

Distribución de la temperatura superficial urbana durante la temporada de máximas temperaturas del 2016-2023 en Chetumal, México

Padilla-Manrique Y.G.

Pereira-Corona A.

División de Desarrollo Sustentable,
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Mexico

García-Fajardo B.

Facultad de Planeación Urbana y Regional,
Universidad Autónoma del Estado de México

Approved: 08 March 2026

Posted: 10 March 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Padilla-Manrique, Y.G., Pereira-Corona, A. & García-Fajardo, B. (2026). *Distribución de la temperatura superficial urbana durante la temporada de máximas temperaturas del 2016-2023 en Chetumal, México*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.3.2026.p158>

Resumen

Esta investigación tiene como objeto analizar la distribución espacial de la temperatura superficial en la ciudad de Chetumal, México durante el periodo de máximas temperaturas (mayo a septiembre) para los años 2016, 2019 y 2023. Se calculó la Temperatura Superficial de la Tierra (LST), de intensidad y anomalías térmicas. Los resultados muestran que Chetumal tiene una temperatura superficial que oscila entre los 25.4°C y 34.5°C, la intensidad de la temperatura superficial promedio es de 5.4°C, con anomalías térmicas que presentan entre -3.4 y 2.5 desviaciones estándar. La distribución de LST, intensidad y anomalías son congruentes entre sí, con identificando tres puntos principales de acumulación de temperatura, caracterizados por ser espacios abiertos cubiertos de asfalto, sin rugosidad y baja cobertura vegetal, las áreas con mayor densidad de vegetación al interior o periferia de la ciudad presentan temperaturas entre 6°-8°C más frescas en comparación con los máximos térmicos, también se observa un borde “fresco” en los límites de la ciudad próximos al cuerpo de agua de la Bahía. Se concluye que elementos como la vegetación o la proximidad a cuerpos de agua intervienen significativamente en la distribución de la temperatura

superficial urbana.

Palabras clave: Temperatura de la superficie de la Tierra (LST), clima urbano, intensidad, anomalías, Bahía de Chetumal

Distribution of Urban Surface Temperature During the Maximum Temperature Season of 2016-2023 in Chetumal, Mexico

Padilla-Manrique Y.G.

Pereira-Corona A.

División de Desarrollo Sustentable,
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Mexico

García-Fajardo B.

Facultad de Planeación Urbana y Regional,
Universidad Autónoma del Estado de México

Abstract

This research aims to analyze the spatial distribution of surface temperature in the city of Chetumal, Mexico during the period of maximum temperatures (May to September) for the years 2016, 2019 and 2023. The Earth's Surface Temperature (LST) was calculated, intensity and thermal anomalies. The results show that Chetumal has a surface temperature that ranges between 25.4°C and 34.5°C, the intensity of the average surface temperature is 5.4°C, with thermal anomalies that present between -3.4 and 2.5 standard deviations. The distribution of LST, intensity and anomalies are congruent with each other, identifying three main points of temperature accumulation, characterized by being open spaces covered with asphalt, without roughness and low vegetation cover, the areas with the highest density of vegetation in the interior or periphery of the city have temperatures between 6°-8°C cooler compared to the thermal maximums; a “cool” edge is also observed in the limits of the city close to the body of water of the Bay. It is concluded that elements such as vegetation or proximity to bodies of water significantly intervene in the distribution of urban surface temperature.

