Tlalli
Revista de Investigación en Geografía

NÚMERO 13 | junio-noviembre 2025 | ISSN: 2683-2275
doi: 10.22201/ffyl.26832275e.2025.13.2104 | pp. 6-45
Recibido: 05-04-2024 | Aceptado: 07-10-2024

Estimación de la localización e intensidad de islas de calor superficial en Playa del Carmen, Quintana Roo, México*

Estimation of the Placement and Intensity of Surface Heat Islands in Playa del Carmen, Quintana Roo, Mexico

Gabriel Sánchez Rivera
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México | Ciudad de México, México
ORCID: 0000-0003-4531-4911
Contacto: gabrielsanchez@filos.unam.mx

Leticia Gómez Mendoza
Facultad de Filosofía y Letras
Universidad Nacional Autónoma de México | Ciudad de México, México
ORCID: 0000-0003-2436-0302
Contacto: leticiagomez@filos.unam.mx

Resumen

Playa del Carmen, en las costas del Caribe mexicano, es uno de los principales destinos turísticos del país con mayor crecimiento constante en población e infraestructura urbana. Los recientes desarrollos habitacionales y los cambios en el uso del suelo en la ciudad se caracterizan por una escasa cobertura vegetal, lo que resulta en un aumento de la temperatura superficial del suelo en comparación con las áreas de selva aún conservadas en la periferia de la ciudad. Este estudio tiene como objetivo identificar la presencia, intensidad y extensión del fenómeno isla de calor urbana superficial (ICUS), a partir de la estimación de las diferencias térmicas entre las zonas urbanas y periféricas de la ciudad (diurnas y nocturnas), ante eventos de aumento de la temperatura superficial en categoría de extremos. Para el análisis y caracterización de las temperaturas extremas se utilizaron imágenes diarias del satélite MODIS-Aqua para

Abstract

Playa del Carmen, located on the Mexican Caribbean coast, is one of the country's main tourist destinations with constant growth in population and urban infrastructure. Recent housing developments and land use changes in the city are characterized by sparse vegetation cover, resulting in an increase in surface soil temperature compared to the still-preserved jungle areas on the city's outskirts. This study aims to identify the presence, intensity, and extent of the surface urban heat island (SUHI) phenomenon by estimating thermal differences between urban and peripheral areas of the city (both day and night) during extreme surface temperature events. The analysis and characterization of extreme temperatures was done used daily images from the MODIS-Aqua satellite for 2003-2023, which were obtained and processed from the Google Earth Engine platform, and the "exceedance over a relative

* *El presente trabajo es resultado de la estancia posdoctoral realizada gracias al Programa de Becas Posdoctorales de la UNAM. Adicionalmente, el estudio forma parte de las actividades del seminario de investigación de la FFyL "Clima, Biodiversidad y Salud" (SEM_01_007_2019) y del proyecto PAPIIT "Plataforma de geovisualización sobre efectos del clima en la salud para México: atlas de salud y clima" (IN307323).*

© Universidad Nacional Autónoma de México, 2025

2003-2023, obtenidas y procesadas desde la plataforma Google Earth Engine, y el modelo estadístico "excedente a un umbral relativo". Con base en los umbrales obtenidos para caracterizar los eventos en categorías de extremos, se estimaron las ICUS para los años 2020 a 2023. Los hallazgos muestran diferencias significativas en las tasas de cambio térmico entre las zonas densamente urbanizadas (más de 50,000 habitantes por km^2) y aquellas con poca vegetación y las áreas situadas en la periferia de la ciudad donde aún se cuenta con cobertura de selva tropical. En los meses de mayo (meses con mayores temperaturas en la región), la intensidad de las islas de calor (IICUS) ronda entre los 6 y 7 °C. La máxima IICUS se reporta para mayo de 2023 en el orden de los 8.4 °C, con una temperatura máxima registrada hacia la zona centro de la ciudad de 42.6 °C. Este estudio ofrece una base para orientar la restauración ecológica de la ciudad con el fin de reducir los impactos de la isla de calor en Playa del Carmen y sus efectos en la población.

Palabras clave: *Quintana Roo || Caribe (Región) || Restauración ecológica ||Playa del Carmen ||Urbanización || Calefacción del suelo*

threshold" statistical model. SUHIs were estimated for the years 2020 to 2023 based on the thresholds obtained to characterize events in extreme categories. The findings show significant differences in thermal change rates between densely urbanized areas (more than 50,000 inhabitants per km^2) compared to those with little vegetation and areas in the city's outskirts where tropical jungle cover still exists. The intensity of the heat islands (SUHI intensity) in May ranges from 6 to 7 °C (the month with the highest temperatures in the region). The maximum SUHI intensity was reported for May 2023 at around 8.4 °C with a maximum recorded temperature towards the city center of 42.6 °C. This study provides a basis for guiding the ecological restoration of the city to reduce the impacts of the heat island in Playa del Carmen and its effects on the population.

Keywords: *Quintana Roo || Caribbean Area || Ecological Restoration || Playa del Carmen || Urbanization || Soil heating*

Introducción

El incremento de la extensión de las áreas urbanas trae consigo un aumento de la temperatura con respecto de las zonas colindantes no urbanizadas, donde la vegetación natural se mantiene conservada, efecto que autores como Landsberg (1981), Oke (1973, 1995, 2002) y Stewart *et al*. (2014) definen como *isla de calor urbana* (ICU). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, 2014) las define como zonas de relativa calidez creadas por el aire urbano y las temperaturas de la superficie, las cuales pueden alcanzar valores de entre 1 y 12 °C por arriba de los que se presentan en zonas rurales aledañas. Diversos autores definen la ICU como la diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y su

periferia, originada por el almacenamiento de calor en los materiales de construcción y la generación de calor debido a las actividades humanas y los cambios en el uso del suelo (Angeles Suazo *et al*., 2019; Araiza Olivares, 2022; Giraldo *et al*., 2022; Godoy Uribe, 2017; Manzanilla Quiñones, 2022; Reyes Escobedo y Aguiluz León, 2023; Zavaleta Palacios *et al*., 2020). Por su parte, Voogt y Oke (2003) se refieren al término isla de calor urbana de superficie (ICUS) como aquélla que puede ser estimada a través de los sensores térmicos remotos, dado que estos instrumentos captan los patrones espaciales de radiación térmica ascendente.

El aumento de las temperaturas asociado a las islas de calor superficial promueve el deterioro de los sistemas socioecológicos y genera diversos escenarios que tienden a incrementar los niveles de vulnerabilidad y exposición de la población ante los efectos de las altas temperaturas, lo que resulta en malestar y la aparición de enfermedades respiratorias e insolación (Henríquez Ruiz *et al*., 2021; Paravantis *et al*., 2017; Qaid *et al*., 2016; Romero y Sarricolea, 2006; Wong *et al*., 2013). El calentamiento urbano y el aumento de las temperaturas asociadas al cambio climático contribuyen también al incremento de la demanda del consumo energético para refrigeración industrial, comercial y doméstica (Henríquez Ruiz *et al*., 2021; Salvati *et al*., 2017). En este sentido, los escenarios de cambio climático para la península de Yucatán (Orellana Lanza *et al*., 2009) apuntan hacia un incremento de las temperaturas superficiales y de la intensidad de las sequías, desde fuertes en la zona centro y sur hasta severas en la zona noroeste de la península, como resultado de los cambios graduales (incremento y/o disminución) de los patrones de precipitación a través de los años (IPCC, 2021; Méndez González *et al*., 2009; PNUD México-INECC, 2018).

Estas variaciones provocan cambios en la variabilidad climática estacional, cuyos indicadores más cercanos son la aparición de eventos extremos (como frentes fríos, ondas de calor, ciclones tropicales, precipitaciones extremas convectivas, ondas frías, etcétera), que son cada vez más intensos. El término *evento extremo* se define generalmente como aquél en el que una de sus variables supera ciertos límites de referencia en términos de magnitud, duración y frecuencia, y se caracteriza por tener una gran diferencia entre el impacto máximo y un impacto típico (Décamps, 2008). La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2018) define un evento extremo como aquél en el que una de sus variables supera ciertos umbrales específicos en términos de percentiles, valores absolutos fijos y/o períodos de retorno. Dada la gravedad de

los impactos y consecuencias asociadas a los golpes de calor, se han identificado diversos estudios en la literatura científica, como los realizados en países como Grecia, España, Inglaterra, China, Irán, Francia, Italia, Ghana y Sri Lanka. (Anniballe *et al*., 2014; Araiza Olivares, 2022; Kwofie *et al*., 2022; Li *et al*., 2021; Liu y Zhang, 2011; Manzanilla Quiñones, 2022; Moradi y Homayouni, 2023; Thanvisitthpon, 2023; Trejos S. y Perén, 2020). En América, destacan trabajos en países como Estados Unidos, Panamá, Brasil, Perú, Chile y Colombia (Angeles Suazo *et al*., 2019; Giraldo *et al*., 2022; Henríquez Ruiz *et al*., 2021; Moreira *et al*., 2019; Thanvisitthpon, 2023; Trejos S. y Perén, 2020; Voogt y Oke, 2003).

En México, sólo un número limitado de ciudades han sido objeto de estudios relacionados con el fenómeno de las islas de calor. Los primeros trabajos a nivel nacional corresponden a los realizados por investigadores como Ernesto Jauregui, Víctor Barradas, Adalberto Tejeda Martínez, entre otros, quienes comenzaron el estudio del fenómeno ICU en ciudades como Mexicali, Guadalajara y México (Ballinas y Barradas, 2016; García Cueto *et al*., 2007; Jauregui *et al*., 1992; Jáuregui y Luyando, 1998). En la literatura científica sobresalen las investigaciones realizadas para Ciudad de México; Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; Hermosillo, Sonora; Toluca, Estado de México; Mexicali, Baja California; Ciudad Juárez, Chihuahua; Monterrey, Nuevo León; Querétaro, Querétaro; Tampico, Tamaulipas; Torreón, Coahuila; y Uruapan, Michoacán (Barrera Alarcón *et al*., 2022; Manzanilla Quiñones, 2022 y 2023; Villanueva Solis, 2017; Flores de la O. *et al*., 2018).

Destaca el caso de la península de Yucatán, en donde únicamente se identificaron trabajos relacionados con el fenómeno de ICU para las ciudades de Mérida, Yucatán; Playa del Carmen, Quintana Roo y San Francisco de Campeche, Campeche (Canul Turriza *et al*., 2024; Sánchez Rivera *et al*., 2024; Villanueva Solis y Torres Pérez, 2023). De acuerdo con el reporte del clima en México publicado por Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023), desde el 2005 se ha presentado, en el territorio nacional, una tendencia continua del aumento de las temperaturas por encima de la normal climatológica de referencia. El año 2023 se presenta como el más cálido con relación al registro histórico desde 1953, con un promedio de la temperatura media nacional de 22.7 °C, lo cual representa 1.3 °C por encima del promedio climatológico 1991-2020. La escasa existencia de estudios en la península de Yucatán relacionados con la presencia del fenómeno denominado *islas de calor* es especialmente relevante, ya que, durante

el año 2023, los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo registraron temperaturas promedio anual mayores a 30.0 °C y anomalías de temperatura por arriba de 2.0 °C con respecto al promedio climatológico 1991-2020 (SMN, 2023). Lo anterior tiene efectos directos sobre la salud y el bienestar de los sistemas socioecológicos de la región (Romero y Sarricolea, 2006), particularmente sobre los habitantes de las ciudades costeras del norte del estado. Las áreas circundantes a las ciudades costeras del estado están bajo una gran presión de cambio de uso del suelo, lo que ha resultado en la impermeabilización de los suelos debido a la instalación de asfalto y edificios. Esto es el resultado de un aumento en los procesos de gentrificación en las áreas centrales de las ciudades, lo que resulta en una proliferación de nuevos desarrollos residenciales, zonas comerciales e infraestructura y equipamiento urbano, donde los nuevos asentamientos se caracterizan por tener poca o ninguna cobertura vegetal. Todo lo anterior se deriva de la creciente actividad turística de la región (Ochoa Jiménez *et al*., 2020).

