13. Díaz, J. et al., 2002. Heat waves in Madrid 1986-1997: Effects on the health of the elderly. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 75(3), pp.163-170.
14. Díaz Lázaro, M., 2011. Ondas de calor en seis zonas urbanas del estado de Veracruz. Universidad Veracruzana.
15. Donat, M. G. et al., 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(5), pp.2098-2118.
16. Englehart, P. J. & Douglas, A. V., 2005. Changing behavior in the diurnal range of surface air temperature over Mexico. *Geophysical Research Letters*, 32(1), pp.1-4.
17. Flores, J. S., Durán, G. R. & Ortiz, D. J., 2010. Comunidades vegetales terrestres. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*, pp.125-129.
18. Garssen, J., Harmsen, C. & Beer, J. De., 2005. Effect of the summer 2003 heat wave on mortality in the Netherlands, pp.165-167.
19. Gibbson, J. D., 1985. Nonparametric statistical inference, New York: Marcel Dekker.
20. Guijarro Pastor, J. A., 2004. Climatol: Software libre para la depuración y homogenización de datos climatológicos. *Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria*, pp.494-502.

21. Hobbs, S. E., 1992. Climate change 1996. Climate Change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, p.1189.
22. Hollander, J. F. & Wolfe, D. A., 1999. Nonparametric statistical methods. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
23. INAFED, 2010. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. *Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal*, Disponible en:  
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM31yucatan/index.html>.
24. INEGI, 2015a. Conociendo Yucatán. *Conociendo México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
25. INEGI, 2015b. Encuesta interestatal (2015). *Panorama sociodemográfico de México 2015/ Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, p. 96.
26. INEGI 2002. Estudio hidrológico del estado de Yucatán, Disponible en:  
[http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.pdf)
27. INEGI 2011. Perspectiva estadística Yucatán. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*.
28. Houghton, J. T. et al., 1996. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, p. 572.
29. IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
30. IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L.

Miller (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

31. IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
32. Jáuregui, E., 2009. The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 70, pp. 71-76.
33. Jiménez, J. D., Linares, C. & Herrera, R. G. 2005. Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras acciones. *Revista Española de salud pública*, 79(2), pp. 145-157.
34. Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R. & Patiño-Gómez, C., 2016. Temperature and heat waves trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, pp. 20-26.
35. Nairn, J. R. & Fawcett, R. J. B., 2014. The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), pp. 227-253.
36. OMM, 2011. Guía de prácticas climatológicas Edición de 2011 OMM N° 100, Disponible en: [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf)
37. Orellana, R., 1999. Evaluación climática. Atlas de procesos territoriales de Yucatán, pp. 163-183.
38. Orellana, R., Espadas, C. & Nava, F., 2010. Climas. Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán (CICY, CONABIO, SEDUMA), pp. 10-11.
39. Oueslati, N. et al., 2017. Characterization of Heat Waves in the Sahel and Associated Physical Mechanisms. *Journal of Climate*, 30(9), pp. 3095-3115.
40. Pavia, E. G., Graef, F. & Reyes, J., 2009. Annual and seasonal surface temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29(9), pp. 1324-1329.

41. Peralta-Hernandez, A. R., Balling, R. C. & Barba-Martinez, L. R., 2009. Analysis of near-surface diurnal temperature variations and trends in southern Mexico. *International Journal of Climatology*, 29(2), pp. 205-209.
42. PUND, 2007. Informe sobre Desarrollo Humano 2007-2008. La lucha contra el cambio climático: solidaridad frente a un mundo dividido, Disponible en: [http://hdr.undp.org/en/media/HDR\\_20072008\\_SP\\_Complete.pdf](http://hdr.undp.org/en/media/HDR_20072008_SP_Complete.pdf).
43. Radinović, D. & Ćurić, M., 2012. Criteria for heat and cold wave duration indexes. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4), pp. 505-510.
44. Ramathan, V., Barkstrom B. R. & Harrison, E. F., 1989. Climate and the Earth's Radiation Budget. *Physics Today*, 42. pp. 22-32.
45. Rey, G. et al., 2007. The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(7), pp. 171-178.
46. Reyes, S., 2002. Introducción a la Meteorología. México: UABC, p. 468.
47. Robine, J. M., et al., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus – Biologies*, 331(2), pp. 171-178.
48. Robinson, P. J., 2001. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), pp. 762-775.
49. Rusticucci, M. et al., 2015. Long-term variability of heat waves in Argentina and recurrence probability of the severe 2008 heat wave in Buenos Aires. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4), pp. 679-689.
50. Saez, M. et al., 1995. Relationship between weather temperature and mortality: A time series analysis approach in Barcelona. *International Journal of Epidemiology*, 24(3), pp. 576-582.
51. Serber, G. A. F., 1984. Multivariate Observations. In Hoboken, NJ: Halsted Press.