Keywords: LST, urban climate, intensity, anomalies, Chetumal Bay

Introduction

La transformación del espacio natural derivado del proceso de urbanización modifica la superficie y con ello las propiedades atmosféricas de una región causando cambios en los ciclos naturales (Kousis et al., 2021; Oke, 2002). Las alteraciones de los patrones climáticos producen condiciones ambientales específicas de forma local que determinan el “microclima urbano” (Sosa et al., 2020), los factores que contribuyen a estas condiciones se agrupan en tres categorías principales: factores geométricos, meteorológicos y de diseño urbano (Shafaghat et al., 2016), que a su vez integran elementos como los tipos de materiales de construcción, la geometría, la configuración de las calles, la densidad de los edificios, la rugosidad entre otros. Consecuencia se reduce la velocidad del viento causada por los distintos obstáculos del sistema urbano, se incrementa la concentración de contaminantes derivado del aumento de emisiones, la humedad relativa disminuye por la reducción de áreas de absorción, y la temperatura promedio es mayor resultado de la retención del calor (Landsberg, 1981; Oke, 1981; Stache et al., 2022).

Por lo anterior las ciudades suelen experimentar temperaturas superficiales o atmosféricas más altas en comparación con áreas rurales circundantes (Oke, 1982). La causa detrás de la acumulación del calor es multifactorial, comenzando por las condiciones climáticas locales y regionales e incluyendo la capacidad de retención de calor de los diferentes materiales empleados para construcción, la falta de áreas verdes, el calor producido derivado de las actividades antropogénicas como los sistemas de aire acondicionado o las emisiones de actividades industriales (Ningrum, 2018; Vásquez-Álvarez et al., 2022), estos factores determinan el comportamiento espacio temporal del fenómeno que se analiza de forma atmosférica como superficial (Zhou et al., 2019). El calor adicional que representa se considera positivo o negativo dependiendo del clima regional, en lugares con climas o temporadas frías la manifestación de la temperatura urbana supone una disminución del consumo energético, sin embargo, en ciudades con temperaturas cálidas aumenta la demanda de energía e impacta negativamente en el confort térmico (Stewart & Oke, 2012; Taha, 1997), que aunado a los periodos de olas de calor estas condiciones negativas se ven exacerbadas (Yadav et al., 2023).

Para hacer frente a esta situación la tendencia en las investigaciones se han enfocado a explorar las diferentes acciones de mitigación de calor y de adaptación urbana, a través de la implementación de techos fríos y techos verdes (Li et al., 2014; Santamouris, 2014), la utilización de otros tipos de materiales que incrementen el efecto de albedo (Wang et al., 2022), la incorporación de vegetación ambiente urbano (Hwang et al., 2023; Stache et al., 2022; Tyrväinen et al., 2005), el empleo de cuerpos de agua

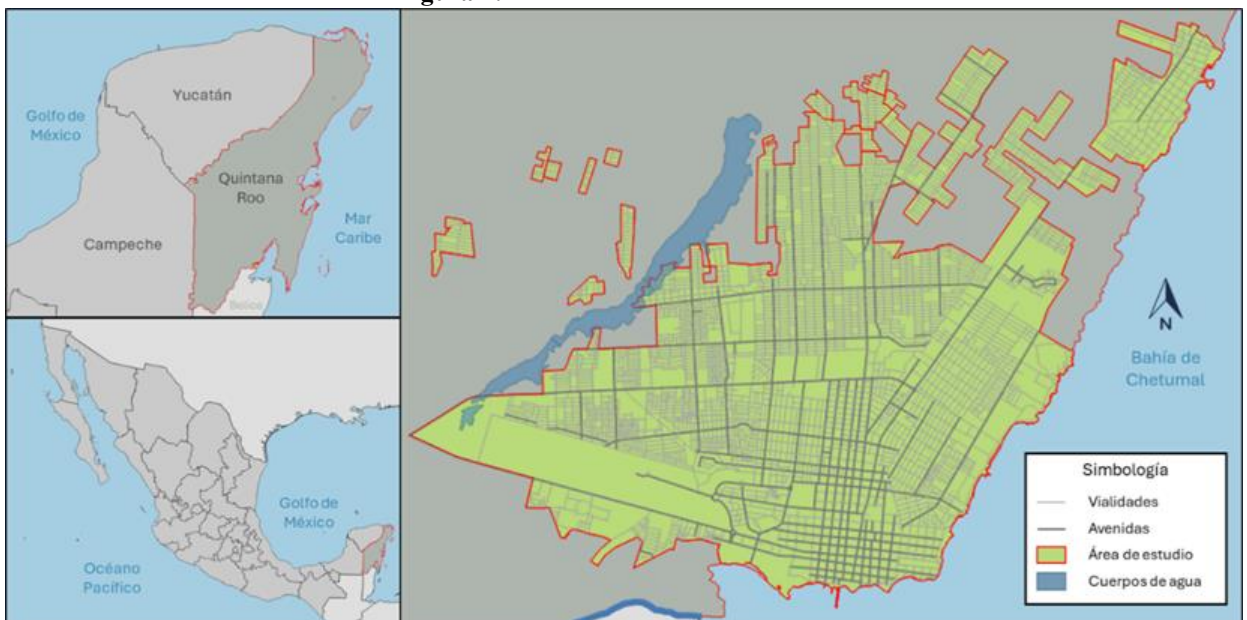
(Steenefeld et al., 2014), sin embargo, aún es necesario identificar el comportamiento espacio temporal del fenómeno, su relación con otros eventos térmicos y con los factores que lo determinan (Deilami et al., 2018; Rizvi et al., 2019) con el fin de posteriormente identificar la propuesta con mayor aptitud en la implementación de estas medidas.