Ejemplo de los desafíos que enfrentan las principales ciudades en el norte de la península es la ciudad costera de Playa del Carmen, en Quintana Roo, la cual ha experimentado un rápido crecimiento poblacional y un aumento en la construcción de infraestructura urbana para satisfacer la demanda de servicios turísticos y de la población local. Ochoa Jiménez *et al*. (2020) estiman que entre 1985 y 2015 (un periodo de treinta años), la ciudad perdió alrededor de 2,514.6 hectáreas de vegetación natural, a una tasa anual de -2.2 %. Las modificaciones en las propiedades naturales de las áreas donde se ubican las ciudades tienen como efecto el aumento del albedo y la emisividad, propiedades que pueden ser estimadas a partir del análisis de la temperatura de la superficie terrestre a través de productos derivados de percepción remota (Barrera Alarcón *et al*., 2022; Casadei *et al*., 2021; Jin *et al*., 2005; Manzanilla Quiñones, 2022; Romero y Sarricolea, 2006). Los efectos de la ICUS se pueden delimitar y estudiar a partir de la identificación de los límites espaciales de la zona urbana (*urban boundary layer*), dado que es en las zonas limítrofes donde las diferencias térmicas entre el medio urbano y rural se diluyen hasta desaparecer (Moreno Garcia, 1994). El estudio de la complejidad de las respuestas del medio natural ante los cambios y variabilidad climáticos en México permite visualizar espacialmente la vulnerabilidad de la población asociada con el cambio climático y el calentamiento global (Zermeño Díaz *et al*., 2020 y 2021).

Por lo anterior, el estudio aquí presentado tiene como objetivos principales: 1) caracterizar las temperaturas máximas de la superficie terrestre (TST) en categoría de eventos extremos que fueron registradas en el período 2003-2023 en la ciudad de Playa del Carmen, Quintana Roo, a partir de productos derivados de percepción remota; 2) identificar la presencia, distribución espacial e intensidad del fenómeno de isla de calor urbana superficial (ICUS) en la ciudad de Playa del Carmen durante los meses de mayores temperaturas registradas en los años 2020 a 2023, mediante la estimación de las diferencias térmicas, diurnas y nocturnas, entre la zona urbana y la periferia de la ciudad y; 3) estimar la relación de la ICUS con la densidad de población.

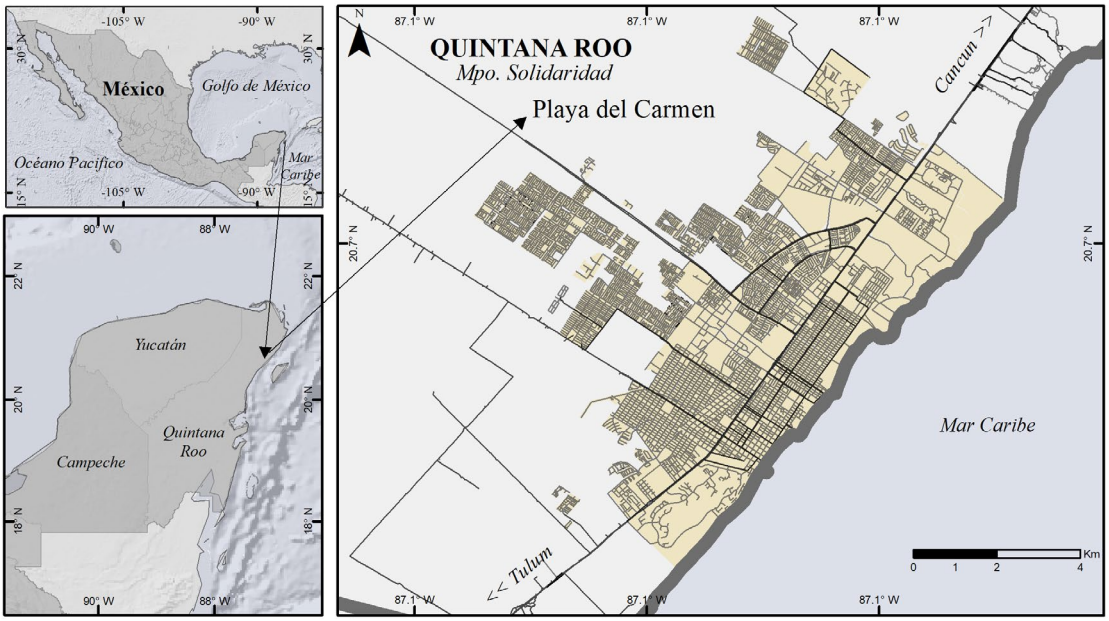
Materiales y métodos

Zona de estudio

Playa del Carmen, cabecera del municipio de Solidaridad, fundado en el año 1993 (PNUMA *et al*., 2008), se localiza en la zona norte del estado de Quintana Roo con coordenadas extremas 20° 45’ N, 88° 05’ W y 19° 46’ N, 86° 57’ W. Colinda con los municipios Lázaro Cárdenas al noroeste; Puerto Morelos al norte; Cozumel y el mar Caribe al este; Tulum al sur; y limita al oeste con el estado de Yucatán (INEGI, 2020). La región se caracteriza por estar conformada principalmente por una amplia plataforma de origen calizo de escaso relieve (Vidal Zepeda, 2005). Solidaridad presenta un clima de tipo cálido subhúmedo con lluvias en el verano isotermal y con presencia de canícula (Ax’(w2) iw”) con una temperatura promedio anual de 26 °C con máximas del orden de 33 °C en primavera-verano (de abril a agosto) y mínimas en invierno (enero) de 17 °C. La precipitación promedio anual oscila en el orden de 1300 mm (Orellana Lanza, 1999). De acuerdo con la sexta serie de *Uso del Suelo y Vegetación* (INEGI, 2015), las áreas periféricas de la ciudad conservan densas selvas de tipo mediana baja caducifolia y subcaducifolia. Dichas áreas, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2024), no presentan asentamientos humanos, por lo que no se reportan habitantes. En la Figura 1 se presenta el mapa de localización de la ciudad y su traza urbana.

Figura 1

Mapa de localización de la ciudad de Playa del Carmen



Fuente: Elaboración propia

La economía de Playa del Carmen se basa principalmente en el turismo, siendo la 5ta Avenida, una calle peatonal paralela a la costa, su principal atracción. La ciudad cuenta con una variedad de ecosistemas naturales, incluyendo playas, selvas, cenotes, ríos subterráneos, manglares, dunas costeras y arrecifes de coral. Sin embargo, la urbanización y el desarrollo turístico han tenido un impacto significativo en estos ecosistemas. Las selvas presentan una degradación significativa y constante como resultado del crecimiento de las zonas urbanas; por su parte, la vegetación de manglar está drásticamente impactada por la ubicación inadecuada de infraestructura turística costera, misma situación que afecta a las dunas y playas (PNUMA *et al*., 2008).

Materiales

Los productos y materiales considerados para el estudio son de distribución y acceso público, y las herramientas computacionales (*software*) utilizadas cuentan con licencias libres. Los principales insumos se enlistan a continuación:

- Temperatura superficial: Datos diarios de temperatura diurna y nocturna de la superficie terrestre (*land surface temperature* o LST, por sus siglas en inglés) que se obtuvieron de las bandas "*LST_Day*" y "*LST_Night*" del producto MODIS "MYD11A1.061 *Aqua Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global* 1km" (Wan *et al*., 2021).
- Índice Normalizado de Vegetación (NDVI): Se adquirió del producto MODIS "MOD13Q1.061 *Terra Vegetation Indices* 16-Day Global 250m" (Didan, 2021).
- Población: Principales resultados por área geoestadística básica (AGEB) y manzana urbana del *Censo de Población y Vivienda 2020* (INEGI, 2024).
- Configuración histórica de la traza urbana de la ciudad de Playa del Carmen: Capas vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional y Municipal de los años 2000 a 2022 (INEGI, 2000, 2005, 2010, 2016, 2020, 2022).
- Tipos de vegetación: Sexta serie de *Uso del Suelo y Vegetación* (INEGI, 2015).

Para el proceso y análisis de los materiales y los resultados generados se emplearon las siguientes herramientas:

- La plataforma de geoprocesamiento basado en la nube Google Earth Engine, concebida y desarrollada para realizar operaciones complejas de análisis geoespacial sin la necesidad de contar con robustos sistemas computacionales (*hardware* y *software*), al tiempo que permite el acceso a un catálogo conformado por multi-petabytes de imágenes derivadas de diversos satélites de observación terrestre; esta herramienta es utilizada ampliamente en diversas áreas, como usos y cambios de suelo, incendios, cartografía urbana, inundaciones, sequías y riesgos epidemiológicos, entre otras (Gorelick *et al*., 2017).
- El sistema de información geográfica (SIG) QGis (QGIS Development Team, 2022), para el acabado y elaboración de la cartografía final.

Métodos

Para cumplir con los objetivos del estudio se agruparon los procesos en dos etapas principales:

Etapa 1: Adquisición y preprocesamiento de datos

La adquisición, procesamiento, análisis espacial y álgebra de mapas a nivel de píxel para los datos relacionados con temperatura superficial (LST) y el NDVI se llevó a cabo desde la plataforma Google Earth Engine. Todas las capas vectoriales e imágenes ráster fueron homologadas a la proyección cartográfica UTM-GCS_WGS_1984 y las unidades de los productos que así lo requirieron fueron convertidas al sistema métrico decimal.

Etapa 2: Procesamiento de datos

Los valores de temperatura superficial dentro de la zona de estudio se obtuvieron a partir del conjunto de imágenes MODIS para los años 2003 a 2023 (n = 7,654) de las bandas "*LST_Day*" y "*LST_Night*". En el caso de los valores del NDVI, fueron adquiridos de la banda "NDVI". En ambos casos, para reducir los errores derivados de las lecturas equívocas o falsos positivos, las imágenes se filtraron mediante las bandas de calidad que etiquetan los productos a nivel de pixel, en cuanto a la certidumbre de la información presentada y presencia de nubosidad. Para homologar las escalas de los compuestos mensuales de temperatura superficial (TS) y del NDVI, las imágenes mensuales de temperatura superficial (máxima, media y mínima) para los meses de mayo del 2020 al 2023, fueron sometidas a un proceso de re-escalamiento (*resampling*) de 1 km a 250 m, que corresponde a la resolución de las imágenes MODIS de NDVI.

