

Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala

Meteorological behavior during the mid-summer drought in Guatemala

Wener A. Ochoa-Orozco¹ , Paris F. Rivera-Ramos² , Eduardo Herrera³ 

¹Facultad de Ingeniería, Postgrado de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

²Instituto de Investigaciones de Ingeniería, Matemática y Ciencias Físicas de la Universidad Mariano Gálvez de Guatemala, Guatemala

³Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico

*Autor al que se dirige la correspondencia: wenerochoa@gmail.com

Recibido: 14 de octubre 2021 / Revisión: 9 de septiembre 2022 / Aceptado: 13 de octubre 2022

Resumen

El objetivo de esta investigación consistió en explorar el comportamiento histórico de la temperatura, precipitación y la radiación saliente de onda larga (OLR) para Guatemala, durante el período de sequía de medio verano (canícula). El procedimiento metodológico partió del uso de la base de datos de 38 estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, de Guatemala (Insivumeh), del periodo de 1971-2019. Se realizaron promedios para cada región del país; Norte, Caribe, Franja Transversal, Pacífico, Boca Costa, Oriente y Altiplano. Mediante series de tiempo con resolución temporal diaria, se evaluaron señales de cambio y se hicieron gráficas de OLR con la base de datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) de 2.5° x 2.5° de resolución. Los resultados muestran que la temperatura ha aumentado en dicho periodo, encontrando que en algunas regiones climáticas el aumento ha sido de 1 °C y en otras de 2 °C. Asimismo, se encontró que los días sin lluvia tienen una tendencia hacia el aumento, al igual que la radiación saliente de onda larga. La canícula, es un fenómeno meteorológico que está siendo afectado por el cambio climático, y en la medida que se siga experimentando un calentamiento diferencial entre los océanos Pacífico y Atlántico, influirá en el cambio de clima para Guatemala. En conclusión, durante la canícula se manifestaron señales de tendencia hacia el aumento de la temperatura, aumento de días sin lluvia y aumento de OLR.

Palabras clave: Cambio climático, canícula, temperatura, precipitación

Abstract

The objective of this research was to explore the historical behavior of temperature, precipitation and outgoing long-wave radiation (OLR) for Guatemala, during the midsummer drought period (canícula). The methodological procedure was based on the use of the database of 38 stations of the National Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology and Hydrology, of Guatemala (Insivumeh), from the period 1971-2019. Averages were made for each region of the country; North, Caribbean, Transversal Strip, Pacific, Boca Costa, East and Altiplano. Using time series with daily temporal resolution, signals of change were evaluated and OLR plots were made using the National Center for Environmental Prediction (NCEP) database at 2.5° x 2.5° resolution. The results show that the temperature has reached in this period, finding that in some climatic regions the increase has been 1 °C and in others 2 °C. Likewise, it was found that the days without rain have a tendency to increase, as well as the outstanding long-wave radiation. The heat wave is a meteorological phenomenon that is being affected by climate change, and to the extent that differential heating between the Pacific and Atlantic oceans continues to be experienced, it will influence the climate change for Guatemala. In conclusion, during the heat wave there are signs of a trend towards an increase in temperature, an increase in days without rain and an increase in OLR.

Keywords: Climate change, heatwave, temperature, precipitation



Introducción

Comportamiento de variables meteorológicas durante la sequía de medio verano en Guatemala

La sequía de medio verano (Mid-Summer Drought [MSD], por sus siglas en inglés) o canícula, es un fenómeno meteorológico que se caracteriza por una disminución de la precipitación durante varios días, o semanas, durante la estación lluviosa en la región de Centroamérica (García Oliva, 2018; Magaña et al., 1999). Small y colaboradores (2007) y García Oliva (2018), coinciden en que la canícula, denominada también sequía de medio verano, está tipificada como una disminución en la precipitación pluvial durante la mitad de la temporada de lluvias en el sur de México y América Central. Para el caso de Guatemala, este fenómeno meteorológico de canícula se evidencia principalmente en las costas del Pacífico, el Altiplano y la región Central, tanto con días sin lluvias como con un aumento de temperatura entre 0.5 a 1 °C.

El fenómeno climático de sequía de medio verano, tiene una duración aproximada de seis quincenas; iniciando en la primera quincena de junio y finalizando en la segunda quincena de septiembre. En este período se registra una disminución en las lluvias del 32.7%, lo que indica que la presencia de la canícula no es la sequía total sino, más bien, la disminución en de precipitación. Según Small y colaboradores (2007) el calentamiento de la superficie sobre la tierra también juega un papel importante. En este período la temperatura se incrementa significativamente en la Costa Sur de Guatemala y la distribución espacial de este incremento posiblemente se relaciona con la distribución de la actividad convectiva durante esta época (García Oliva, 2018).

Además, cuando el uso de la tierra cambia a urbano, la tendencia de la temperatura es al aumento generando islas de calor durante el día, lo cual altera a la vez los patrones de precipitación (Gallo et al., 1996; Ochoa, 2021; Pérez, 2018).

Rodríguez-Vera y colaboradores (2019) encontraron patrones dominantes de variabilidad interanual e identificaron modos acoplados, evidenciando que el fenómeno climático denominado “El Niño-Oscilación del Sur” (ENOS) influye en casi todos los modos. Asimismo, demostraron también que la precipitación sobre el mar Caribe, es sensible a los modos de variabilidad acoplada viento-temperatura superficial del mar de junio a octubre, periodo en el cual se registra la canícula

para Guatemala. Estos modos parecen estar fuertemente relacionados con la variabilidad interanual de la sequía de medio verano y la migración meridional de la zona de convergencia intertropical en el Pacífico oriental, la cual es un área ubicada en el Océano Pacífico (Durán-Quesada et al., 2010; Mestas-Núñez et al., 2007).

Herrera y colaboradores (2015), concluyen que la disminución de la precipitación durante el verano en la mayor parte de las Américas tropicales está ligada al comportamiento de la corriente en chorro de nivel bajo en el Caribe (Caribbean Low-Level Jet [CLLJ], por sus siglas en inglés), cuya intensidad está anti correlacionada a la precipitación, pues presenta en el verano un máximo de intensidad en julio y conectada también a la actividad de ondas del este. Para Zermeño-Díaz (2019), el patrón espacial de la precipitación asociado a la canícula es más robusto durante el verano, pero se puede ver también en escalas de tiempo diarias, intraestacionales e interanuales. Además, también hay patrones específicos para viento y presión sugiriendo un acoplamiento mecánico que puede llevar a que los patrones espaciales sean extrapolados para entender ciertas tendencias. Magaña y Caetano (2005), describen la evolución temporal de varios parámetros meteorológicos en los mares intra americanos durante el experimento climático de las albercas de agua caliente (ECAC) y revisaron cuales resultados están de acuerdo y cuales refutan la teoría expuesta por Magaña y colaboradores (1999).

Rivera (2021), demostró que coincidentemente durante el periodo de la canícula, en los meses de julio y agosto hay señales que incrementan a la precipitación por la oscilación Madden-Julian en las fases 2 y 8 en la región sur de Guatemala. Por el contrario, se ha encontrado que esta oscilación no favorece fuertemente a la convección y la precipitación durante el primer máximo de lluvia, pero parece suprimir la lluvia en la mayor parte de la región de canícula, excepto en el suroeste de México en la canícula de agosto (Perdigón-Morales et al., 2019).

En Guatemala existen grandes áreas con escasa cobertura de estaciones meteorológicas, o donde las series temporales de observaciones históricas tienen datos faltantes, lo que dificulta estudiar y analizar la variabilidad de la precipitación a diferentes escalas de espacio y tiempo. En este artículo se muestra como la temperatura, los días sin lluvia y la radiación saliente de onda larga, han aumentado en el periodo de la canícula para Guatemala, analizando datos de temperatura del 1971 al 2019, encontrando que en algunas regiones climáticas el aumento ha sido de 1 °C y en otras regiones de 2 °C.