Por ello, esta investigación tiene como finalidad identificar el comportamiento espacial de la temperatura urbana superficial en la ciudad de Chetumal en el periodo de máximas temperaturas, hasta el momento la ciudad no cuenta con un antecedente de investigación en el tema, por lo que este es un trabajo que permite sentar las bases para trabajos futuros.

Área de Estudio

La ciudad de Chetumal ubicada en el estado de Quintana Roo (Figura N° 1), se encuentra en el sureste de México, dentro de la Península de Yucatán a orillas de la Bahía de Chetumal en las coordenadas $18^{\circ}30'13''\text{N}$ $88^{\circ}18'19''\text{O}$ y a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. De acuerdo con los datos del Censo de Población y vivienda de 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) Chetumal tiene una población de 169,028 habitantes que ha incrementado 11.8% comparado con los 151,243 habitantes reportados durante 2010 (INEGI, 2020).

Figura 1: Localización del área de estudio



Fuente: Elaboración propia

El clima de Chetumal se clasifica como Cálido subhúmedo con lluvias en verano, para el periodo 1991-2021 de acuerdo con la Comisión

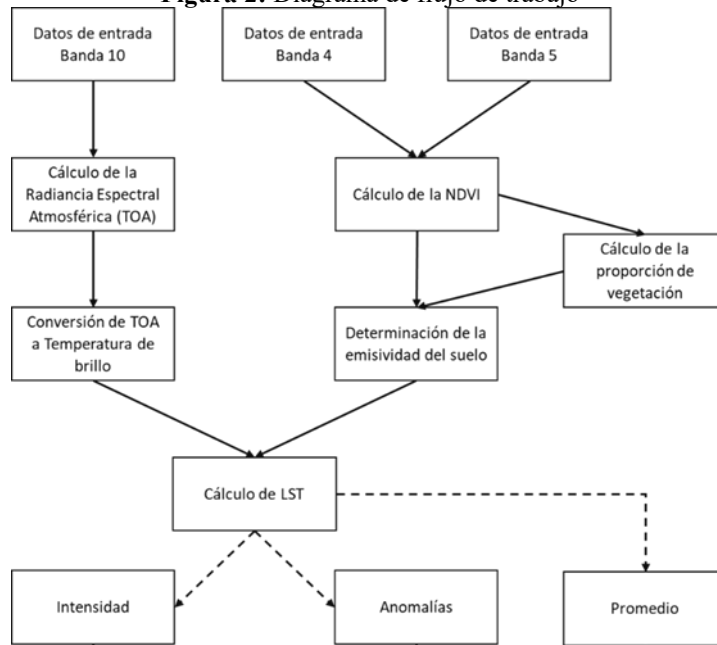
Nacional del Agua (CONAGUA) y las condiciones en particular de la estación 23153 marca la temperatura promedio en 27.4°C con una variación de temperatura media mensual de 5.1°C, la temperatura máxima de 31.7°C con una variación de 4.6°C, y con registro de temperatura máxima extrema de 39.8°C, la temperatura mínima es de 23.1°C con variación de temperaturas medias mensuales de 6°C y mínima extrema de 10.2°C.