El proceso consistió en la aplicación de una técnica afilamiento térmico espacial mediante el modelo de predicción geoespacial (probabilística) Kriging Ordinario (Ok), cuya particularidad es la inclusión de un modelo de covarianza o variograma derivado de los datos existentes para estimar valores en ubicaciones no muestreadas (Varentsov *et al*., 2020). Entre sus principales características destacan la asignación de pesos que permiten ajustar los valores de manera óptima según la disposición espacial de las muestras, para lo cual considera el uso de un semivariograma para calcular las

distancias entre los puntos muestreados y su autocorrelación espacial (Yang *et al*., 2004). De acuerdo con Mukherjee *et al*. (2015), el modelo Kriging facilita estimaciones óptimas que minimizan la varianza de la predicción, además de ofrecer una medida de la incertidumbre asociada a las estimaciones, produciendo resultados de alta calidad en términos de variación de datos y errores absolutos máximos (Mukherjee *et al*., 2015; Varentsov *et al*., 2020). Para aplicar el modelo Kriging a cada una de las imágenes obtenidas, se utilizó el complemento "*Smart-Map*" disponible en el sistema de información geográfica QGIS (Willam Pereira *et al*., 2022).

Caracterización de temperaturas superficiales como eventos extremos

Para identificar los registros en los cuales la temperatura alcanza valores que puedan ser catalogados como eventos extremos, se generaron series de tiempo de temperaturas máximas promedio diurnas y nocturnas para el período 2003-2023 a partir de imágenes MODIS. Los valores fueron analizados mediante el método denominado "excedente a un umbral relativo (*exceeding a relative threshold*)", el cual clasifica a los eventos en función de la rareza de su ocurrencia, clasificándolos en "raros", "muy raros" y "extremadamente raros", al superar los percentiles 90, 95 y 99 respectivamente (WMO, 2018).

Distribución de islas de calor urbanas superficiales

Para estimar la distribución espacial y temporal de las temperaturas superficiales dentro de la zona de estudio y poder identificar las áreas que corresponden a zonas urbanas, se generaron compuestos mensuales de temperatura y del NDVI. Con las imágenes resultantes de la aplicación del modelo Kriging, se elaboraron los mapas de isotermas para cada uno de los meses considerados, con lo que se logra identificar las áreas que presentan las mayores diferencias térmicas

Estimación de la intensidad de las islas de calor

Para evaluar las diferencias térmicas dentro de la traza urbana de la ciudad, se trazaron ocho transectos perpendiculares en función de la geometría de la ciudad, de forma tal que cruzaran las regiones donde, de acuerdo con isotermas, se presentan los mayores

gradientes térmicos (ver Figura 2). Mediante operaciones de algebra vectorial se extrajeron los valores de temperatura para cada uno de los transectos (a nivel pixel) de las capas mensuales de temperatura y del NDVI. La estimación de la intensidad de la isla de calor urbana superficial (IICUS) se determinó mediante el análisis de los perfiles términos de cada uno de los transectos, aplicando la ecuación propuesta por Oke (2002): IICUS = Tsu – Tsp, donde: IICUS = intensidad de la isla de calor superficial, Tsu = temperatura superficial urbana y Tsp = temperatura superficial de la periferia.

Estimación de la relación entre ICUS y población

Para determinar la densidad poblacional dentro de la traza urbana de la ciudad de Playa del Carmen se correlacionaron las capas vectoriales del *Marco Geoestadístico* (INEGI, 2022) con los datos tabulares de población a nivel de manzanas (INEGI, 2024). Los resultados a su vez se correlacionaron con las áreas consideradas como ICUS, para obtener el índice de población expuesto.

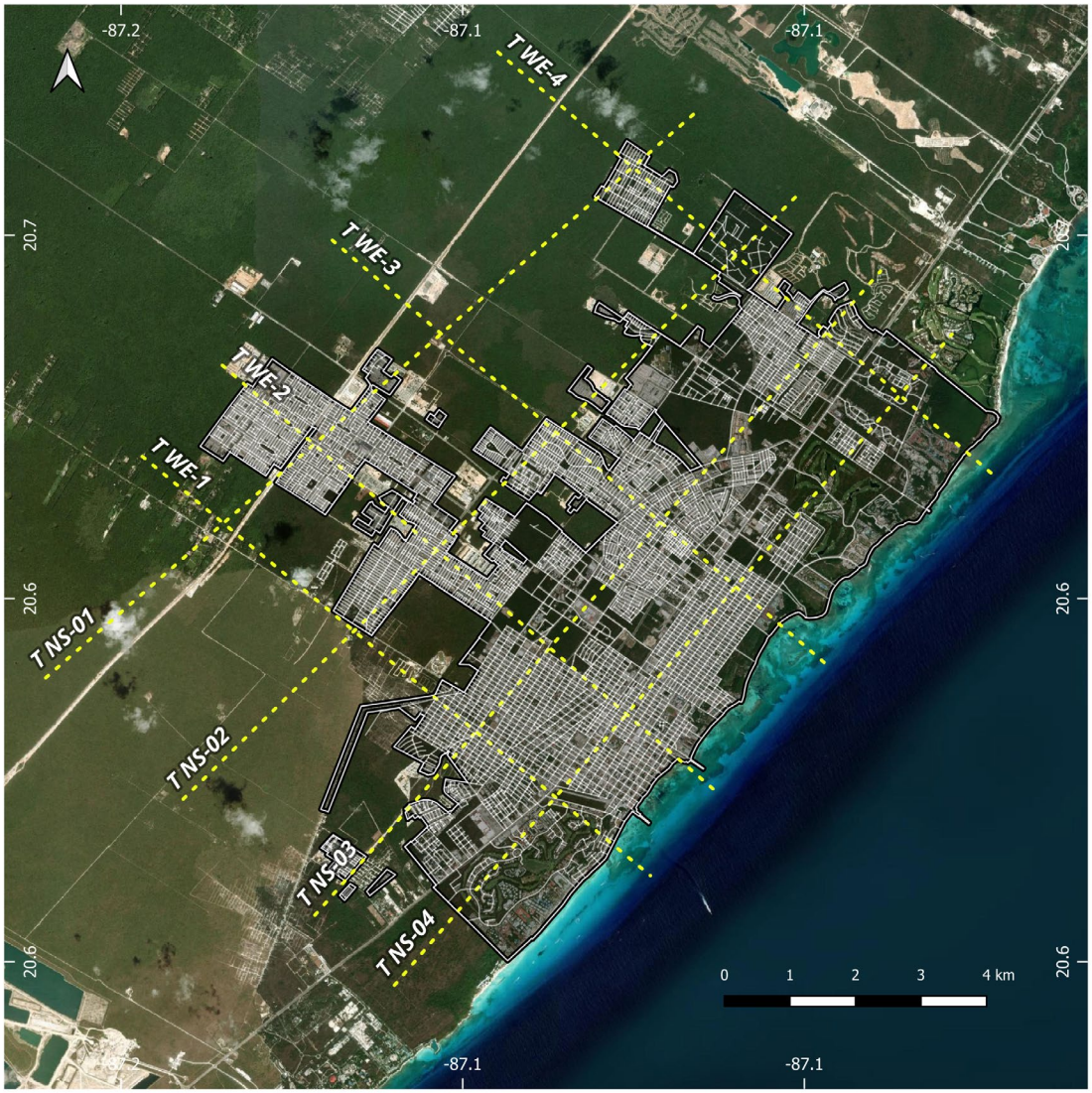
Resultados

Evolución de la traza urbana de la ciudad de Playa del Carmen

De acuerdo con los datos analizados para el año 2020, la superficie construida de la ciudad de Playa del Carmen es de aproximadamente 5,798 ha. Dentro de la traza urbana de la ciudad, las áreas construidas representan alrededor del 75 % de la superficie, seguido por las áreas de vegetación, las cuales ocupan alrededor del 23 %. A partir de los datos del marco geoestadístico 2000 a 2022 (INEGI, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2022), Playa del Carmen ha tenido un crecimiento territorial del orden del 435 % de su superficie, pasando de 954 ha en el año 2001 a cerca de 5,111 ha para el 2022. En la Figura 3 se aprecia el crecimiento de la traza urbana y su relación con los valores del NDVI, así como la distribución de los transectos de monitoreo utilizados para la estimación de las ICUS.

Figura 2

Delimitación de transectos para la determinación de perfiles térmicos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3

Evolución de la traza urbana en el periodo 2000 a 2022

Año	Area [Ha]	Incremento [Ha]	Incremento Relativo [%] *	Incremento Acumulado [Ha]
2000	954.44	-	0%	-
2007	1,954.21	999.8	105%	999.8
2010	4,019.40	2,065.2	106%	3,065.0
2016	4,431.09	411.7	10%	3,476.7
2020	4,970.95	539.9	12%	4,016.5
2022	5,111.70	140.7	3%	4,157.3

* *Incremento relativo [%] con respecto al periodo anterior*

Incremento Total

[Ha]	Relativo [%]
4,157.3	435.6%

Nota: En las imágenes se puede apreciar la distribución de los transectos de monitoreo de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Densidad de población

De acuerdo con el censo de población 2020, la ciudad de Playa del Carmen presenta una población de 304,942 habitantes distribuidos en un área aproximada de 4,300 ha de las poco más de 5,000 ha que conforman la zona urbana (INEGI, 2024). La ciudad se destaca por ser la segunda en número de habitantes después de Cancún y por encima de Chetumal (capital del estado) y Cozumel. No obstante, la tasa de crecimiento anual de la ciudad de Playa del Carmen supera por más del doble (7.2 %) a la de Cancún (3.5 %), y está muy por encima de la de Cozumel (1.4 %) y Chetumal (1.1 %), lo cual contrasta con la tasa de crecimiento poblacional estatal de 1.2 % anual (INEGI, 2024). En la Tabla 1 se presenta la comparación entre el número de habitantes y tasas de crecimiento para los años 2010 y 2020.

Tabla 1

Población estatal y de las principales ciudades del estado de Quintana Roo

Entidad	Población [Habitantes]			Tasa de Crecimiento Anual	Porcentaje de la población estatal (2020)
	2000	2010	2020		
Estado					
Quintana Roo	874,963	1,325,600	1,857,985	1.2 %	
Ciudad					
Cancún	397,191	628,306	888,797	3.5 %	47.8 %
Playa del Carmen	49,825	149,923	304,942	7.2 %	16.4 %
Chetumal	136,825	151,243	169,028	1.1 %	9.1 %
Cozumel	71,401	77,236	88,626	1.4 %	4.8 %
Subtotal	655,242	1,006,708	1,451,393		78.1 %
Porcentaje de la población estatal	74.9 %	75.9 %	78.1 %		

Fuente: Elaboración propia con datos de los censos de población 2000, 2010 y 2020 (INEGI, 2024).

Las diferencias entre la superficie habitada y la superficie reportada como área construida, resultan de la correlación entre la información del censo de población (INEGI, 2024) con el marco geoestadístico (INEGI, 2022).A pesar de estas diferencias, se estima la densidad de población promedio para la zona urbana de Playa del Carmen del orden de los 6,961 hab/km^2.

Las densidades más altas se presentan al noroeste de la ciudad, en el fraccionamiento Villas del Sol; al norte, en el fraccionamiento La Guadalupana; y en la colonia Colosio, ubicada al noreste del núcleo antiguo de la ciudad (zona centro). Estas tres zonas se caracterizan por una incipiente cobertura arbórea urbana (ver Figura 4). En el caso de Playa del Carmen, destaca el hecho de que su periferia está conformada por zonas de vegetación de tipo selva tropical conservada (INEGI, 2015), en las cuales no hay asentamientos humanos ni reportes de número de habitantes de acuerdo con la información del censo de población 2020 (INEGI, 2024).