Materiales y métodos

Área de estudio

Guatemala se ubica en América Central (ver Figura 1). Tiene frontera al norte con México, al este con Belice y al sur con Honduras y El Salvador, al oeste está limitada por el océano Pacífico (254 km) y al este por el golfo de Honduras (148 km). Las diferentes zonas ecológicas varían desde el nivel del mar hasta aproximadamente 4,000 m s.n.m., con precipitaciones pluviales que varían desde los 400 hasta aproximadamente 4,000 mm anuales, con un clima cálido tropical,

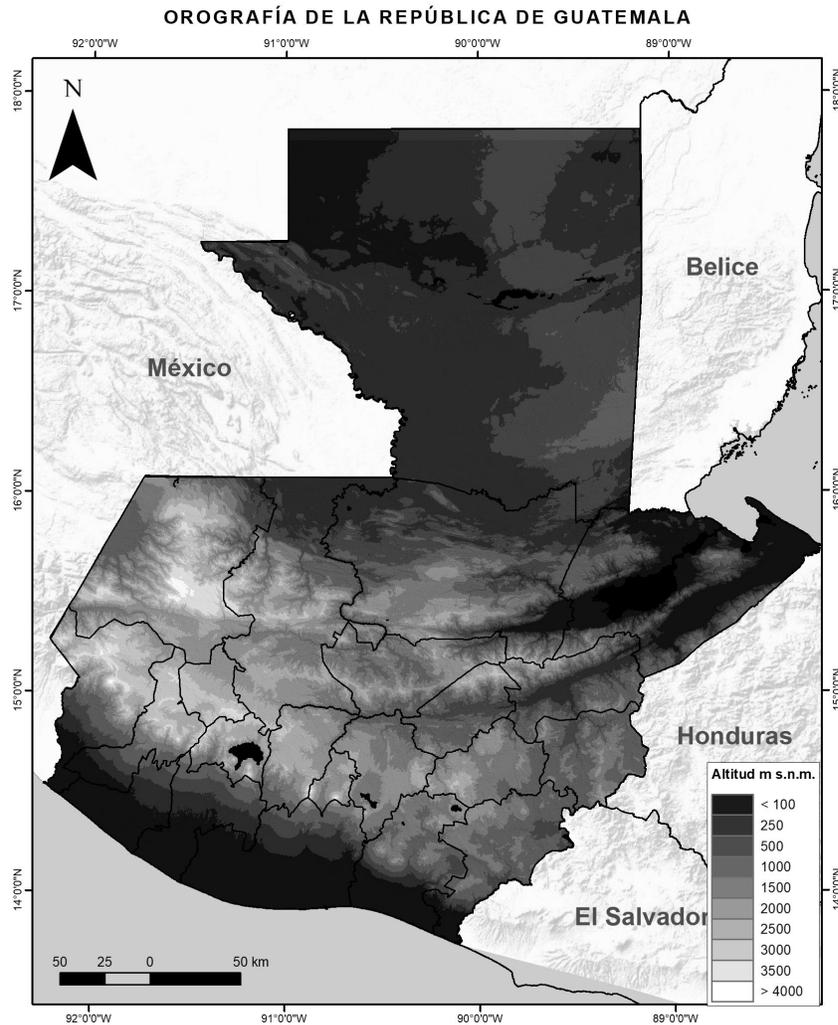
más templado en el altiplano. Es el país más poblado de Centroamérica con 14,901,286 habitantes según el censo del 2018 en un área de 108,889 km² (Instituto Nacional de Estadística [INE], 2019).

Datos utilizados

De la base de datos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala para el periodo de 1971-2019, se usaron los registros de temperatura y precipitación diaria de treinta y ocho estaciones de Guatemala. Todas las estaciones tienen un periodo de 1971 a 2019, se realizaron

Figura 1

Mapa de la República de Guatemala y de su orografía (altitud en m.s.n.m.)



promedios para cada región del país con las estaciones que corresponden a cada una de las siguientes regiones; Norte, Caribe, Franja Trasversal, Pacífico, Boca Costa, Oriente y Altiplano. Se usaron las series de tiempo de temperatura máxima y mínima con resolución temporal diaria para cada una de las estaciones, los datos faltantes de los registros diarios se estimaron con el promedio histórico correspondiente a cada estación y luego se realizaron los promedios por estaciones en cada región. Para evaluar las señales de cambio en el periodo de canícula, se usaron los meses de junio a octubre y para cada serie resultado de cada región se generó la de tendencia interanual con su respectivo coeficiente de correlación de Pearson (r^2) que permitió visualizar si la temperatura tiene una tendencia positiva o negativa.

Se utilizó el cálculo de índices del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) formado conjuntamente por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), del proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), quienes han impulsado a escala global dicho cálculo de índices de cambio climático a partir de datos diarios (Karl et al., 1999). Con estos índices del ETCCDI se obtuvieron las señales de cambio climático, específicamente en lo referente a los extremos meteorológicos desde el punto de vista climático.

Para temperatura se utilizaron los siguientes índices:

- (i) 125 FD Número de días con días de helada ($T_{min} < 0^\circ C$)
- (ii) 141 ETR días de rango de temperatura extrema intraanual ($Th-Tl$)
- (iii) TMINmean Media de las temperaturas mínimas
- (iv) TMAXmean Media de las temperaturas máximas

Se analizaron las tendencias de datos de temperatura máxima y mínima de todo el país a partir de la metodología propuesta por el ETCCDI, la cual incluye un control de calidad probando la homogeneidad de los datos, con lo cual se minimizan los errores en los índices creados (índices de cambio climático). Se realizó un modelo lineal para cada mes durante el periodo 1971 a 2019 para las temperaturas máximas, de Guatemala, utilizando el promedio de treinta y ocho estaciones del país, para luego extraer para cada mes

y cada temperatura la pendiente de la recta de tendencia. Se realizó el cálculo de los índices de temperatura máxima promedio y temperatura mínima promedio del periodo total y del promedio de todas las estaciones para representar todo el país. Se calcularon índices de cambio climático; temperatura mensual promedio, máxima y mínima, la temperatura promedio mensual se obtuvo a partir de las series de datos observados de temperatura y precipitación de acuerdo con la metodología del "RCLimDex (1.0) User Manual" (Zhang et al., 2005). La base de datos de estos cálculos corresponde a los registros del promedio de 38 estaciones meteorológicas nacionales a escala diaria, para el periodo 1971 a 2019. Para el cálculo de las pendientes de las rectas de tendencia de la temperatura máxima, se utilizó la ecuación de la recta resultante para cada periodo. A partir de esta ecuación se extrajeron las pendientes (tasas de cambio) para representarlas en barras para los distintos periodos analizados.

Para el cálculo de OLR se utilizó la base de datos de NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de $2.5 \times 2.5^\circ$ de resolución, con datos mensuales desde 1979 a 2020 (Liebmann & Smith, 1996). Para la precipitación se usó la base de datos mensual CHIRPS con resolución de $0.05 \times 0.05^\circ$, para el periodo de 1979-2020 (Funk et al., 2015).

Se utilizó un filtrado acondicionado para sumar los días consecutivos con precipitación igual a cero del promedio de 38 estaciones meteorológicas nacionales. Las cajas de bigotes (box plots, en inglés) de los días consecutivos sin lluvia durante julio y agosto del periodo de 1971 al 2019.

Se utilizaron datos mensuales del Índice estandarizado de precipitación ([SPI], por sus siglas en inglés; Guttman, 1999) para análisis de 3-meses (junio, julio y agosto) y de 6-meses (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre), con datos de la University of East Anglia (UEA) Climatic Research Unit (CRU) Global, con resolución de $0.5 \times 0.5^\circ$ también mensuales, para el periodo de 1979-2020. Los productos derivados de la OLR se hicieron con los datos respectivos al área $[93.75^\circ W-88.75^\circ W]$ y $[12.5^\circ N-17.5^\circ N]$, obteniendo tanto resultados espaciales, como una serie temporal correspondiente al promedio espacial.