La distribución de las temperaturas mensuales se compone de dos épocas características, la de máximas temperaturas de mayo a septiembre siendo agosto el mes más cálido de la temporada con temperaturas máximas promedio de 33.5°C y promedio de 29.3°C, la otra época es la de temperaturas mínimas de diciembre a febrero, en esta época el mes más frío es enero con temperatura mínima promedio de 19.5°C y promedio de 24.1°C. La ciudad tiene una precipitación promedio anual de 1294.3 mm y mensual de 113.3 mm, el comportamiento anual se divide en dos temporadas: la de “secas” por su baja precipitación comprendiendo los meses de febrero a abril y siendo marzo el mes de menor precipitación de la temporada y anual con una media de 26.8 mm, y la temporada de “lluvias” de junio -octubre, este último es cuando se presenta la mayor precipitación durante el año con una media de 208.5 mm.

Materiales y métodos

Con los datos del comportamiento de las condiciones climáticas de la estación meteorológica No. 23153, se seleccionó el periodo de máximas temperaturas (mayo – junio) para analizar la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST) durante los años 2016, 2019 y 2023. Se utilizaron seis imágenes satelitales capturadas por los satélites Landsat 8 y 9 obtenidas del portal Earth Explorer administrado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) que se procesaron conforme al flujo de trabajo (Figura 3). Para garantizar la calidad de los datos se escogieron únicamente aquellas escenas que no presentaron nubosidad sobre el área de estudio. Las imágenes corresponden a las fechas de 11 de mayo de 2016, 27 de mayo de 2016, 23 de julio de 2019, 09 de septiembre de 2019, 23 de mayo de 2023 y 08 de junio de 2023 siendo las siguientes escenas:

- LC08_L1TP_019047_20160511_20200907_02_T1
- LC08_L1TP_019047_20160527_20200906_02_T1
- LC08_L1TP_019047_20190723_20200827_02_T1
- LC08_L1TP_019047_20190909_20200826_02_T1
- LC09_L1TP_019047_20230523_20230524_02_T1
- LC09_L1TP_019047_20230608_20230610_02_T1

Figura 2: Diagrama de flujo de trabajo

Fuente: Adaptación del diagrama de trabajo de Avdan & Jovanovska (2016)

Para el cálculo de la Temperatura Superficial de la Tierra se siguió la metodología descrita por (Avdan & Jovanovska, 2016; Kumar et al., 2022) en el software QGIS utilizando como principales insumos la banda 4, 5 y 10 en el siguiente proceso

- (1) Primero se realizó la conversión a radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA por sus siglas en inglés) a través de la siguiente ecuación

$$L\lambda = ML * Qcal + AL - Oi \quad (1)$$

$$\text{Landsat 8} \quad TOA = 0.0003342 * \text{Banda 10} + 0.10000 - 0.29$$

$$\text{Landsat 9} \quad TOA = 0.00038 * \text{Banda 10} + 0.10000 - 0.29$$

Donde

$L\lambda$ Radiancia espectral TOA

ML Factor de reescalado multiplicativo de Radiancia de la banda 10

$Qcal$ Banda 10

AL Factor de reescalado aditivo de la banda 10

Oi Valor de corrección para la banda 10 es 0,29

- (2) Después se realizó la conversión de la Temperatura del Brillo (BT) mediante la ecuación

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{k1}{L\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (2)$$

$$\text{Landsat 8} \quad BT = (1321.0789 / \ln(744.8853 / T_{oA} + 1)) - 273.15$$

$$\text{Landsat 9} \quad BT = (1329.2405 / \ln(799.0284 / T_{oA} + 1)) - 273.15$$

K_1 y K_2 son las constantes de conversión térmica específicas de la banda 10

$L\lambda$ es la radiancia espectral TOA

Para obtener los resultados en grados Celsius, la temperatura radiante del resultado se resta con el valor del cero absoluto (-273.15°C).