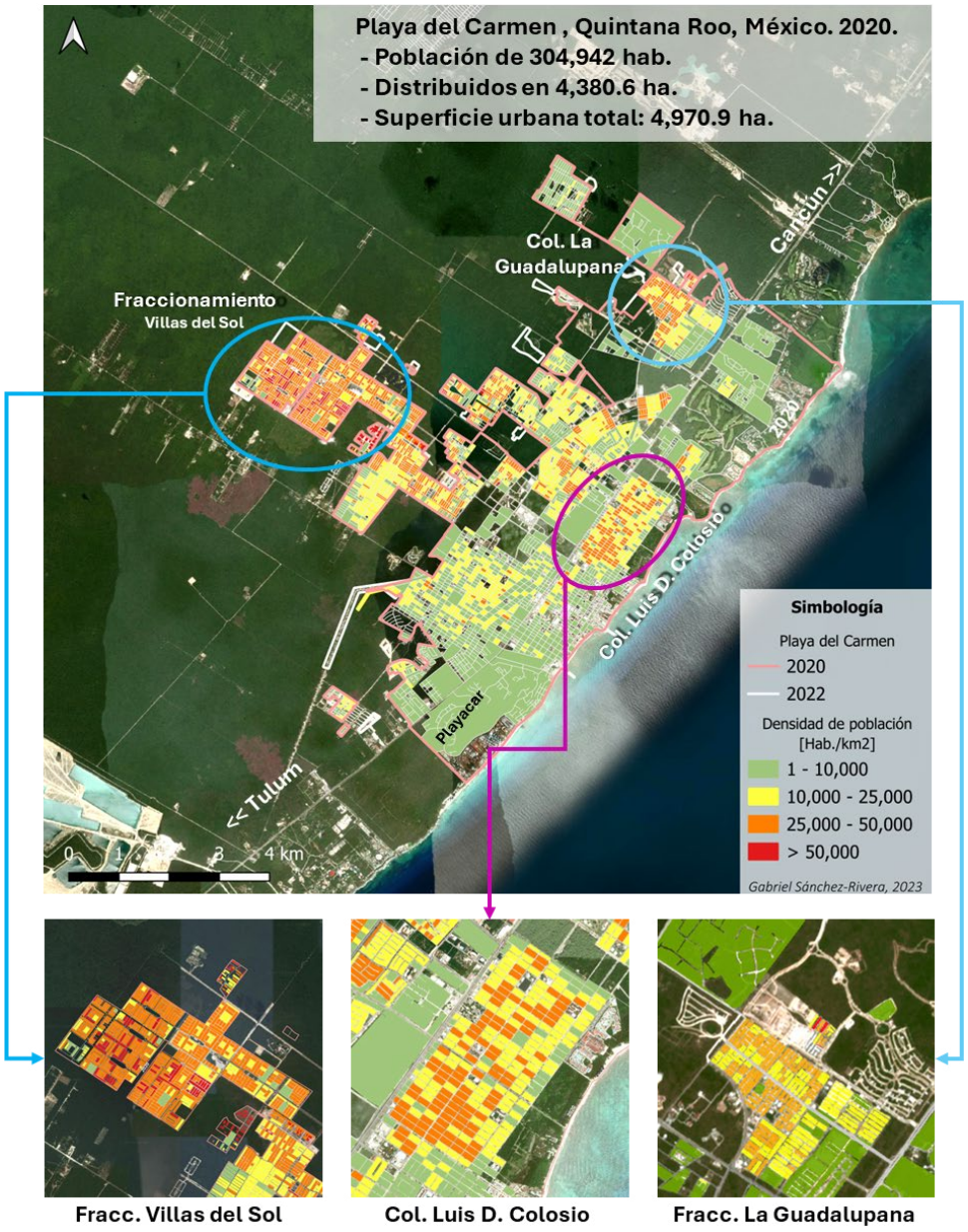
Caracterización de temperaturas superficiales como eventos extremos

Variaciones térmicas diarias

A partir de las 7,654 imágenes disponibles para el período 2003-2023, se identificó que sólo se cuenta con 5,193 (67.8 %) registros útiles para el caso de las TS diurnas, y 4,852 (63.4 %) para las TS nocturnas. La temperatura máxima diaria registrada durante el periodo de estudio alcanzó los 45.3 °C el 10 de mayo de 2014 dentro de la zona urbana, mientras que la mínima diaria se registra en la periferia de la ciudad alcanzando los 4.6 °C el 16 de diciembre de 2006. La diferencia absoluta entre las temperaturas máximas y mínimas diurnas registradas dentro de la zona de estudio durante el periodo estudiado fue de 40.6 °C. Los promedios de las TS diurnas y nocturnas se muestran en la Tabla 2.

Figura 4

Densidad de población a nivel de manzanas en la ciudad de Playa del Carmen



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Temperatura superficial (TS) en el periodo 2003-2023

TS [°C]	Valores promedio		Valores máx./mín. absolutos	
	Diurna	**Nocturna**	**Diurna**	**Nocturna**
Máxima	32.7	22.1	45.3	31.1
Media	29.3	20.4		
Mínima	25.6	18.3	4.7	4.6
Diferencia Máx.-Mín.	7.1	3.8	40.6	26.5

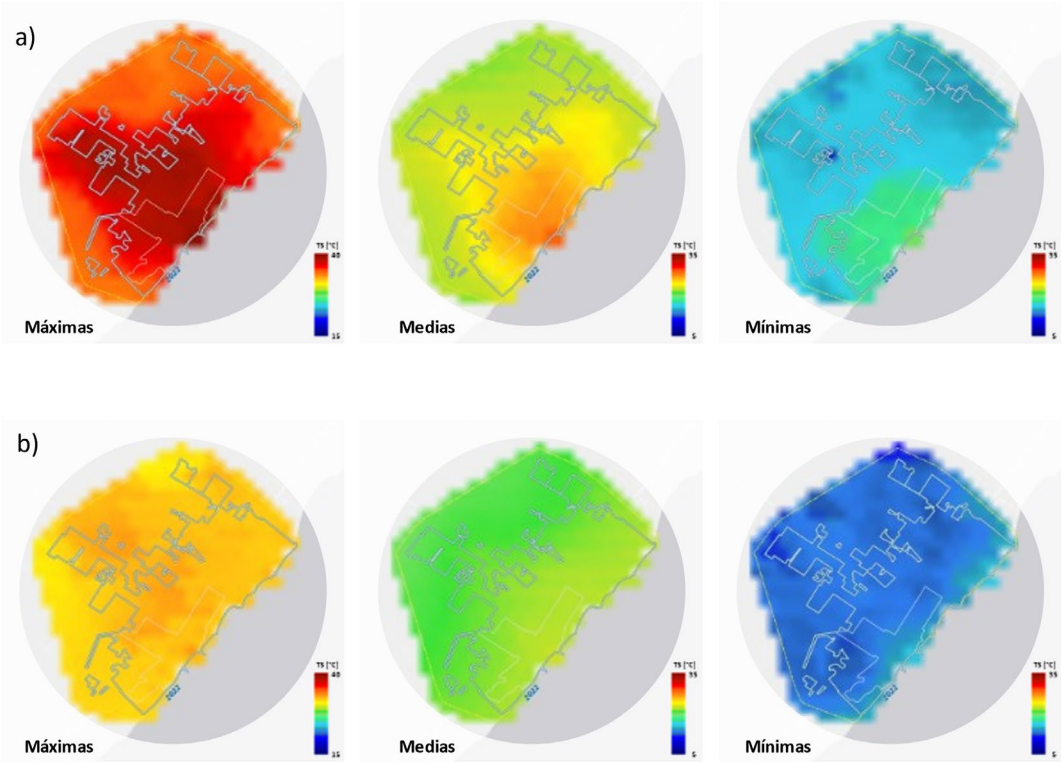
Fuente: Elaboración propia.

Al examinar los mapas de temperaturas promedio del 2023 se pueden identificar visualmente patrones en la distribución espacial de las variaciones de temperatura (máxima, media y mínima) diurna y nocturna entre las áreas urbanas y la periferia (ver Figura 5). En el caso de los valores diurnos, se aprecia un marcado gradiente descendente desde el centro hasta los limites externos de la traza urbana. Sin embargo, para la temperatura nocturna este gradiente tiende a disminuir notablemente su pendiente, lo que da como resultado variaciones más suaves entre el centro de la ciudad y la periferia donde se presenta vegetación conservada.

Para identificar y caracterizar aquellas TS diarias que pueden ser consideradas como eventos extremos, se analizó la distribución estacional de los valores de la temperatura diurna (ver Figura 6a), a partir de lo cual se identifica que los meses de marzo a septiembre son en los que se presentan valores que sobrepasan los umbrales de referencia (percentil 95 y 99). Con respecto a la relación entre las temperaturas medias diurnas y nocturnas, el análisis del diagrama de dispersión muestra que no existe significancia estadística dado que el valor R^2 de la regresión lineal devolvió valores del orden de 0.07 y 0.08 para las temperaturas máximas y mínimas, lo que sugiere que la

Figura 5

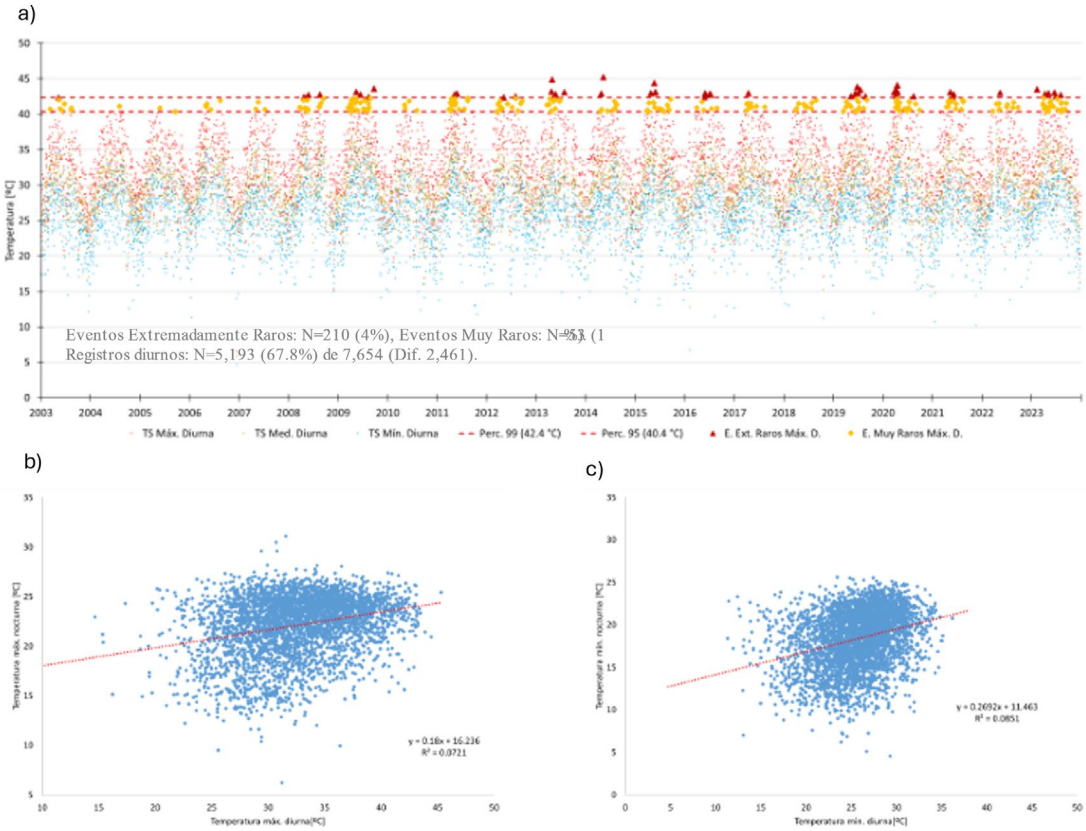
Distribución de las temperaturas promedio a) diurnas y b) nocturnas en Playa del Carmen para el 2023



Fuente: Elaboración propia con base a compuestos MODIS "MYD11A1.061" Aqua y el Marco Geoestadístico del INEGI (2022).