Se obtuvo la climatología de precipitación acumulada mensual para las siguientes regiones, delimitándolas aproximadamente con las siguientes áreas rectangulares: [longitudes], [latitudes]; Petén: $[91^\circ W-89.2^\circ W]$, $[16.1^\circ N-17.8^\circ N]$, Caribe: $[89.46^\circ W-88.54^\circ W]$, $[15.2^\circ N-15.9^\circ N]$, Franja

Transversal: [91.5°W-89.46°W], [15.6°N-16.1°N], Occidente: [92.1°W-91.2°W], [14.7°N-15.6°N], Altiplano Central: [91.2°W-90.2°W], [14.56°N-15.6°N], Valles de Oriente: [90.2°W-89.3°W], [14.2°N-15.5°N], Boca Costa: [92°W-90.5°W], [14.3°N-14.6°N], Costa Sur: [92.3°W-90.1°W], [13.8°N-14.3°N]; ver Figura 2

Para el cambio de temperatura máxima desde el punto de vista espacial se realizó en base a las estaciones utilizadas, por medio de la herramienta Spline de ArcGis la cual utiliza un método de interpolación estimando valores, obteniendo la anomalía de temperatura entre los periodos (1971-2000) y (2001-2019). Los datos diarios de estaciones locales fueron homogenizados y rellenados mediante el método de la serie más cercana (Paulhus & Kohler, 1952); es decir que para completar los datos diarios se promedian los valores vecinos, normalizados dividiéndolos por sus respecti-

vos promedios promedio y luego se generó el modelo de regresión (Guijarro, 2018).

Resultados

Para la temperatura

La temperatura en los periodos de tiempo de la canícula se ha incrementado para Guatemala en el periodo de 1971-2019. Sin embargo; tal como se observa en la Figura 3, se evidencia entre 0.5 a 1 °C en algunas regiones como el caso del Caribe, Boca Costa, Costa Sur, Franja Transversal del Norte y Altiplano Central.

En la Figura 4 se observa el incremento de las temperaturas máximas promedios de los meses de junio a octubre para cada año de 1971 a 2019 para Guatemala.

Figura 2

Mapa de las regiones climáticas de Guatemala aproximadas con rectángulos

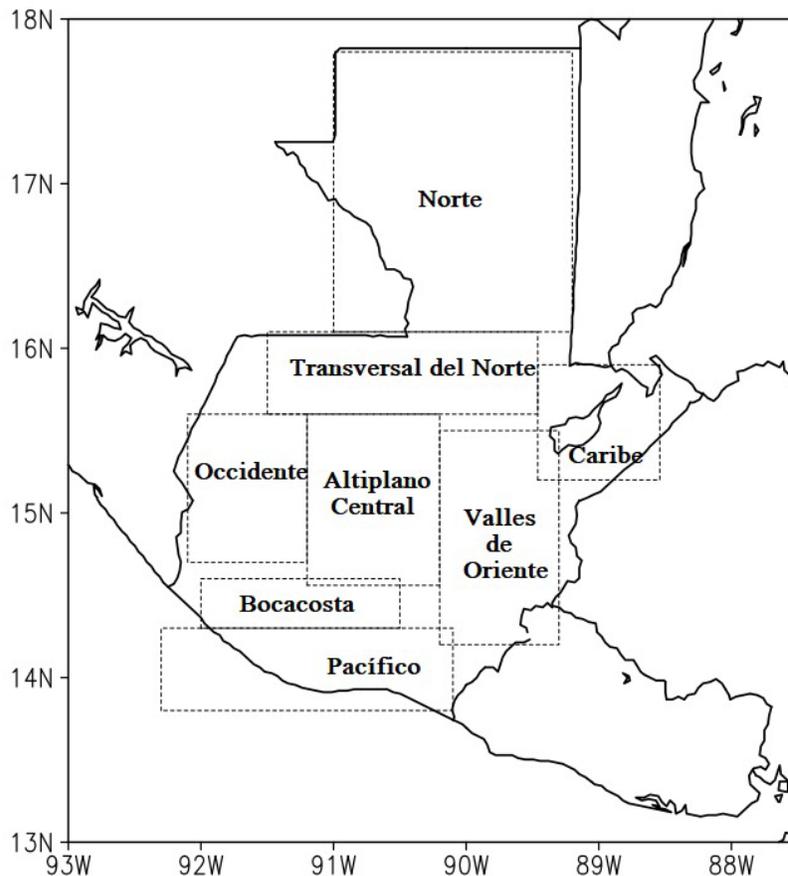


Figura 3

Cambios de temperatura (°C) en el periodo de canícula para Guatemala, 1971-2019

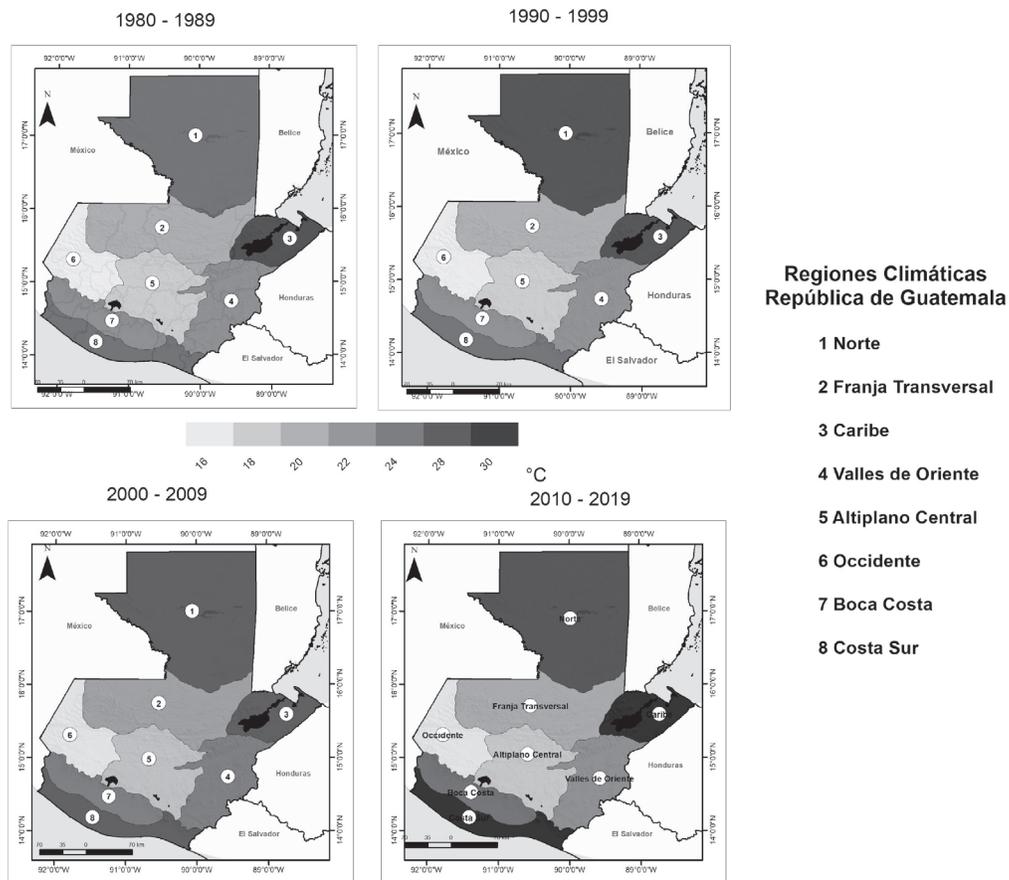
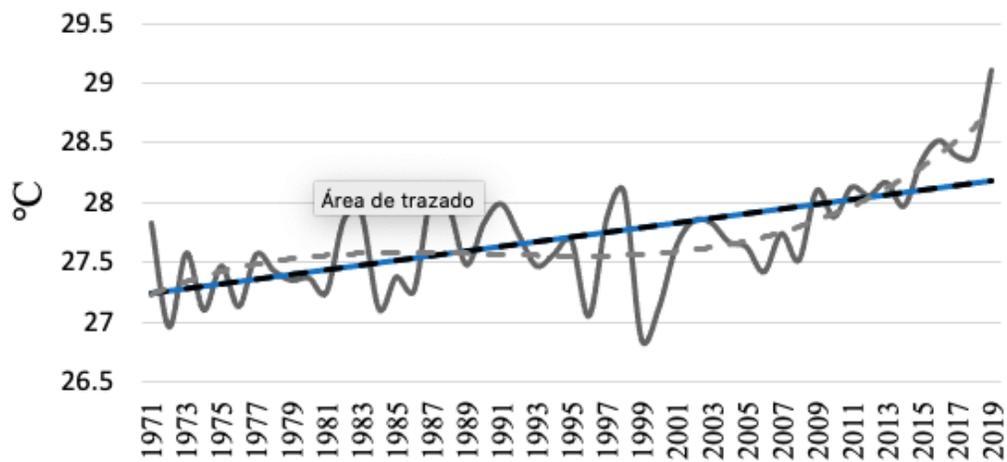