- (3) Posteriormente, se calcula el Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) para la corrección de emisividad a través de la ecuación

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

$$NDVI = (Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4)$$

- (4) Con el resultado obtenido de NDVI se realizó el cálculo de la Proporción de la vegetación mediante la fórmula

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (4)$$

El valor de NDVI máximo y mínimo se consulta en las propiedades de la imagen

- (5) Con los anteriores resultados se procede a calcular la emisividad (ε) con la siguiente fórmula.

$$E = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (5)$$

P_v es el resultado obtenido de la Proporción de la vegetación (P_v) y el valor de 0,986 corresponde a una corrección de la ecuación.

- (6) El último paso es el cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre aplicando la ecuación.

$$LST = \frac{BT}{(1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\rho} \right) \ln \varepsilon \lambda \right])} \quad (6)$$

$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * \ln(\varepsilon)))$$

Donde

BT es el resultado de la Temperatura del Brillo (2)

λ es la longitud de onda de la radiancia emitida

$\varepsilon \lambda$ es la emisividad calculada

ρ se calculó con la siguiente fórmula

$$\rho = h * c / \sigma = 1.438 \times 10^{-2} \text{mK}$$

Donde

h es la Constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$).

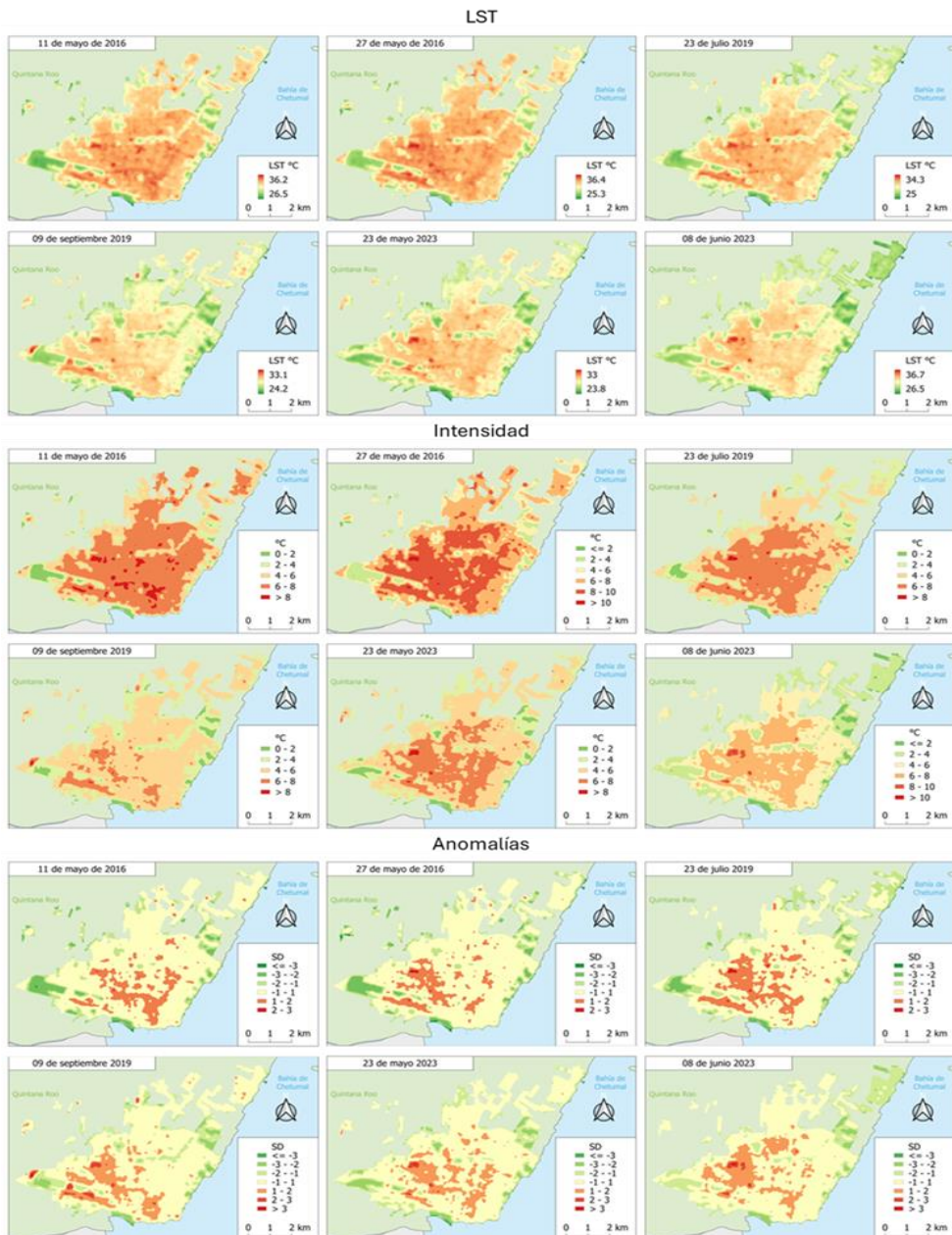
σ es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}$).