52. Spath, H., 1985. Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples. T. by J. Goldschmidt, ed., New York: Halsted Press.
53. Tomczyk, A. M. & Bednorz, E., 2014. Heat and cold waves on the southern coast of the Baltic Sea. *Baltica*, 27(1), pp. 45-54.
54. Tomczyk, A. M. & Bednorz, E., 2016. Heat waves in central Europe and their circulation conditions. *International Journal of Climatology*, 36(2), pp. 770-782.
55. Tomczyk, A. M., Bednorz, E. & Brandt, A., 2014. Warm waves in north-western Spitsbergen. *Polish Polar Research*, 35(2), pp. 203-224.
56. Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
57. Twardosz, R. & Kossowska-Cezak, U., 2013. Exceptionally hot summers in Central and Eastern Europe (1951-2010). *Theoretical and Applied Climatology*, 112(3-4), pp. 617-628.4
58. Unkašević, M. & Tošić, I., 2009. An analysis of heat waves in Serbia. *Global an Planetary Change*, 65(1-2), pp. 17-26.
59. Vazquez-Aguirre, J. L., 2010. Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología, México.
60. Vidal, R., 2005. Las regiones climáticas de México. México: Instituto de Geografía, UNAM.
61. Wang, X. L. & Feng, Y., 2013. RHtestsV4 User Manual. *Climate Research Division Atmospheric Science and Technology*, Canada, (1-29).
62. Watts, N. et al., 2015. Health and climate change: Policy responses to protect public health. *The Lancet*, 386(10006), pp. 1861-1914.

63. Whitman, S., Good, G. & Donoghue, E. R., 1997. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. *Public Health Briefs*, 87(9), pp. 1995-1998.
64. WMO, 2011. Weather extremes in a changing climate: Hindsight on Foresight. *World Meteorological Organisation*, (1075).
65. Zuo, J. et al., 2015. Impacts of heat waves and corresponding measures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 92, pp. 1-12.

## **Portales de interés revisados**

1. CONABIO, 2017. Portal de información geográfica – CONABIO. Disponible en:  
<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
2. CONAGUA, 2011. Estadística del agua en México. *SEMARNAT/CONAGUA*, p.182. Disponible en:  
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>

# ANEXOS

## I. Generación de grupos

**Tabla I.1.** Ubicación de las estaciones climatológicas por localidades, y número total de población. Tomado de INAFED (2010).

Clave	Municipio	Estación	Ubicación	
			Importancia	Población
31001	Abalá	Abalá	Cabecera Municipal	1890
31068	Tizimín	Chan Cenote	Localidad	2225
31071	Kantunil	Holcá	Localidad	1988
31016	Kinchil	Kinchil	Cabecera Municipal	6307
31029	Hunucmá	Sisal	Localidad	1837
31005	Muna	CIAPY	-----	-----
31056	Mocochá	Mocochá	Cabecera Municipal	2042
31020	Motul	Motul	Cabecera Municipal	23240
31062	Oxkutzcab	Tabí	-----	-----
31072	Teabo	Teabo	Cabecera Municipal	6115
31031	Telchach Pto.	Telchach Pto.	Localidad	1722
31073	Tzucacab	Tzucacab	Cabecera Municipal	9967
31007	Progreso	Chicxulub Pto.	Cabecera Municipal	6010
31024	Río Lagartos	Río Lagartos	Cabecera Municipal	2218
31069	Chemax	Chemax	Cabecera Municipal	14885
31017	Panabá	Loché	Cabecera Municipal	1237
31022	Peto	Peto	Cabecera Municipal	19821