Figura 6

Distribución de las temperaturas diurnas para el periodo 2003-2023, a) máximas, medías y mínimas diurnas, b) diagrama de dispersión de temperaturas máximas diurnas vs. nocturnas, c) diagrama de dispersión de temperaturas mínimas diurnas vs. nocturnas



Fuente: Elaboración propia.

relación de los cambios térmicos entre el día y la noche no es homogénea dentro de la zona de estudio, sino que dichos cambios están en función de los usos de suelo y su cercanía a la costa (ver Figuras 6b y 6c).

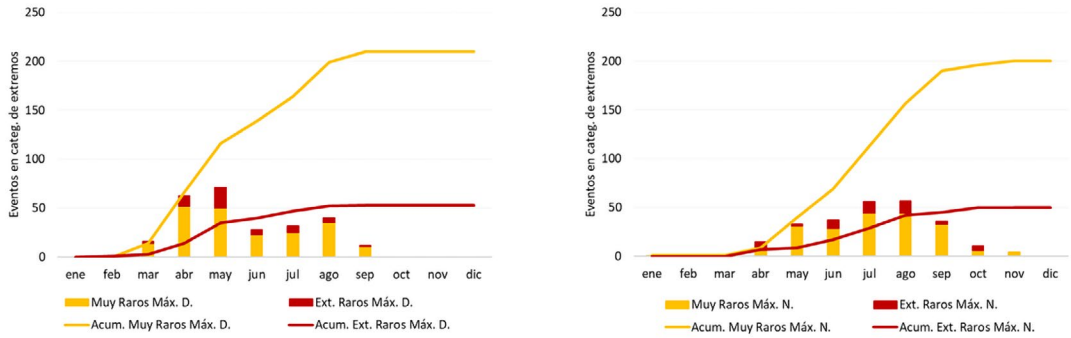
En el caso de las TS diurnas el 4 % (n=210) de los registros superaron el percentil 90 (muy raros) y el 1 % (n=53) el percentil 99 (extremadamente raros). En el caso de las TS nocturnas, los porcentajes de eventos que superan los umbrales de referencia son equivalentes a los diurnos, con valores de 4 % (n=200) por encima del percentil 90 y 1 % (n=50) sobre el percentil 99 (ver Figura 7).

Variaciones térmicas mensuales

Para conocer la distribución de las islas de calor dentro del polígono que conforma la ciudad de Playa del Carmen, se elaboraron compuestos mensuales para identificar los períodos en los que se presenta con mayor intensidad el fenómeno de ICUS. Los

Figura 7

Distribución temporal de los eventos extremos categorizados como muy raros y extremadamente raro en el periodo 2003-2023, a) diurnos, b) nocturnos.



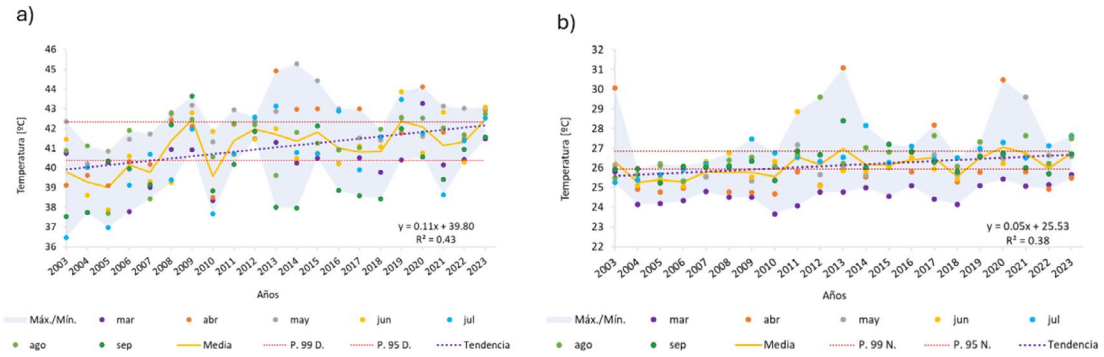
Fuente: Elaboración propia.

resultados del análisis muestran que las TS diurnas presentan sus máximas intensidades en los meses de abril y mayo, mientras que las TS nocturnas se presentan hacia los meses de julio y agosto (ver Figura 8).

Los resultados revelan que, en los últimos 20 años, se han presentado tres periodos en los cuales se registran temperaturas en categoría de extremos de forma continua: el primero corresponde a 2008 y 2009 (dos años), seguido por el del 2011 al 2017 (seis años), y el más reciente que comprende del 2019 al 2023 (cuatro años). Si bien en la década pasada se presentaron eventos que alcanzaron valores cercanos a los 45 °C, es en los años recientes cuando se han presentado la mayor cantidad de eventos que superan los umbrales de referencia.

Figura 8

Distribución de temperaturas máximas para los meses de marzo a septiembre en el periodo 2003-2023, a) diurnas, b) nocturnas



Fuente: Elaboración propia.

Caracterización de islas de calor urbanas superficiales

Distribución espacial de las islas de calor urbanas superficiales

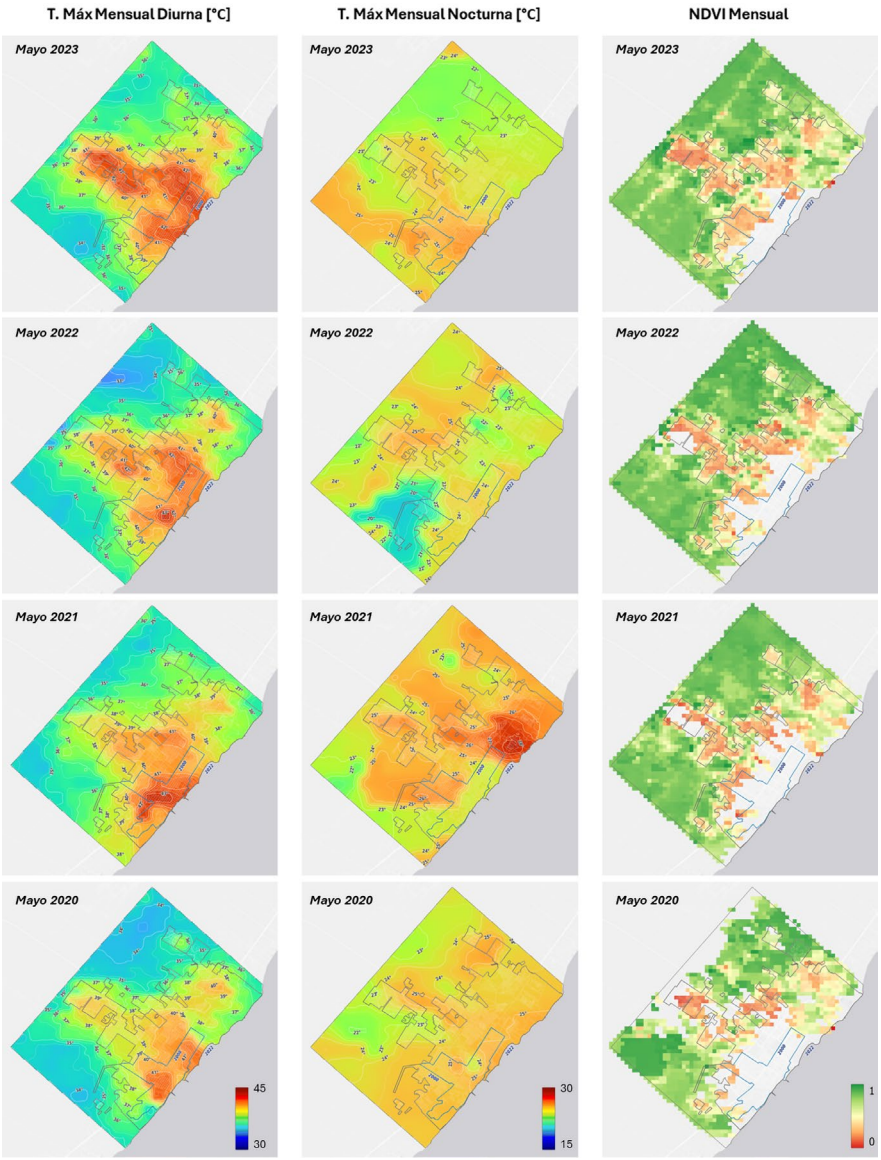
Para identificar la presencia y localización de ICUS en la ciudad de Playa del Carmen, se tomó como caso de estudio el mes de mayo de los años 2020 a 2023, dado que es el mes en que se registran con mayor frecuencia las temperaturas que sobrepasan los umbrales de referencia. Los mapas de distribución de las variaciones térmicas fueron generados a partir de los compuestos mensuales resultantes de la aplicación del modelo de re-escalamiento mediante el modelo Kriging. El proceso de re-escalamiento se realizó de manera individual para cada banda (temperaturas máximas, medias y mínimas, diurnas y nocturnas) que integran las imágenes de los meses de interés (n=24). En cada caso se generó el semivariograma para obtener los parámetros de configuración del modelo para obtener la máxima precisión y los menores errores. El promedio del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.033, con un valor máximo de 0.185, mientras que los valores promedio del coeficiente R^2 presentaron un promedio de 0.984, con un mínimo de 0.934, lo que les confiere una alta significancia estadística a los valores interpolados para cada caso. En la Figura 9 se presentan los compuestos mensuales con las temperaturas máximas diurnas y nocturnas.

Estimación de la intensidad de las islas de calor urbanas superficiales

Para estimar la intensidad del fenómeno de ICUS dentro de la zona de estudio, se establecieron ocho transectos que cubren perpendicularmente la traza urbana de la ciudad, a partir de los cuales se obtuvieron los perfiles de TS para el caso de los meses de mayo de los años 2020 a 2023. Los perfiles de temperatura permitieron estimar las IICUS en cada uno de ellos. Los resultados obtenidos muestran que el fenómeno se presenta principalmente durante el día y con mayor intensidad durante las temporadas de primavera y verano, ligeramente atenuado ante la presencia de ciclones tropicales y frentes fríos hacia los meses de otoño e invierno. También, se observó una relación directamente proporcional entre la elevación de los gradientes térmicos y la

Figura 9

Distribución de temperaturas máximas diurnas y nocturnas, e índice normalizado de vegetación (NDVI) para los meses de mayo de los años 2020 a 2023



Fuente: Elaboración propia.

falta o escasa cobertura de vegetación urbana. En la Figura 10 se presenta un ejemplo del comportamiento de los valores promedio máximos, medios y mínimos, tanto diurnos, como nocturnos, para cada transecto y su relación con los valores del NDVI y la traza urbana durante el mes de mayo de 2023.

Los hallazgos revelan que la IICUS presenta valores máximos promedio del orden de los 8.4 °C durante el día, y 5.7 °C durante la noche. Las diferencias térmicas diurnas se pueden asociar con la concentración de infraestructura urbana; es decir, los sitios más cercanos al centro fueron más calientes que aquellos que se encontraban fuera de la traza urbana. Por el contrario, en el caso de las temperaturas nocturnas, las diferencias de los valores entre sitios urbanos y la periferia fueron menores. El resumen con los resultados de la estimación de la IICU por mes/año y transecto se presenta en la Figura 11 y la Figura 12.