c es la velocidad de la luz ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Con el fin de identificar la distribución espacial de la temperatura únicamente de la ciudad se extrajo los datos del polígono que corresponde a Chetumal como zona urbana disponible del marco geoestadístico 2020 de INEGI, a partir de estos datos de temperatura superficial se realizaron los

procedimientos que se describen a continuación de intensidad y anomalías, obteniendo un total de 18 imágenes (figura 3), seis de temperatura superficial, seis de intensidades, seis de anomalías, con ello se generó un nuevo raster con el promedio de las seis imágenes por cada procedimiento para obtener una imagen de valores generales.

Figura 3: Resultado de los procesos de LST, intensidades, anomalías para cada fecha analizadas



Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la intensidad se utilizó el resultado de LST, si bien la intensidad es obtenida comparando la temperatura promedio y máxima de la ciudad contra un ambiente rural (Oke, 1973) este estudio optó por sustituir la intensidad rural por la intensidad menor ubicada en la ciudad, de forma tal que puedan identificarse el rango de grados centígrados que varía la ciudad y las áreas donde se distribuye, por lo que se realizó una resta de datos de temperatura máxima menos temperatura mínima, el resultado se categorizó en intensidad Muy baja ($\leq 2^{\circ}\text{C}$), baja ($2^{\circ}\text{C}-4^{\circ}\text{C}$), media ($4-6^{\circ}\text{C}$), alta ($6^{\circ}\text{C}-8^{\circ}\text{C}$) y muy alta (>8).

El cálculo de las anomalías térmicas utilizó el valor de temperatura promedio obtenido de LST y el valor de la desviación estándar para cada fecha (datos disponibles en las propiedades de la capa). Se consideran anomalías muy frías si presentan < -3 desviaciones estándar, frías entre -3 y -1 desviaciones estándar, normales si se encuentran entre ± 1 desviación estándar, cálidas entre 1 y 2 desviaciones estándar y muy cálidas entre $2-3$ desviaciones estándar. La siguiente operación se procesó en la calculadora raster, siendo LST en la operación la imagen resultada del proceso del cálculo de la temperatura de la superficie.

$$(\text{LST} - \text{LST promedio}) / \text{desviación estándar}$$

Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos de la estimación de temperatura de la superficie de la tierra para el periodo de mayo a septiembre del 2016-2023 en la ciudad de Chetumal (tabla No.1), se observa que el 2016 es el año con mayores temperaturas promedios, con 36.3°C , 25.9°C y 32.4°C , sin embargo, la temperatura máxima registrada fue durante junio de 2023 con 36.7°C .