Figura 4

Promedio de temperatura máxima (°C) de junio a octubre, desde 1971-2019 para Guatemala



En la Figura 5 se observa que las temperaturas mínimas promedio mensual están incrementando su valor, lo cual evidencia un calentamiento significativo en el periodo canicular.

Derivado del cálculo de las pendientes se generó la gráfica de tendencias de julio, mes que fue el que más pendiente de aumento presentó de todos los meses del año. Al analizar tres periodos de comparación: (i) un periodo de 1971 al 2019 (49 años), (ii) un periodo del año 1971 al 1999 (29 años) y (iii) un periodo final el cual comprende del año 2000 al 2019 (20 años); se identificaron señales significativas de aumento constante de temperatura a nivel nacional a partir del año 2000 (ver Figuras 6 y 7).

Se puede observar en la Figura 7 que el primer periodo no presenta una tendencia claramente marcada (línea gris oscuro), pero en comparación con el segundo periodo (línea negra) sí que se presenta una tendencia de calentamiento. Coincidentemente este aumento de la temperatura máxima coincide con varias sequías fuertes que ha experimentado el país, como por ejemplo en los años 2001, 2009, 2015, 2016 y 2019.

También se obtuvo un resultado espacial para el cambio de temperatura máxima en julio para Guatemala en base a las estaciones utilizadas, por medio de la herramienta Spline de ArcGis, obteniendo la anomalía de temperatura entre los periodos (1971-2000) y (2001-2019) en la Figura 8.

Para la precipitación

Se elaboró la climatología de precipitación acumulada mensual para cada una de las regiones descritas anteriormente y aproximadas como secciones rectangulares, encontrando que las regiones del Altiplano Central, del Occidente, de Valles de Oriente, de Petén y de Costa Sur presentan un comportamiento agrupado similar, teniendo la menor cantidad de precipitación. Algo separadas con precipitación acumulada mensual superior a 100 mm/mes arriba de las anteriores están las regiones de la Franja Transversal y de Boca Costa pero también con comportamiento similar, con una señal típica de canícula con su disminución de precipitación durante julio y agosto. Notoriamente, se obtuvo que sólo para la región del Caribe no se exhibe el comportamiento de canícula (Figura 9).

Dentro del periodo que se considera de canícula, los meses de julio y agosto son los que presentan menor precipitación y para mostrar los cambios en estos meses se calcularon los días consecutivos sin lluvia durante esos meses.

Los días consecutivos sin lluvia durante julio y agosto del periodo de 1971 al 2019 se muestra en la Figura 10, se aprecia que el periodo de 1970 a 1995 los días consecutivos sin lluvia son de aproximadamente 20 días y para finales del periodo de 1996 a 2019 la media es de aproximadamente de 30 días consecutivos sin lluvia en los meses de julio y agosto.

Figura 5

Promedio de temperatura mínima (°C) de junio a octubre, desde 1971-2019

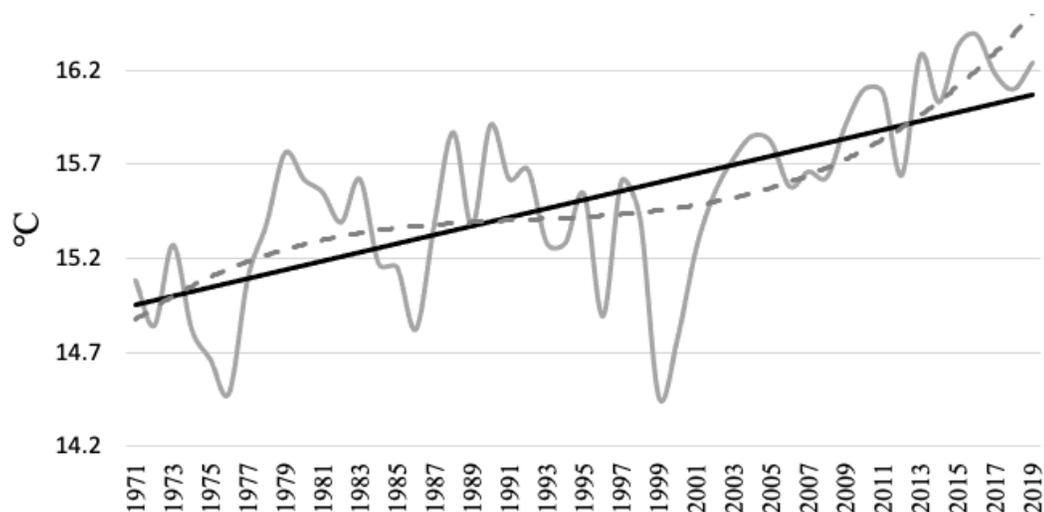
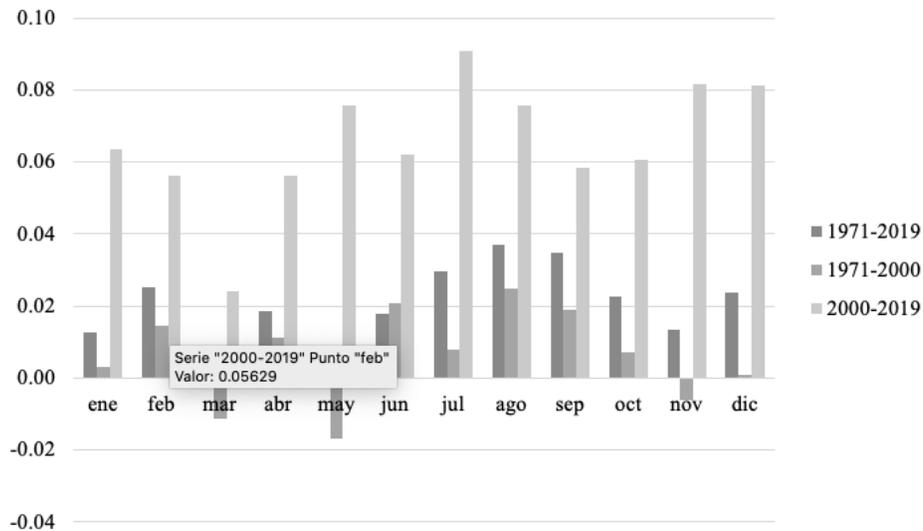