## II. Variación del percentil 95

**Tabla II.1.** Resultados de la prueba de Wilcoxon para las series de temperatura máxima diaria separadas por periodo de estudio (1980-1990, 1990-2000, y 2000-2010). Los cuadros oscuros indican el rechazo de la hipótesis nula (es decir, los valores pertenecen a muestras con diferente distribución) a un nivel de significancia del 5%.

<b>Estación</b>	<b>1980-1990</b>	<b>1990-2000</b>	<b>2000-2010</b>
Abalá			
Chan Cenote			
Holcá			
Kinchil			
Sisal			
CIAPY			
Mocochá			
Motul			
Tabí			
Teabo			
Telchac Puerto			
Tzucacab			
Chicxulub Puerto			
Río Lagartos			
Chemax			
Loché			
Pëto			

**Tabla II.2.** Resultados de la prueba de Wilcoxon para las series de temperatura mínima diaria separadas por periodo de estudio (1980-1990, 1990-2000, y 2000-2010). Los cuadros oscuros indican el rechazo de la hipótesis nula (es decir, los valores pertenecen a muestras con diferente distribución) a un nivel de significancia del 5%.

<b>Estación</b>	<b>1980-1990</b>	<b>1990-2000</b>	<b>2000-2010</b>
Abalá			
Chan Cenote			
Holcá			
Kinchil			
Sisal			
CIAPY			
Mocochá			
Motul			
Tabí			
Teabo			
Telchac Puerto			
Tzucacab			
Chicxulub Puerto			
Río Lagartos			
Chemax			
Loché			
Pëto			

**Tabla II.3.** Variación por década del p95 para el periodo de 1980-2014.

<b>Estación</b>		<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
Abalá	Tmax	39.5	38.5	38.0	36.0
	Tmin	23.5	21.5	20.5	20.5
Chan Cenote	Tmax	37.0	39.0	37.0	36.0
	Tmin	23.0	24.0	23.0	23.0
Holcá	Tmax	38.0	39.5	36.9	34.0
	Tmin	23.0	23.0	21.5	21.0
Kinchil	Tmax	39.0	37.8	37.0	35.0
	Tmin	23.5	23.0	21.5	20.0
Sisal	Tmax	38.0	38.0	38.0	37.0
	Tmin	24.0	25.0	25.0	26.0
CIAPY	Tmax	38.0	38.5	39.5	40.0
	Tmin	23.0	23.0	23.0	23.0
Mocochá	Tmax	38.0	37.0	38.0	39.0
	Tmin	23.0	21.0	23.0	24.0
Motul	Tmax	38.0	38.0	40.0	39.0
	Tmin	23.0	23.0	23.0	23.0
Tabí	Tmax	36.0	38.0	38.0	37.0
	Tmin	22.5	25.0	22.0	22.0
Teabo	Tmax	38.0	38.0	39.0	38.0
	Tmin	23.0	25.0	24.0	24.0
Telchac Puerto	Tmax	38.0	38.5	38.0	38.0
	Tmin	24.0	27.0	24.0	25.0
Tzucacab	Tmax	38.5	38.5	39.0	39.0
	Tmin	23.0	22.0	22.5	22.0
Chicxulub Puerto	Tmax	37.5	35.0	37.0	37.0
	Tmin	25.0	24.0	25.0	25.0
Río Lagartos	Tmax	37.0	36.5	37.0	36.0
	Tmin	24.5	25.0	24.0	24.0
Chemax	Tmax	38.0	38.0	38.0	38.0
	Tmin	23.0	23.5	24.0	25.0
Loché	Tmax	37.5	38.5	37.5	37.5
	Tmin	22.6	22.5	23.5	23.5
Peto	Tmax	38.0	39.0	41.0	40.0
	Tmin	23.0	23.0	24.0	24.0

**Tabla II.4.** Años en los que el p95 anual iguala/supera el valor extremal decadal (p95 decadal) para la tmax y la tmin, durante el periodo de 1980-2014.