Tabla 1: Temperaturas máximas, mínimas y promedios superficiales del periodo 2016-2023

Año	2016		2019		2023	
Fecha	11/05	27/05	23/07	09/09	23/05	08/06
Temperatura máxima	36.2°C	36.4°C	34.3°C	33.1°C	33°C	36.7°C
Temperatura máxima promedio	36.3°C		33.7°C		34.9°C	
Temperatura mínima	26.5°C	25.3°C	25°C	24.2°C	23.8°C	26.5°C
Temperatura mínima promedio	25.9°C		24.6°C		25.2°C	
Promedio	32.4°C	32.3°C	30.2°C	28.7°C	28.7°C	31.5°C
Promedio del periodo	32.4°C		29.1°C		30.1°C	

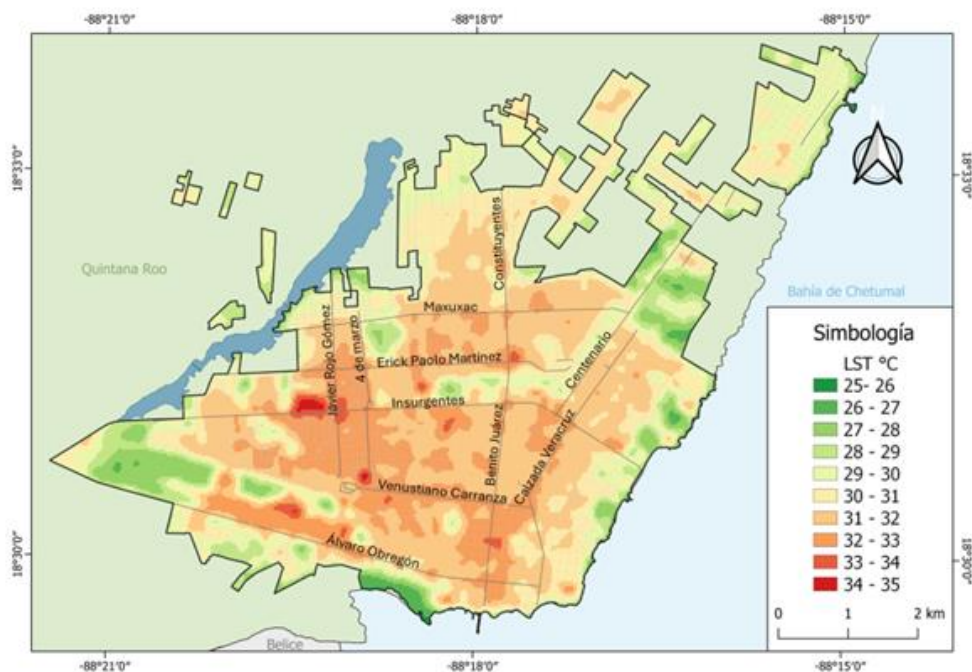
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la distribución espacial de la temperatura superficial promedio de Chetumal (figura 4), presenta un intervalo entre 25.4°C – 34.5°C , se observa cómo interactúan los diferentes elementos de la ciudad. Se distinguen tres puntos con las temperaturas máximas entre 34°C – 35°C con gradiente de 33°C - 34°C en su periferia, la ubicación de estos se encuentra al

sur de la Av. 4 de marzo, al oeste y de forma superior a la Av. Álvaro Obregón, y el de mayor superficie al oeste de la Av. Insurgentes próximo a la Av. Javier Rojo Gómez. La superficie con temperaturas de 32°C – 33°C de mayor continuidad se distribuye sobre las avenidas Javier Rojo Gómez y 4 de marzo hasta el sur donde su dirección cambia desplazándose al este sobre la Av. Venustiano Carranza y descendiendo sobre la Av. Benito Juárez.