Figura 6

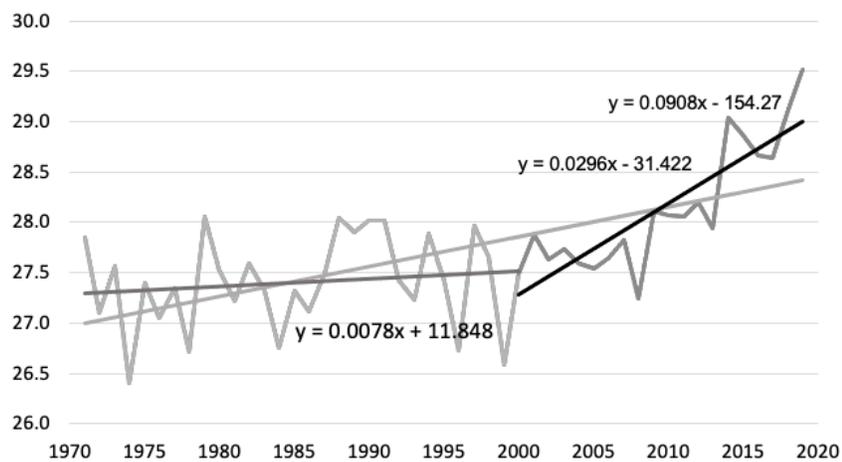
Comportamiento de las pendientes de temperatura máxima (°C/año)



Nota. Comportamiento de las pendientes de temperatura máxima (°C/año) tomando tres diferentes periodos: (1971-2019) barras grises oscuro, (1971-2000) barras grises, (2000-2019) barras grises claro.

Figura 7

Tendencias de temperatura maxima (°C/año)



Nota. Tendencias de temperatura máxima tomando las pendientes (°C/año) para tres diferentes periodos: (1971-2019) línea gris, (1971-2000) línea gris oscuro y (2000-2019) línea negra; para el mes de julio.

Figura 8

Anomalía de temperatura máxima (°C) para los periodos 1971-2000 y 2001-2019

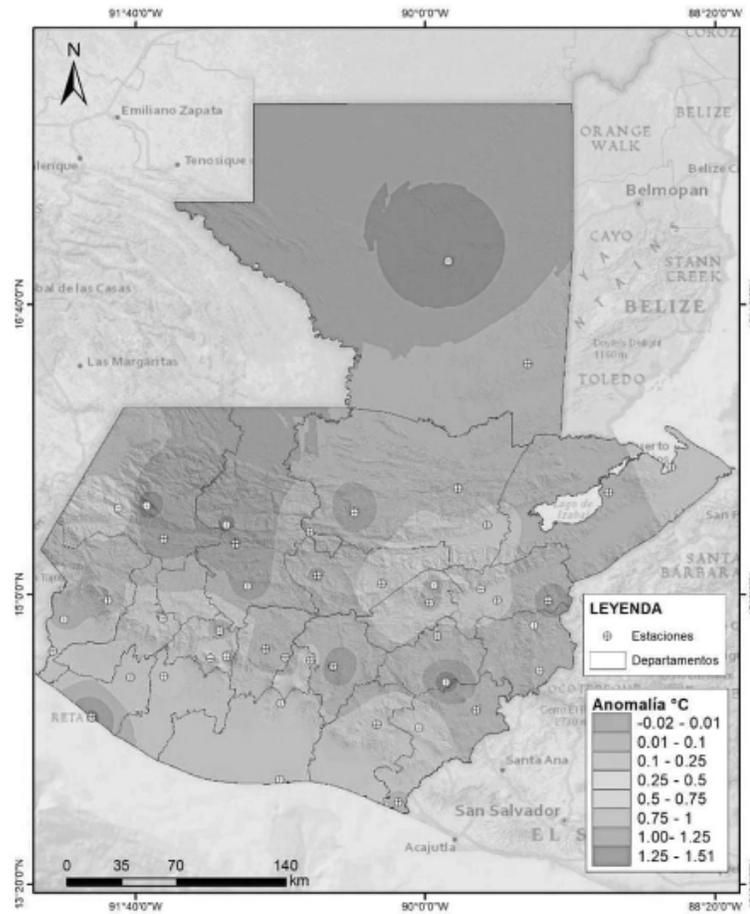


Figura 9

Climatología de precipitación acumulada mensual (mm/mes) en cada una de las regiones para el periodo 1979-2019

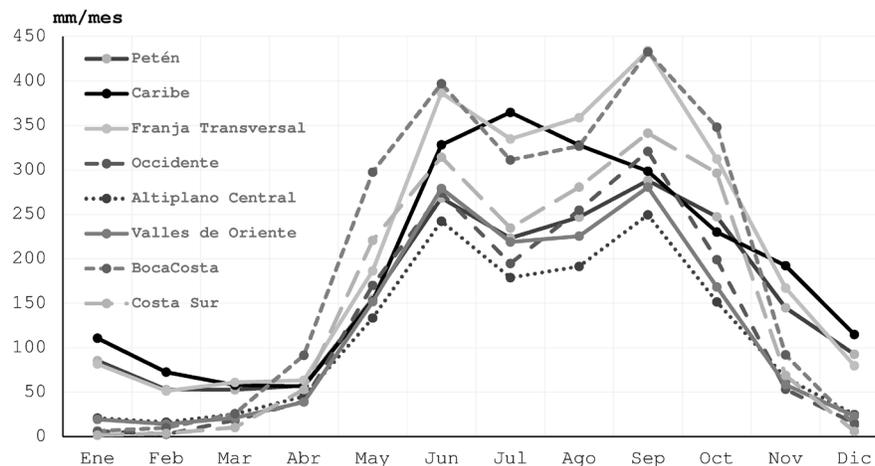
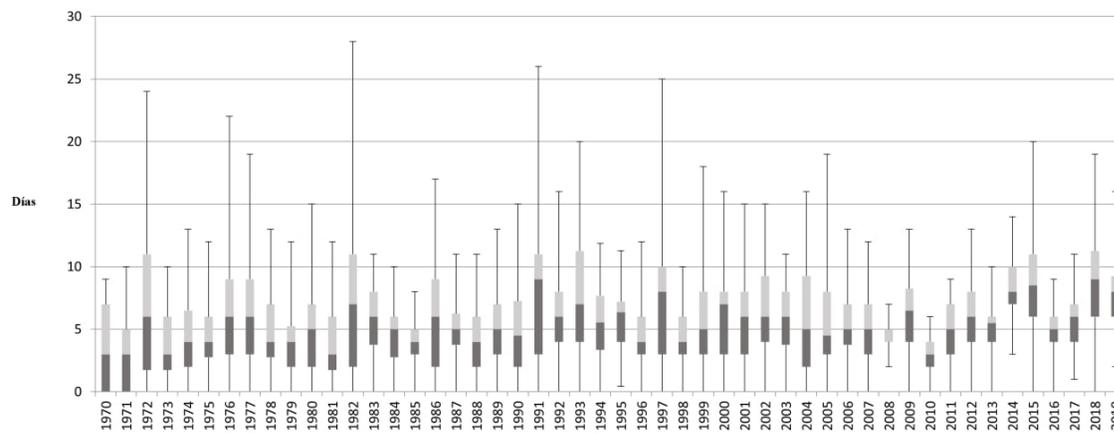


Figura 10*Días sin lluvia dentro de la canícula*

Para la OLR

La radiación saliente de longitud de onda larga (OLR), es aquella que se emite hacia el espacio después de que la radiación solar incidente sobre la atmósfera ha interactuado con cualquier elemento dentro de ella, como nubes o superficie. Se mide usando satélites y se usan unidades de flujo de energía (Wm^{-2}). Es una variable muy usada en el ámbito de las ciencias atmosféricas para encontrar áreas de desarrollo de nubes profundas o en su defecto, para averiguar en donde no las hay.