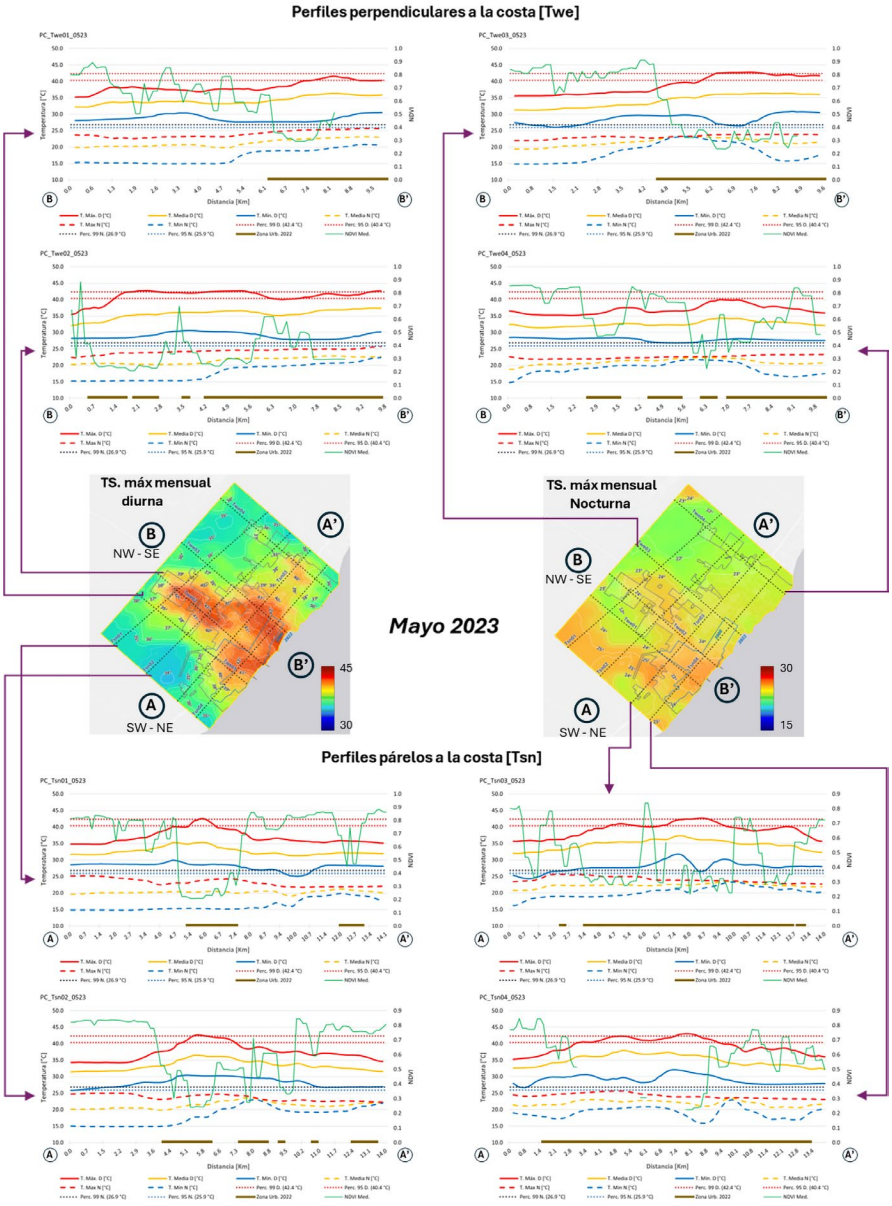
Discusión

Aunque los resultados del estudio realizado sobre la Intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial (IICUS) en Playa del Carmen no pueden considerarse como absolutos o definitivos debido a la variabilidad de los datos considerados, los valores de temperatura promedio obtenidos a través del análisis de las imágenes MODIS son consistentes con los publicados por la estación climatológica "23163-Playa del Carmen" de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la cual reporta valores mínimos y máximos promedio para el periodo 1998-2018 del orden de los 13.5 y 30.8 °C respectivamente, con valores máximos registrados de 40 °C en el mes de mayo de 2005 (SMN, 2020). Los datos analizados en el presente estudio para los meses de mayo de 2020 a 2023 muestran valores promedio mínimos y máximos de 32.7 °C y 25.6 °C durante el día, y 22.1 °C y 18.3 °C durante la noche.

La investigación revela diferencias significativas en las tasas de cambio térmico entre las zonas densamente urbanizadas y con escasa vegetación, y aquéllas localizadas hacia la periferia de la ciudad. Las zonas urbanas presentan una amplia diferencia en las variaciones mínimas y máximas entre el día y la noche, lo cual se puede atribuir a la configuración de los fraccionamientos y su cercanía con los límites de la traza urbana, en donde existe la presencia de selvas conservadas y donde la existencia

Figura 10

Distribución de temperaturas máximas por transectos, relacionadas con valores del NDVI y la traza urbana para el mes de mayo de 2023



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Intensidad de la ICUS por mes/año y transecto, a) diurnas, b) nocturnas

a)

	IICU Diurnas [°C] para mayo de:						
	2023	2022	2021	2020	*Máx.*	*Med.*	*Mín.*
Tsn-01	7.8	6.4	4.8	5.7	7.8	6.2	4.8
Tsn-02	8.4	7.8	5.7	5.0	8.4	6.7	5.0
Tsn-03	7.1	7.4	5.0	6.0	7.4	6.4	5.0
Tsn-04	7.8	7.5	7.1	6.4	7.8	7.2	6.4
Twe-01	6.4	7.5	8.0	7.3	8.0	7.3	6.4
Twe-02	7.2	7.4	7.2	5.5	7.4	6.8	5.5
Twe-03	7.2	8.2	7.0	6.4	8.2	7.2	6.4
Twe-04	4.8	6.0	4.5	4.9	6.0	5.0	4.5
Máx.	8.4	8.2	8.0	7.3	8.4		
Med.	7.1	7.3	6.2	5.9		6.6	
Mín.	4.8	6.0	4.5	4.9			4.5

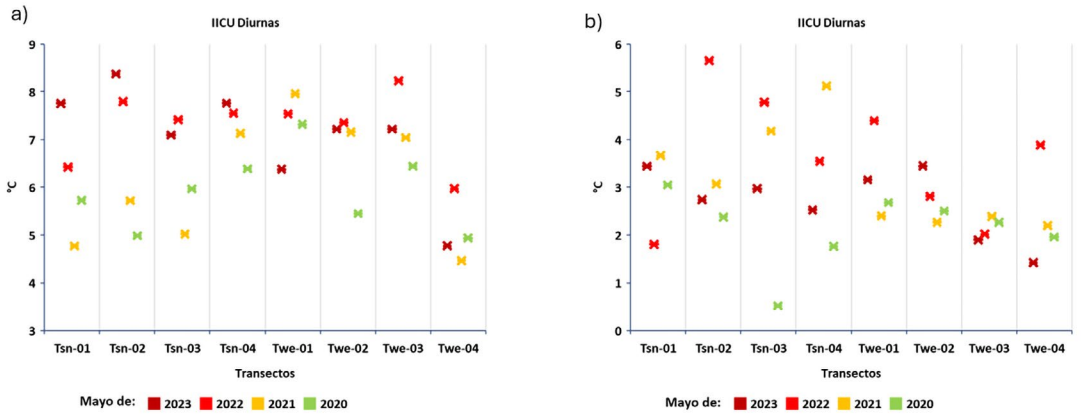
b)

	IICU Nocturnas [°C] para mayo de:						
	2023	2022	2021	2020	*Máx.*	*Med.*	*Mín.*
Tsn-01	3.4	1.8	3.7	3.0	3.7	3.0	1.8
Tsn-02	2.7	5.7	3.1	2.4	5.7	3.5	2.4
Tsn-03	3.0	4.8	4.2	0.5	4.8	3.1	0.5
Tsn-04	2.5	3.5	5.1	1.8	5.1	3.2	1.8
Twe-01	3.2	4.4	2.4	2.7	4.4	3.2	2.4
Twe-02	3.4	2.8	2.3	2.5	3.4	2.8	2.3
Twe-03	1.9	2.0	2.4	2.3	2.4	2.1	1.9
Twe-04	1.4	3.9	2.2	2.0	3.9	2.4	1.4
Máx	3.4	5.7	5.1	3.0	5.7		
Med.	2.7	3.6	3.2	2.1		2.9	
Mín	1.4	1.8	2.2	0.5			0.5

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12

Distribución de la intensidad de la ICUS por mes/año y transecto, a) diurnas, b) nocturnas



Fuente: Elaboración propia.

de cobertura arbórea urbana tiende a anular los efectos de las construcciones y la impermeabilización del suelo, como lo reportan en sus estudios Stewart *et al*. (2014). Se identificó la presencia del fenómeno de la ICUS principalmente durante el día, con diferencias de temperatura promedio de alrededor de 7 °C, mientras que por la noche el promedio es de alrededor de 4 °C, lo cual puede asociarse a la influencia de los vientos provenientes del océano, como lo confirman los estudios publicados por Salvati *et al*. (2017) y Saaroni *et al*. (2000), quienes identifican que el efecto de la brisa marina tiende a disminuir las amplitudes térmicas (Tmax–Tmin).

Las temporadas de primavera y verano presentaron los mayores valores de intensidad de la ICUS, lo cual está corroborado por el análisis del comportamiento de las variaciones térmicas en los meses de mayo donde se obtuvieron resultados sobre la IICUS diurna, la cual se estimó en 6.6 °C en promedio, con una máxima de 8.4 °C. Aunque no se encontraron estudios en ciudades costeras similares a Playa del Carmen en la península de Yucatán, nuestros hallazgos son congruentes con los reportados por diversos investigadores, considerando las características propias de cada una de las ciudades analizadas. Ejemplo de lo anterior son los resultados publicados por Soto Estrada (2019) en la ciudad de Medellín, Colombia, quien reporta valores de IIC entre 3.41 y 6.23 °C; Alomar Garau y Llop Garau (2018) para la ciudad de Palma, Mallorca, con IIC en el orden de 1.4 y 5.8 °C; Contreras Cardosa *et al*. (2015), con valores de IIC diurnos promedio de 6 °C para Ciudad Juárez, Chihuahua; Manzanilla Quiñones (2022), quien reporta para la ciudad de Monterrey, Nuevo León IICUS de hasta +8.9 °C; Henríquez Ruiz *et al*. (2021) para las ciudades chilenas con IICUS en categoría de fuertes, oscilan entre los 4.1 °C y 10.5 °C.

En Playa del Carmen, las zonas con las mayores temperaturas diurnas son el centro de la ciudad y los nuevos fraccionamientos construidos hacia la zona poniente de la ciudad. Estos lugares tienen escasas o nulas superficies de vegetación nativa y el arbolado urbano es incipiente para las extensiones de los desarrollos y la densidad de población proyectada. Esto es consistente con el estudio del arbolado urbano de Playa del Carmen, en el cual se indica que la ciudad tiene una superficie total de arbolado competitiva, aunque mal distribuida y en riesgo debido al creciente desarrollo de unidades y fraccionamientos habitacionales (De la Concha y Reynoso, 2017). El estudio revela que las zonas habitacionales de interés social y de menores recursos, las cuales también presentan la mayor densidad de población y pocas áreas de arbolado

urbano y parques públicos, son las que registran los mayores valores de Intensidad de la Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) diurna. Las políticas públicas en Playa del Carmen han estado orientadas hacia el crecimiento económico, lo que ha llevado a importantes desaciertos de planificación y control en los modelos de desarrollo urbano. Los hallazgos del estudio sugieren la necesidad de renovar las políticas de construcción con un enfoque más sensible al medio ambiente y una revalorización del patrimonio natural para mejorar su calidad y procurar un mayor bienestar social a largo plazo.