<b>Estación</b>		<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>	<b>Total</b>
Abalá	Tmax	6	3	5	2	16
	Tmin	5	4	5	2	16
Chan Cenote	Tmax	9	4	4	3	20
	Tmin	8	5	10	4	27
Holcá	Tmax	4	4	2	2	12
	Tmin	3	4	5	5	17
Kinchil	Tmax	7	3	3	4	17
	Tmin	6	7	4	5	22
Sisal	Tmax	4	5	3	2	14
	Tmin	4	5	5	2	16
CIAPY	Tmax	5	2	6	2	15
	Tmin	5	5	8	4	22
Mocochá	Tmax	5	6	8	4	23
	Tmin	4	9	6	3	22
Motul	Tmax	8	4	4	3	19
	Tmin	9	7	5	4	25
Tabí	Tmax	7	5	6	3	21
	Tmin	4	2	9	4	19
Teabo	Tmax	7	3	6	2	18
	Tmin	5	6	8	2	21
Telchac Puerto	Tmax	3	5	6	2	16
	Tmin	5	3	10	3	21
Tzucacab	Tmax	4	1	6	1	12
	Tmin	3	5	7	4	19
Chicxulub Puerto	Tmax	5	5	5	4	19
	Tmin	4	5	7	4	20
Río Lagartos	Tmax	2	4	5	5	16
	Tmin	6	3	5	3	17
Chemax	Tmax	6	4	3	3	16
	Tmin	4	5	4	4	17
Loché	Tmax	4	3	7	5	19
	Tmin	5	7	9	3	24
Peto	Tmax	5	4	4	3	16
	Tmin	5	9	8	4	26

### III. Ondas de calor

**Tabla III.1.** Frecuencia mensual acumulada de las HW en Yucatán, para el periodo de 1980-2014.

Estaciones		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Abalá	Tmax	0	0	5	14	28	5	0	0	0	0	0	0	52
	Tmin	0	0	0	5	14	14	2	2	2	1	0	0	40
Chan Cenote	Tmax	0	0	1	10	23	8	6	6	1	0	0	0	55
	Tmin	0	0	1	1	20	32	15	13	12	3	1	0	98
Holcá	Tmax	0	0	3	14	12	3	1	2	1	0	1	0	37
	Tmin	0	0	0	5	5	6	1	3	4	0	2	0	26
Kinchil	Tmax	0	0	0	11	22	6	7	8	4	2	0	0	60
	Tmin	0	0	0	3	17	21	2	4	10	2	0	0	59
Sisal	Tmax	0	0	2	14	19	7	4	3	3	0	0	0	52
	Tmin	0	0	0	5	9	8	7	7	10	4	0	0	50
CIAPY	Tmax	0	1	6	23	29	7	1	1	0	0	0	0	68
	Tmin	0	0	0	3	12	18	3	2	5	3	0	0	46
Mocochá	Tmax	0	0	7	21	31	9	0	0	0	0	0	0	68
	Tmin	0	0	1	7	18	26	9	15	12	6	1	0	95
Motul	Tmax	0	0	8	27	28	12	4	1	1	0	1	0	82
	Tmin	0	0	0	5	15	27	8	3	10	3	1	0	72
Tabí	Tmax	0	0	5	15	29	6	2	2	0	0	1	0	60
	Tmin	0	0	0	2	11	12	2	1	4	2	0	0	34
Teabo	Tmax	0	0	3	11	21	5	2	2	0	0	0	0	44
	Tmin	0	0	1	2	4	7	1	2	3	1	0	0	21
Telchac Puerto	Tmax	0	0	1	8	24	11	2	1	1	0	0	0	44
	Tmin	0	0	0	2	7	4	4	6	5	6	1	0	21
Tzucacab	Tmax	0	0	3	9	15	5	1	0	0	2	0	0	35
	Tmin	2	0	3	4	8	20	6	4	9	4	1	1	62
Chicxulub Puerto	Tmax	0	1	3	14	23	8	2	2	0	0	0	0	53
	Tmin	0	0	2	1	12	24	9	13	9	6	1	0	77
Río Lagartos	Tmax	0	1	6	9	16	6	1	1	2	0	0	0	42
	Tmin	0	0	1	0	6	9	9	6	5	7	1	0	44
Chemax	Tmax	1	0	3	3	19	9	5	7	3	0	1	0	51
	Tmin	0	0	1	0	9	16	12	9	10	10	1	0	68
Loché	Tmax	2	0	3	9	20	6	4	1	1	2	1	1	50
	Tmin	0	0	1	1	5	12	19	12	6	1	1	0	58
Peto	Tmax	0	0	2	18	24	8	0	2	2	0	0	0	56
	Tmin	0	0	2	3	14	25	15	7	8	5	2	0	81