Para la región de Guatemala se hizo la climatología de OLR obteniendo un comportamiento acorde al de la precipitación (Figura 9), con dos picos de OLR mínima centrados en junio y en septiembre correspondientes a los máximos de precipitación en los mismos meses, con un periodo de aumento relativo de OLR en la mitad del verano, durante julio y agosto, correspondiente a la canícula. Al igual que para la precipitación, encontramos que la variabilidad es mayor para el segundo pico de OLR comparada con el primero, lo que indica que hay una mayor interacción de fenómenos meteorológicos hacia fines de la temporada lluviosa.

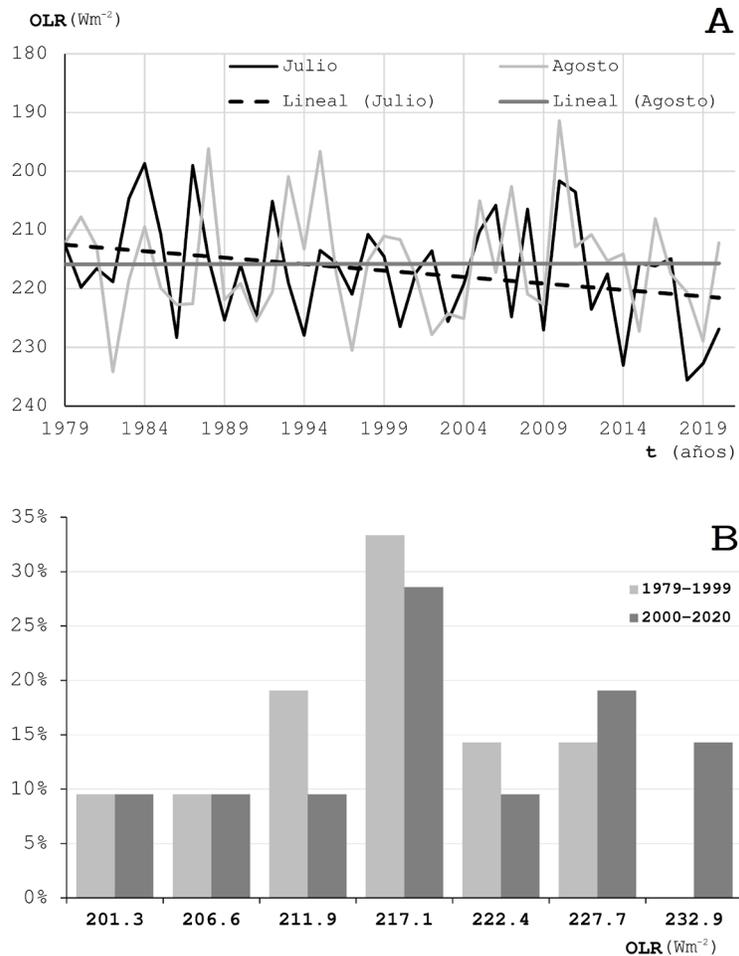
Centrándose en los meses de julio y agosto, se buscó una tendencia de OLR para julio y agosto, encontrando que sólo para julio se observa que hay una tendencia positiva de OLR y que es casi nula para agosto (Figura 11A), además observamos que en general, la OLR disminuye conforme el tiempo transcurre de julio a agosto lo que está de acuerdo a la climatología

de OLR, sin embargo, hay varios años que ocurre al contrario (1982, 1983, 1984, 1985, 1987, 1992, 1997, 2002, 2006, 2008, 2011 y 2015) y la OLR aumenta de julio a agosto más de un 20% del rango de variabilidad, es decir, más de 7 Wm^{-2} , lo que permite concluir que en esos años el periodo de canícula se prolongó. Basados en el resultado anterior, comparamos la frecuencia relativa de OLR en julio para dos periodos de 21 años cada uno (1979-1999) y (2000-2020), reafirmando que la OLR está incrementándose, en particular los valores mayores a 223 Wm^{-2} (Figura 11B), lo que sugiere que para julio la tendencia lineal de OLR indica que hay más días sin desarrollo de nubes profundas en la región.

Se determinaron los patrones espaciales de anomalías de OLR para julio y agosto desde 1979 a 2020, tomando que la anomalía negativa está asociada a un incremento de nubosidad y mayor probabilidad de precipitación y en el caso contrario, la anomalía positiva implica un decremento de la nubosidad y de la precipitación. Se encontró que para los años obtenidos anteriormente (1982, 1983, 1984, 1985, 1987, 1992, 1997, 2002, 2006, 2008, 2011 y 2015) a partir de la Figura 11a, para el mes de agosto la mayoría cumple con anomalía positiva (menor nubosidad) sobre el territorio de Guatemala, con la excepción de 1984 con anomalía negativa, 2011 considerado neutro, y de los años 1992 y 2006 con la anomalía positiva sobre el sur del país. El mes de julio no siguió la correspondencia de forma tan clara como agosto y sólo cumplió la condición de anomalía positiva el año de 1982.

Figura 11

Climatología de OLR de julio y agosto y frecuencia relativa de OLR para julio, periodos 1979-1999 y 2000-2020



Nota. Panel A: climatología de OLR de julio (línea continua negra) y agosto (línea continua gris claro) con sus respectivas tendencias lineales (guiones negros y línea gris oscura), Panel B: frecuencia relativa de OLR para el mes de julio para los periodos (1979-1999) en gris claro y (2000-2020) en gris oscuro.

Espacialmente, se agruparon varios años según la anomalía de OLR para julio y la subsecuente de agosto, prevaleciente sobre Guatemala en ese tiempo (año), obteniendo:

- Grupo 1, julio con anomalía negativa y agosto con anomalía negativa, patrón que representa un 19%: 1979, 1981, 1984, 1988, 2001, 2005, 2010, 2016.
- Grupo 2, julio con anomalía negativa y agosto con anomalía positiva, patrón que representa un 14.3%: 1983, 1985, 1987, 1996, 2002, 2008.
- Grupo 3, julio con anomalía positiva y agosto con anomalía positiva, patrón que representa un 19%: 1982, 1986, 1989, 1991, 2003, 2004, 2009, 2019.
- Grupo 4, julio con anomalía positiva y agosto con anomalía negativa, patrón que representa un 7.1%: 1994, 2000, 2007.

Aunque los grupos anteriores explican 59.4% de la variabilidad, encontramos patrones espaciales de anomalía de OLR con estructura de dipolo, la mayoría meridionales, que dividen al país y que pueden conducir a errores al hacer promedios espaciales.