Los resultados del estudio coinciden con la necesidad de atender las observaciones y recomendaciones propuestas por Pérez de la Fuente, Hoil Villalobos y Moce Yac Cuxtal (2021) en su reporte "Estrategia de arborización y restauración ecológica frente a impactos de desarrollos habitacionales en la Ciudad Playa del Carmen, Solidaridad, Quintana Roo, México", donde destacan la necesidad de promover modificaciones en el reglamento de construcción y el programa de desarrollo urbano y medioambiental de la ciudad con los siguientes objetivos:

- Aumentar las áreas verdes dentro de los fraccionamientos existentes y por desarrollar.
- Diseñar y poner en marcha programas de conservación, protección y restauración del arbolado urbano, especialmente en las colonias que presentan las máximas diferencias térmicas y que se asocian al fenómeno de islas de calor.
- Diseñar y poner en marcha programas para la plantación de arbolado urbano en áreas descubiertas y en zonas de estacionamientos, considerando la inclusión de especies endémicas de la región.
- Implementar estrategias de arborización y restauración ecológica que garanticen la conectividad estructural y funcional a través de corredores biológicos y aportes a la biodiversidad, contribuyendo principalmente a la mejora de la calidad ambiental del entorno urbano y, por ende, de sus habitantes.

Conclusiones

A través de la metodología utilizada en el presente estudio se pudo identificar la ocurrencia del fenómeno de ICUS y estimar la IICUS dentro de la zona urbana de la ciudad de Playa del Carmen. La plataforma Google Earth Engine resultó ser una herramienta útil y eficaz para llevar a cabo estudios de carácter regional y local que requieren del análisis de grandes volúmenes de imágenes satelitales y la implementación de modelos robustos de análisis espacial a través de la generación de algoritmos basados en los lenguajes computacionales *Java Script* y *Phyton*, ofreciendo tiempos de proceso muy por debajo de los que se requerirían utilizando equipos de cómputo domésticos.

La presencia de ICUS encuentra alta coincidencia espacial con las áreas más densamente pobladas, de tal forma que éstas se configuran a partir de tres vértices principales ubicados en los fraccionamientos Villas del Sol, Guadalupana y la colonia Colosio (ver Figura 4). La IICUS máxima se presenta en el mes de mayo, con valores del orden de los 8.5 °C en horarios diurnos, mientras que en los horarios nocturnos se registró una variación máxima aproximada de 5.7 °C. Se identificó que las diferencias entre los valores promedio de temperatura diurnos y nocturnos en cada uno de los transectos analizados presentaron oscilaciones mayores en las zonas urbanas con respecto de las zonas periféricas con vegetación conservada. La tendencia de los procesos de deforestación y de cambio en la cobertura y uso del suelo en Playa del Carmen revela un panorama desalentador. La continua fragmentación de hábitats, y la pérdida y degradación de la vegetación natural desencadenan efectos negativos sobre los sistemas socioecológicos que son difíciles de revertir, comprometiendo los servicios ecosistémicos de los cuales depende la población de la región. Los esfuerzos para enverdecer la ciudad están presentes en informes gubernamentales; sin embargo, éstos no se orientan a alcanzar, en un mediano o largo plazo, un determinado aumento de la cobertura del dosel arbóreo o "bosque urbano". Para ello, es necesario proveer a los tomadores de decisiones y a los encargados de implementar las políticas públicas ambientales y urbanas con información y herramientas para la gestión.

El deterioro de la cobertura arbórea y áreas verdes dentro del polígono que conforma la traza urbana se observa claramente a partir del análisis de las imágenes del NDVI, en las cuales se puede apreciar la relación directamente proporcional entre la perdida de actividad fotosintética y el crecimiento de la ciudad (situación ampliamente

reportada en la literatura científica). Ante este panorama, se requiere la construcción de una estrategia conjunta y sostenida, gobierno-comunidad, para la planificación territorial urbana y la conservación y restauración ecológica de la ciudad que garantice el incremento de la resiliencia local mediante la integración del enfoque de "Adaptación Basada en Ecosistemas" ante el cambio climático con la participación social. Si estos esfuerzos se conjuntan, se pueden encontrar las medidas de mitigación pertinentes que garanticen el bienestar y calidad ambiental de la ciudad en beneficio de sus habitantes y del turismo del cual depende, en gran medida, la economía de la región.

Este estudio provee información útil para definir áreas de atención prioritaria en las cuales se puedan implementar estrategias de mitigación y adaptación que permitan contrarrestar los efectos de las islas de calor, como monitoreo *in situ* de las condiciones climáticas locales, particularmente considerando parámetros como la dirección y velocidad de los vientos, así como el registro en tierra de las temperaturas diurnas y nocturnas. Es recomendable analizar, además de las temperaturas, los valores de velocidad y dirección del viento para identificar la circulación local de las zonas costeras y su potencial para el amortiguamiento de la isla de calor, considerar el inventario de arbolado urbano, e implementar un programa de monitoreo continuo *in situ* a través de la instalación de instrumentos de medición de las condiciones del tiempo atmosférico, principalmente en las colonias que presentaron condiciones para ser consideradas como zonas de atención prioritaria.

Referencias bibliográficas

Alomar garau, Gabriel; Llop Garau, Juan. (2018). "La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea". *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *78*, 392–418. https://doi.org/10.21138/bage.2404

Angeles Suazo, Julio Miguel; AngelesVasques, Roberto J.; Flores Rojas, José Luis; Abi Karam, Hugo. (2019). "Estimación De Isla De Calor Urbana Superficial En El Area Metropolitana De Iquitos/Peru". *Anuário do Instituto de Geociências*, *42*(1), 135-145. https://dx.doi.org/10.11137/2019_1_135_145

Anniballe, Roberta; Bonafoni, Stefania; Pichierri, Manuele. (2014). "Spatial and temporal trends of the surface and air heat island over Milan using MODIS data". *Remote Sensing of Environment*, *150*, 163–171. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.005

Araiza Olivares, Gabriel Alexis. (2022). "La isla de calor en la Ciudad de México: Un análisis decadal (1950-2010)". *Revista Geográfica de América Central*, *2*(69), 415–436. https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.15

Ballinas, Mónica; Barradas, Víctor L. (2016). "The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model". *Journal of Environmental Quality*, *45*(1), 157–166. https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056

Barrera Alarcón, Itzia Gabriela; Caudillo Cos, Camilo Alberto; Medina Fernández, Sandra Lizbeth; Ávila Jiménez, Felipe Gerardo; Montejano Escamilla, Jorge Alberto. (2022). "La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México". *Revista de Ciencias Tecnológicas*, *5*(3), 312–330. https://doi.org/10.37636/recit.v53312330

Canul Turriza, Román Alejandro; Aké Turriza, Karianna; May Tzuc, Oscar; Jiménez Torres, Mario. (2024). "Análisis espaciotemporal de islas de calor aplicado en la ciudad costera de San Francisco de Campeche, México". *Revista Urbano*, *27*(49), 08–23. https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.49.01

Casadei, Paula; Semmartin, María; Garbulsky, Martín F. (2021). "Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina". *Ecología Austral*, *31*(1), 190–203. https://doi.org/10.25260/ea.21.31.1.0.970

Contreras Cardosa, Alfredo; Salas Plata Mendoza, Jorge Arturo; Velásquez Angulo, Gilberto; Quevedo Urías, Héctor. (2015). "Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo". *Cultura Científica y Tecnológica*, (26), 3-16. https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/393

De la Concha, Horacio; Reynoso, Rafael. (2017). *Resultados del inventario urbano de Playa del Carmen, Q. Roo realizado de noviembre 2016 a abril 2017*. Agrinet; Plantamex. https://www.agrinet.mx/images/agrinet/archivos/InventarioPlayaDelCarmen.pdf

Décamps, Henri. (2008). "Ecosystems and extreme climatic events". *Comptes Rendus Geoscience*, (340), 553–563. https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.004

Didan, Kamel. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061*. NASA. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061

Environmental Protection Agency. (2014). *Keeping Your Cool: How Communities Can Reduce the Heat Island Effect*. EPA. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/documents/heat_island_4-page_brochure_508_120413.pdf

Flores de la O., Jesthly Leticia; Villanueva Solis, Jorge; Quiroa Herrera, Jaime Andrés. (2018). "Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México". *Revista de Ciencias Ambientales*, *52*(2). https://doi.org/10.15359/rca.52-2.7

García Cueto, O. Rafael; Jáuregui Ostos, Ernesto; Toudert, Djamel; Tejeda Martínez, Adalberto. (2007). "Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use". *Atmósfera*, *20*(2), 111–131. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-62362007000200001&script=sci_abstract&tlng=pt

Giraldo, Ana; Mustafa, Sara; Casallas, Alejandro; Quirama, Miguel. (2022). "Análisis de los Islotes de Calor Intra Urbanos en Bogotá, Colombia". (Tesis de licenciatura, Universidad Sergio Arboleda). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27865.19044

Godoy Uribe, Gustavo M. (2017). "Modelo de la Isla de Calor Atmosférico y Superficial: Factores en común y alternativas para la mitigación de su efecto en salud

humana y medioambiente urbano. Factores claves y limitantes." *Dinamica de Sistemas*, (1). https://doi.org/10.13140/2.1.1761.6646

Gorelick, Noel; Hancher, Matt; Dixon, Mike; Ilyushchenko, Simon; Thau, David; Moore, Rebecca. (2017). "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone". *Remote Sensing of Environment*, *202*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Henríquez Ruiz, Cristian; Smith, Pamela; Contreras, Paulina; Qüense, Jorge. (2021). "Variación en la intensidad de la isla de calor urbana por efecto del cambio climático en ciudades chilenas". *Geographicalia*, (73), 133–154. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2021735114

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). *Marco geoestadístico municipal 2000*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2005). *Marco geoestadístico municipal 2005 versión 1.0*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Marco geoestadístico 2010 versión 5.0.A*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1: 250,000: Serie V*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/usosuelo/metadatos/guia_interusosuelov.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2016). *Marco geoestadístico 2016*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807469

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Marco Geoestadístico 2022*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Subsistema de Información Demográfica y Social. Censos y conteos de población y vivienda*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jauregui, Ernesto. (1997). "Heat Island Development in Mexico City". *Atmospheric Environment*,*31*(22),3821–3831.https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2

Jauregui, Ernesto; Godinez, María Laura.; Villicaña, Francisco Javier. (1992). "Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico". *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, *26*(3), 391–396. https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90014-J

Jáuregui, Ernesto; Luyando, Elda. (1998). "Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City". *Atmósfera*, *11*(1), 45–60. https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8425

Jin, Menglin; Dickinson, Robert E; Zhang, Da. (2005). "The Footprint of Urban Areas on Global Climate as Characterized by MODIS". *Journal of Climate*, *18*(10), 1551–1565. https://doi.org/10.1175/JCLI3334.1

Kwofie, Samuel; Nyamekye, Clement; Appiah Boamah, Linda; Owusu Adjei, Frank; Arthur, Richard; Agyapong, Emmanuel. (2022). "Urban growth nexus to land surface temperature in Ghana". *Cogent Engineering*, *9*(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143045

Landsberg, Helmut E. (Ed.). (1981). *The Urban Climate*. Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60180-1

Li, Shenglin; Wang, Jinglei; Li, Dacheng; Ran, Zhongxin;Yang, Bo. (2021). "Evaluation of landsat 8-like land surface temperature by fusing landsat 8 and modis land surface temperature product". *Processes*, *9*(12), 1–19. https://doi.org/10.3390/pr9122262

Liu, Lin; Zhang, Yuanzhi. (2011). "Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong". *Remote Sensing*, *3*(7), 1535–1552. https://doi.org/10.3390/rs3071535

Manzanilla Quiñones, Ulises. (2022). "Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México". *Desde el Herbario CICY*, *14*(1), 179–186. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2022/2022-09-01-Manzanilla_Ulises-Islas-de-calor.pdf

Manzanilla Quiñones, Ulises. (2023). "Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *10*(1). https://doi.org/10.19136/era.a10n1.3495

Méndez González, Jorge; Návar Chaídez, José de Jesús; González Ontiveros, Vladimir. (2009). "Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México". *Investigaciones Geograficas*, (65), 38–55.