**Tabla III.2.** Intensidad de los vientos de HW identificados durante el periodo 1980-2014 en Yucatán

<b>Estaciones</b>		<b>Baja</b>	<b>Media</b>	<b>Alta</b>
Abalá	Tmax	12	27	13
	Tmin	10	20	10
Chan Cenote	Tmax	14	27	14
	Tmin	23	51	24
Holcá	Tmax	9	19	9
	Tmin	6	14	6
Kinchil	Tmax	15	30	15
	Tmin	14	30	15
Sisal	Tmax	12	27	13
	Tmin	12	26	12
CIAPY	Tmax	17	34	17
	Tmin	11	24	11
Mocochá	Tmax	17	34	17
	Tmin	20	52	23
Motul	Tmax	20	42	20
	Tmin	18	36	18
Tabí	Tmax	15	30	15
	Tmin	8	18	8
Teabo	Tmax	11	22	11
	Tmin	4	12	5
Telchac Puerto	Tmax	12	24	12
	Tmin	9	17	9
Tzucacab	Tmax	8	18	9
	Tmin	14	33	15
Chicxulub Puerto	Tmax	12	28	13
	Tmin	17	41	19
Río Lagartos	Tmax	9	24	9
	Tmin	10	24	10
Chemax	Tmax	13	25	13
	Tmin	17	34	17
Loché	Tmax	12	26	12
	Tmin	14	30	14
Peto	Tmax	13	29	14
	Tmin	19	42	20

**Tabla III.3.** Número total de HW por década durante los años 1980-2014.

<b>Estaciones</b>		<b>1980</b>	<b>1990</b>	<b>2000</b>	<b>2010</b>
Abalá	Tmax	17	11	18	6
	Tmin	9	20	7	4
Chan Cenote	Tmax	23	8	11	13
	Tmin	17	24	48	9
Holcá	Tmax	10	7	10	10
	Tmin	5	5	8	8
Kinchil	Tmax	16	13	15	16
	Tmin	15	14	10	20
Sisal	Tmax	17	14	14	7
	Tmin	11	10	25	4
CIAPY	Tmax	21	16	19	13
	Tmin	14	13	13	6
Mocochá	Tmax	14	21	16	17
	Tmin	23	30	33	9
Motul	Tmax	20	19	26	17
	Tmin	29	30	2	11
Tabí	Tmax	15	20	18	7
	Tmin	11	0	17	6
Teabo	Tmax	5	17	16	6
	Tmin	2	1	4	14
Telchac Puerto	Tmax	9	12	16	11
	Tmin	4	9	17	5
Tzucacab	Tmax	12	9	12	2
	Tmin	10	8	27	17
Chicxulub Puerto	Tmax	15	12	12	14
	Tmin	16	26	22	13
Río Lagartos	Tmax	13	6	13	10
	Tmin	5	12	22	5
Chemax	Tmax	14	9	20	8
	Tmin	9	18	31	10
Loché	Tmax	10	13	14	13
	Tmin	6	10	29	13
Peto	Tmax	15	15	14	12
	Tmin	15	42	13	11