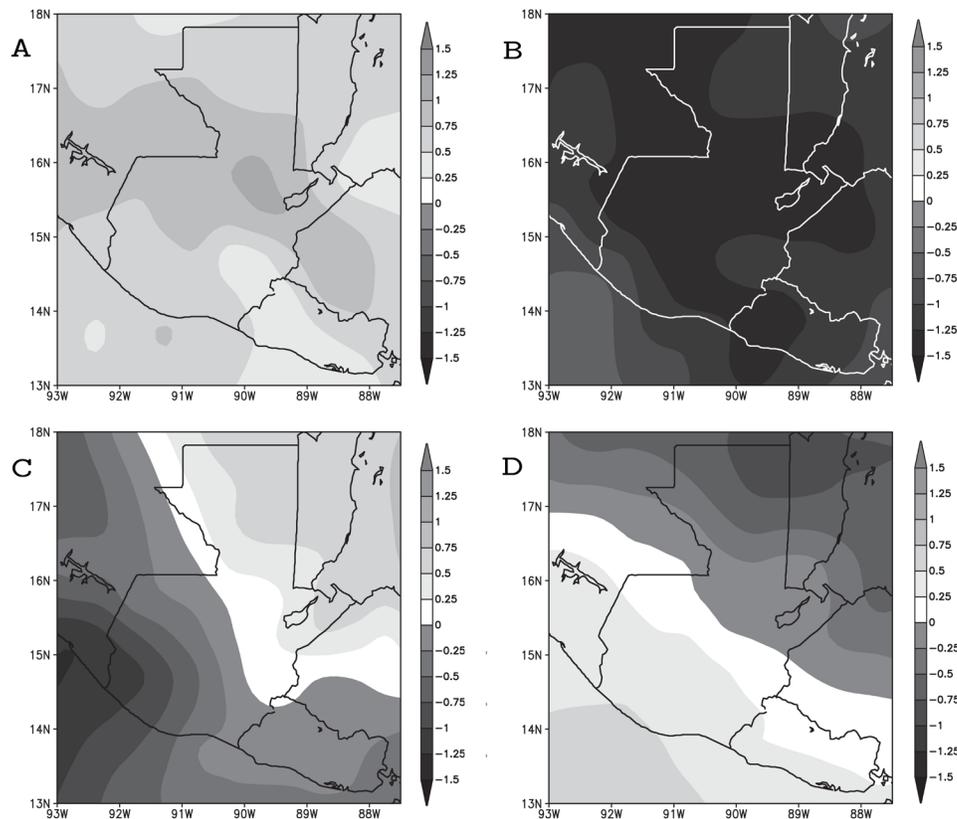
Para buscar una correspondencia entre los resultados anteriores de OLR con alguna medida de anomalía espacial de precipitación, se obtuvieron patrones espaciales de SPI para 3 y 6 meses. Los análisis de 3 meses se centraron en julio, es decir, tomando a junio, julio y a agosto (JJA), los de 6 meses tomaron los meses desde mayo a octubre (MJJASO), teniendo una mutua correspondencia de valores de SPI tanto en magnitud como en patrón espacial, lo que sirvió para complementarlos cuando existiera algún dato faltante. Por lo anterior, se decidió considerar únicamente los resultados de SPI de 3 meses y analizar los años de los grupos de mayor representatividad de OLR, así se obtuvo que: los años del grupo 1 (1979, 1981, 1984, 1988, 2005, 2010) tuvieron valores positivos de SPI (más lluvia que lo normal) con excepción para el año

2001 con significativa anomalía negativa ($SPI < -1$) y para 2016 donde los valores de SPI fueron cercanos a lo neutral ($-0.5 < SPI < 0.5$).

Para los años de los otros grupos se obtuvieron principalmente tres patrones: los que tuvieron valores con significativa anomalía negativa de SPI (menos lluvia que lo normal): 1989, 1994, 2001, 2003, 2004, 2007, 2009, 2012, 2014, 2015, 2018 y 2019. Y los que presentaron un dipolo de SPI con más lluvia en el norte-oriental y menos en el sur-poniente: 1982, 1983, 1986, 1987, 1992, 1999, 2000, 2013; y otro dipolo al revés del anterior (con menos lluvia en el norte-oriental y más en el sur-poniente): 1991, 1998, 2008 (Figura 12). Varios de los años que no entraron en la clasificación tuvieron valores de SPI no significativos (neutros) o patrones que no podían corresponderse con los definidos.

Figura 12

Patrones compuestos de SPI-3meses (junio, julio y agosto) para diferentes años



Nota. Panel A: anomalía positiva (1979, 1981, 1984, 1988, 2005, 2010 y 2020); Panel B: anomalía negativa (1989, 1994, 2001, 2003, 2004, 2007, 2009, 2012, 2014, 2015, 2018 y 2019); Panel C: dipolo norte húmedo y sur seco (1982, 1983, 1986, 1987, 1992, 1999, 2000 y 2013); Panel D: dipolo norte seco y sur húmedo (1991, 1998, 2008).

Discusión

En base a los resultados se confirma que los periodos de canícula para Guatemala tienen una tendencia de crecimiento de temperatura y se percibe que esta tendencia se mantenga en los siguientes años de acuerdo a los escenarios de cambio climático para Guatemala (Rivera et al., 2020), y que los episodios de varios días sin precipitación y con temperatura alta, serán cada vez más recurrentes. Según la tendencia lineal obtenida por el análisis, sabemos que el incremento no seguirá subiendo indefinidamente y que lo más probable es que ocurra una de dos cosas: tenga un límite físico o sea parte de una oscilación de un largo periodo de tiempo (baja frecuencia).

Las regiones guatemaltecas que evidencian un aumento de temperatura alrededor de 1 °C en el periodo de la canícula; son Caribe, Franja Transversal del Norte, Norte, Boca Costa y Costa sur, tal como se muestra en la Figura 2. Para cada región, se aprecia que la mayoría presenta el mínimo local de precipitación en el mes de julio y que para algunas regiones ese mínimo dura más, como en las regiones de Valles de Oriente y del Altiplano Central. Para todos los periodos estudiados, la temperatura, los días sin lluvia y la OLR presentan una tendencia positiva y por lo tanto de aumento de esas variables (temperatura, días sin lluvia y OLR), exceptuando marzo y mayo para el periodo de 1971 al 1999 en donde se presentó una tendencia negativa. Se ha demostrado que la OLR está inversamente correlacionada con la nubosidad, por lo cual un valor alto de OLR en un sitio indica que hay cielo despejado ahí, por el contrario, un valor bajo de OLR estará asociado con nubes profundas como las de tormenta (Adem, 1967).

Analizando los meses de la canícula (julio y agosto), se puede indicar que para la temperatura máxima, julio es el mes con mayor tendencia al aumento, y el mes de agosto presenta una tendencia alta también, en el periodo 2000 a 2019. Con esto se evidencia una señal significativa de que las temperaturas máximas son las que han estado aumentando durante el periodo de canícula primamente en el mes de julio a una tasa mayor que la de los demás meses durante el periodo 2000 a 2019 y para el periodo total 1971 a 2019 es el mes de agosto.

Respecto a los resultados de los análisis de OLR y de SPI, se encontró que en general coinciden en que para un mes de agosto seco ($SPI < 0$) hay correspondencia con valores de OLR altos (pocas nubes profun-

das), aunque para julio los resultados no fueron tan concluyentes, ya que la canícula puede iniciar hacia mediados del mes de julio haciendo que el promedio mensual de OLR no sea representativo. Lo que sí ha sido representativo es que para Guatemala se han encontrado dos patrones espaciales de SPI que se pueden tomar como medida de la anomalía de precipitación: (i) en el que todo el territorio presenta anomalía positiva o negativa (~ 45% de los casos) y (ii) un patrón de dipolo casi meridional sobre el país, con anomalía positiva/negativa en el norte/sur (~ 26% de los casos).

Dichos patrones espaciales de SPI, permiten señalar que existen principalmente dos fuentes de flujo de humedad hacia la región de Guatemala; una desde el norte, noreste y este que se puede denominar Caribe y otra proveniente principalmente del Pacífico, conclusiones que están de acuerdo con otros estudios (Durán-Quesada et al., 2017; Maldonado et al., 2017). En los años en que se presenta el dipolo, indica que una de las fuentes de humedad fue suprimida en algún momento de la temporada lluviosa. Además, observamos que varios patrones espaciales de OLR (no mostrados en el trabajo), sugieren un acoplamiento de tipo de circulación secundaria casi estacionario asociado a regiones con convección profunda al oriente de Guatemala (sobre Belice o en el noroeste de Honduras) que están acopladas a regiones de flujo de aire descendente (subsistencia) y sin precipitación sobre territorio guatemalteco.