Moradi, Ayoub; Homayouni, Saeid. (2023, 3–5 de julio). "Land Surface Temperature Monitoring in Urban Areas Using MODIS and Landsat Data Fusion" [Presentación en congreso]. *10th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Quebéc, Canadá. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/368254790_LAND_SURFACE_TEMPERATURE_MONITORING_IN_URBAN_AREAS_USING_MODIS_AND_LANDSAT_DATA_FUSION

Moreira, Janaína; Amorim, Margarete; García, Felipe. (2019). "Análisis de la intensidad y evolución horaria de las islas de calor y seca en ambiente tropical, Brasil". *GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, (17), 151–178. https://doi.org/10.17127/got/2019.17.007

Moreno Garcia, M. Carmen. (1994). "Intensity and form of the urban heat island in Barcelona". *International Journal of Climatology*, *14*(6), 705–710. https://doi.org/10.1002/joc.3370140609

Mukherjee, Sandip; Kumar Joshi, Pawan; Dev Garg, Rahul. (2015). "Regression-Kriging Technique to Downscale Satellite-Derived Land Surface Temperature in Heterogeneous Agricultural Landscape". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *8*(3), 1245–1250. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2396032

Ochoa Jiménez, Carlos Francisco; Camacho Sanabria, José Manuel; Chávez Alvarado, Rosalía; Juan Pérez, José Isabel; Fragoso Servón, Patricia. (2020). "Expansión urbana y cambios de cobertura/uso del suelo en Playa del Carmen, Quintana Roo, México (1985-2015)". *Geografía y Sistemas de*

Información Geográfica (GEOSIG), (18), 1–18. https://revistageosig.wixsite.com/geosig/geosig-18-2020

Oke, Timothy R. (1973). "City size and the urban heat island". *Atmospheric Environment (1967)*, *7*(8), 769–779. https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6

Oke, Timothy R. (1995). "The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects". En Jack.E Cermak, Alan G. Davenport, Erich J. Plate, y Domingos X.Viegas (Eds.), *Wind Climate in Cities* (NATO Science Series E.) (Vol. 277)(pp. 81–107). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5

Oke, Timothy R. (2002). *Boundary Layer Climates* (2da. Ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203407219

Orellana Lanza, Roger. (1999). "Climatología de la Península de Yucatán 1961-1993". En *Atlas de procesos territoriales de Yucatán* (pp. 163–192). Universidad Autónoma de Yucatán.

Orellana Lanza, Roger; Espadas Manrique, Celene; Conde, Cecilia; Gay García, Carlos. (2009). *Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán* (1ra Ed.). A. C. Centro de Investigación Científica de Yucatán; CICY; UNAM; CONACyT (FOMIX: Fondo Mixto CONACyT-Gobierno del Estado de Yucatán); SEDUMA-Gobierno del Estado de Yucatán; SIDETEY; ONU-PNUD. http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/

Paravantis, John; Santamouris, Mat; Cartalis, Constantinos; Efthymiou, Chrysanthi and Kontoulis, Nikoletta. (2017). "Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece". *Sustainability*, *9*(4), 606. https://doi.org/10.3390/su9040606

Pérez de la Fuente, Gladys; Hoil Villalobos, Dalia Luz; Moce Yac Cuxtal, A.C. (2021). *Estrategia de arborización y restauración ecológica frente a impactos de desarrollos habitacionales en la Ciudad Playa del Carmen, Solidaridad, Quintana Roo, México* [Informe inédito]. Archivo físico de la Dirección de Medio Ambiente del H. Ayuntamiento del Municipio de Solidaridad, Quintana Roo, México.

PNUD México; INECC. (2018). *Vulnerabilidad actual y futura de los recursos hídricos ante el cambio climático en los estados del sureste de México, con enfoque en el desarrollo urbano sustentable*. Proyecto 86487. "Plataforma de Colaboración sobre Cambio Climático y Crecimiento Verde entre Canadá y

México". Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad en el Sureste, A.C., México. http://140.84.163.2:8080/xmlui/handle/publicaciones/281

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente; H. Ayuntamiento del Municipio de Solidaridad; Planeta Limpio, A. C. (2008). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Playa del Carmen* (1ra Ed.). PNUMA.

Qaid, Adeb; Bin Lamit, Hussanudin; Remaz Ossen, Dilshan; Raja Shahminan, Raja Nafida. (2016). "Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city". *Energy and Buildings*, *133*, 577–595. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.006

QGIS Development Team. (2022). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. https://qgis.org/

Reyes Escobedo, Maritza y Aguiluz León, Jesús. (2023). "Factores de influencia para formación de islas de calor en la Zona Metropolitana de Querétaro". *Legado de Arquitectura y Diseño*, *18*(33), 7.

Romero, H.; Sarricolea, P. (2006). "Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor urbanas de superficie". En José María Cuadrat Prats, Miguel Ángel Saz Sánchez, Sergio. M. Vicente Serrano, Siham Lanjeri, Martín de Luis Arrillaga y José Carlos González Hidalgo (Eds.), *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). https://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0074_PU-SA-V-2006-H_ROMERO.pdf

Saaroni, Hadas; Ben Dor, Eyal; Bitan, Arieh; Potchter, Oded. (2000). "Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel". *Landscape and Urban Planning*, *48*(1–2), 1–18. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00075-4

Salvati, Agnese; Coch Roura, Helena; Cecere, Carlo. (2017). "Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study". *Energy and Buildings*, *146*, 38–54. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025

Sánchez Rivera, Gabriel, Gómez Mendoza, Leticia; Pérez de la Fuente, Gladys. (2024). "Islas de calor y uso de suelo en Playa del Carmen, Quintana Roo, México". En Lemoine Rodríguez, Richard Pérez Vega, Azucena Mas, Jean François (Coords.), *Avances en el estudio de islas de calor urbano en América*

Latina (1ra Ed.) (pp. 83–111). UNAM; Universidad de Guanajuato. https://www.researchgate.net/publication/383425054_Islas_de_calor_y_uso_de_suelo_en_Playa_del_Carmen_Quintana_Roo_Mexico

Servicio Meteorológico Nacional. (2020). *Normales Climatológicas por Estado*. SMN. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado

Servicio Meteorológico Nacional. (2023). *Reporte Anual del Clima 2023*. SMN. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reporte-del-clima-en-mexico

Soto Estrada, Engelberth. (2019). "Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia". *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *35*(2), 421–434. https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.13

Stewart, Iain D.; Oke, T. R.; Krayenhoff, E. Scott. (2014). "Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations". *International Journal of Climatology*, *34*(4), 1062–1080. https://doi.org/10.1002/joc.3746

Thanvisitthpon, Nawhath. (2023). "Statistically Validated Urban Heat Island Risk Indicators for UHI Susceptibility Assessment". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(2), 1172. https://doi.org/10.3390/ijerph20021172

Trejos S., Isaac Ernesto; Perén, Jorge Isaac. (2020). "Evaluación de la Isla de Calor Urbano (ICU) y de la Calidad Urbana de un Espacio Residual en Ciudad de Panamá: Viaducto 3 de Noviembre." ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/347930125_Evaluacion_de_la_Isla_de_Calor_Urbano_ICU_y_de_la_Calidad_Urbana_de_un_Espacio_Residual_en_Ciudad_de_Panama_Viaducto_3_de_Noviembre_Evaluation_of_the_Urban_Heat_Island_UHI_and_the_Urban_Quality_of_a_R

Varentsov, Mikhail; Esau, Igor; Wolf, Tobias. (2020). "High-resolution temperature mapping by geostatistical kriging with external drift from large-eddy simulations". *Monthly Weather Review*, *148*(3), 1029–1048. https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0196.1

Vidal Zepeda, Rosalia. (2005). *Las regiones climáticas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/42

Villanueva Solis, Jorge. (2017). "Urban Heat Island Mitigation and Urban Planning: The Case of the Mexicali, B. C. Mexico". *American Journal of Climate Change*, *6*(1), 22–39. https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61002

Villanueva Solís, Jorge; Torres Pérez, Maria Elena. (2023). "Isla de calor y su intensificación en la vivienda periférica de Mérida". *Hatso Hnini. Revista de Investigación de Paisajes y Espacio Construido*, *1*(3), 1–13.

Voogt, J. A.; Oke, T. R. (2003). "Thermal remote sensing of urban climates". *Remote Sensing of Environment*, *86*(3), 370–384. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8

Wan, Z. ; Hook, S.; Hulley, G. (2021). *MYD11A1 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061* [Data set]. NASA. https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A1.061

Willam Pereira, Gustavo; Magalhães Valente, Domingos Sárvio; Marçal de Queiroz, Daniel; De Freitas Coelho, André Luiz; Marques Costa, Marcelo; Grift, Tony. (2022). "Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging". *Agronomy*, *12*(6). https://doi.org/10.3390/agronomy12061350

Wong, Kaufui V.; Paddon, Andrew; Jimenez, Alfredo. (2013). "Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality". *Journal of Energy Resources Technology*, *135*(2), 1–12. https://doi.org/10.1115/1.4023176

World Meteorological Organization. (2018). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Final Version*. WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/58396

Yang, J. S. ; Wang, Q.; August, P. V. (2004). "Estimation of Land Surface Temperature Using Spatial Interpolation and Satellite-Derived Surface Emissivity". *Journal of Environmental Informatics*, *4*(1), 40–47. https://doi.org/10.3808/jei.200400035

Zavaleta Palacios, Mariana; Díaz Nigenda, Emmanuel; Vázquez Morales, Williams; Morales Iglesias, Horacio; Narcizo de Lima, Gabriela. (2020). "Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas". *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *7*(2), e2485. https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485

Zermeño Díaz, David Maximiliano; Gómez Mendoza, Leticia; Acuña Soto, Rodolfo. (2020). "Mortalidad por influenza y neumonía en la Macrorregión del Centro de México: un análisis de sus tendencias y su distribución geográfico-climática". *Tlalli. Revista de Investigación en Geografía*, (3), 97–119. https://doi.org/10.22201/ffyl.26832275e.2020.3.1096

Zermeño Díaz, David Maximiliano; Gómez Mendoza, Leticia; Acuña Soto, Rodolfo. (2021). "Patrones espacio-temporales de mortalidad por frío excesivo en México". *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, *23*(1), 73. https://www.redalyc.org/journal/401/40167332004/html/