Para los años con fase El Niño, se notó que en general se asocian al patrón espacial seco sobre todo el territorio (Figura 11B) y al patrón espacial de dipolo con el sur seco y el norte húmedo (Figura 11C) y que para el año de 1997 no se tuvo un patrón espacial significativo que entrara en alguna clasificación. Para años de fase La Niña, en general se asocian al patrón espacial húmedo sobre todo el territorio (Figura 11A) y al patrón espacial de dipolo con el sur húmedo y el norte seco (Figura 11D). En la mayoría de los casos los patrones de SPI y los de anomalía de precipitación construidos con otras bases de datos coincidieron, pero hubo algunos casos que presentaron discrepancias, notamos que el año 1999 tuvo un patrón antisimétrico para SPI y anomalía de precipitación acumulada (CHIRPS), lo que lleva a la necesidad de tener más datos y criterios para decidir cuales resultados son los que están ligados a la realidad.

En la región sur de Guatemala perteneciente al *corredor seco centroamericano* (Gotlieb et al., 2019), notamos que la anomalía negativa de precipitación ($SPI < 0$) se presenta con una frecuencia dos veces

mayor que la anomalía positiva ($SPI > 0$), para los años analizados en la Figura 11; lo cual no sólo está ligado a la condición seca de la región, sino a una variabilidad mayor durante los modos encontrados con anomalía negativa en todo el país y con dipolo meridional positivo (Figura 11B y C).

En materia de cambio climático para Guatemala, se proyectan aumentos en la temperatura de hasta 3.5 °C para el año 2050 y de hasta 6 °C para fines de siglo. Esa es la previsión si se continuara con un crecimiento lineal como el obtenido de 1980 al 2010. La mayoría de los estudios estiman una disminución del 30% de la precipitación anual para finales del siglo en el peor de los escenarios. En general, los impactos potenciales en el clima se reflejan en sequías que podrían ser más prolongadas y épocas de lluvia menos cuantiosas, pero más intensas (García Oliva, 2018; Rivera et al., 2020).

Suastegui y colaboradores (2019), concluyen que se espera que este fenómeno de la canícula se vea afectado a medida que la región de Centroamérica experimente un calentamiento diferencial mayor entre los océanos Pacífico y Atlántico (OP-OA) hacia fines del siglo XXI.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala por la proporción de los datos, así como a la empresa de Geoingeniería, Agua y Ambiente 888, por contribuir con el análisis e interpretación de datos.

Contribución de los autores

Coordinación, elaboración y revisión del Documento: todos los autores
 Diseño de la recolección de datos o del trabajo en campo: todos los autores
 Recolección o contribución de datos o realización del trabajo de campo: todos los autores
 Limpieza, sistematización, análisis o visualización de datos: todos los autores
 Participación en análisis de datos, estructura y en la escritura del documento: todos los autores

Materiales suplementarios

Este artículo no tiene archivos complementarios.

Referencias

- Adem, J. (1967). On the relations between outgoing long-wave radiation, albedo, and cloudiness. *Monthly Weather Review*, 95(5), 257-260. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1967\)095<0257:OTRBOL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1967)095<0257:OTRBOL>2.3.CO;2)
- Durán-Quesada, A. M., Gimeno, L., & Amador, J. (2017). Role of moisture transport for Central American precipitation. *Earth System Dynamics*, 8(1), 147-161. <https://doi.org/10.5194/esd-8-147-2017>
- Durán-Quesada, A., Gimeno, L., Amador, J., & Nieto, R. (2010). Moisture sources for Central America: Identification of moisture sources using a Lagrangian analysis technique. *Journal of Geophysical Research*, 115, (D05). <https://doi.org/10.1029/2009JD012455>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, Artículo 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gallo, K. P., Easterling, D. R., & Peterson, T. C. (1996). The influence of Land Use/Land cover on climatological values of the diurnal temperature range. *Papers in Natural Resources*. 191. <http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/191>
- García Oliva, L. C. (2018). *Caracterización de la canícula en la región guatemalteca usando el modelo climático regional REGCM* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2018-11/Tesis%20Lilian%20Garc%C3%ADa.pdf>
- Gotlieb, Y., Pérez-Briceño, P. M., Hidalgo, H., & Alfaro, E. (2019). The Central American Dry Corridor: a consensus statement and its background. *Revista Yu'am*, 3(5), 42-51.
- Guijarro, J. A. (2018). *Homogenization of climatic series with Climatol*. State Meteorological Agency (AEMET). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27020.41604>
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm.

- Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.
- Liebmann, B., & Smith, C.A. (1996). Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6), 1275-1277.
- Herrera, E., Magaña, V., & Caetano E. (2015). Air–sea interactions and dynamical processes associated with the midsummer drought. *International Journal of Climatology*, 35(7), 1569-1578. <https://doi.org/10.1002/joc.4077>
- Instituto Nacional de Estadística. (2019). Principales Resultados. Encuesta Nacional de Empleo e Ingresos. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2020/08/13/2020081353830FopQpWf6BcBWj8taVS3Q3mRKxgDsvwPe.pdf>
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3-7. <https://doi.org/10.1023/A:1005491526870>
- Magaña, V., Amador, J., & Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Magaña, V., & Caetano, E. (2005) Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools. *Geophysical Research Letters*, 32, Artículo L02803. <https://doi.org/10.1029/2004GL021033>.
- Maldonado, T., Alfaro, E., Rutgersson, A., & Amador, J.A. (2017). The early rainy season in Central America: the role of the tropical North Atlantic SSTs. *International Journal of Climatology*, 37(9), 3731-3742. <https://doi.org/10.1002/joc.4958>
- Mestas-Núñez, A., Enfield, D., & Zhang, C. (2007). Water Vapor Fluxes over the Intra-Americas Sea: Seasonal and Interannual Variability and Associations with Rainfall. *Journal of Climate*, 20(9), 1910-1922. <https://doi.org/10.1175/JCLI4096.1>
- Ochoa, W. (2021). *Dinámica del uso de la tierra y la variabilidad climática en la subcuenca del río Panajachel, cuenca del lago de Atitlán, Sololá* [Tesis de doctorado inédita]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Barrett, B.S., & Ordonez, P. (2019). Intraseasonal Variability of Summer Precipitation in Mexico: MJO Influence on the Midsummer Drought. *Journal of Climate*, 32(8), 2313-2327. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0425.1>
- Pérez, T. (2018). *Cambios de uso de suelo y de clima: Guatemala, un caso de estudio* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2018/enero/0769553/Index.html>
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of missing precipitation records. Monthly Weather Review. *Journal of the Franklin Institute*, 80(8), 129-133. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(94\)90228-3](https://doi.org/10.1016/0016-0032(94)90228-3)
- Rivera, P., Ochoa, W., & Salguero, M. (2020). Escenarios de cambio climático para Guatemala, C.A. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Programa de Doctorado en Cambio Climático y sostenibilidad.
- Rivera, P. (2021). *Variabilidad intraestacional de la precipitación en la región sur de Guatemala durante los 1980-2015, influenciada por la oscilación Madden-Julian* [Tesis de doctorado inédita]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rodriguez-Vera, G., Romero-Centeno, R., Castro, C.L., & Castro, V.M. (2019). Coupled Interannual Variability of Wind and Sea Surface Temperature in the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *Journal of Climate*, 32(14), 4263-4280. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0573.1>
- Small, R. J. O., Szoek, S. P. de, & Xie, S.-P. (2007). The Central American Midsummer Drought: Regional Aspects and Large-Scale Forcing. *Journal of Climate*, 20(19), 4853-4873. <https://doi.org/10.1175/JCLI4261.1>

- Suastegui, A., Franco, R., & Pavia, E. (2019). The mid-summer drought over Mexico and Central America in the 21st century. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1703-1715. <https://doi.org/10.1002/joc.6296>
- Zermeño-Díaz, D. M. (2019). The spatial pattern of midsummer drought as a possible mechanistic response to lower-tropospheric easterlies over the Intra-Americas Seas. *Journal of Climate*, 32(24), 8687-8700. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0528.1>
- Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F. W., & Kenyon, J. (2005). Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes, *Journal of Climate*, 18(11), 1641-1651. <https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>