El espacio donde se distribuyen las temperaturas de 31°C – 32°C muestran un continuo poco fragmentado, su distribución se ve limitada al este de la ciudad por el espacio próximo que sigue el límite con la bahía, presentando un gradiente térmico entre los 26°C – 31°C , al interior de la ciudad las áreas con temperaturas en el intervalo de 27°C – 31°C también intervienen en su distribución, estas áreas con temperaturas menores presentan una distribución en forma de corredor si se encuentran muy próximas entre ellas.

Figura 4: Distribución espacial de la temperatura superficial en Chetumal para el periodo 2016- 2023



Fuente: Elaboración propia

Relacionado con la temperatura superficial en la tabla No. 2 se observa la intensidad de cada año identificando que de forma similar 2016 es el año con la mayor intensidad y promedio con 11.1°C y 10.4°C respectivamente, mientras que el 2019 fue el año con menor intensidad y promedio con 8.9°C y 9.7°C respectivamente.

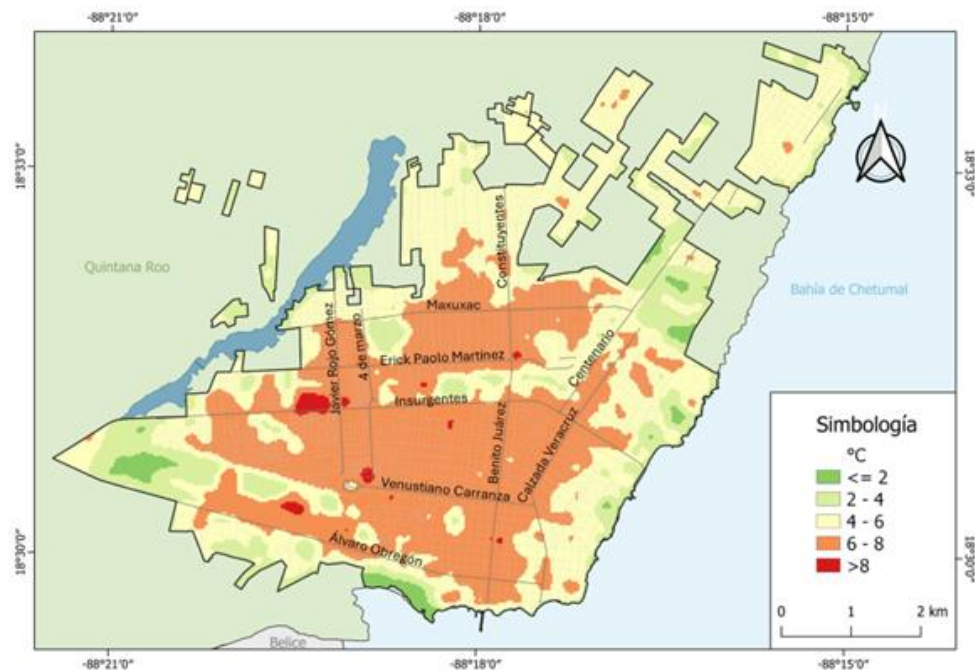
Tabla 2: Resultados de intensidad de temperatura superficial para el periodo 2016 – 2019

Año	2016		2019		2023	
Fecha	11/05	27/05	23/07	09/09	23/05	08/06
Intensidad	9.7°C	11.1°C	9.3°C	8.9°C	9.2°C	10.2°C
Intensidad promedio	10.4°C		9.1°C		9.7°C	

Fuente: Elaboración propia

En la figura No. 5 de distribución espacial de la intensidad se distingue 12 puntos de intensidades muy altas distribuidas tres sobre los puntos anteriormente mencionados en la descripción de la temperatura máxima superficial, 9 con área menor distribuidos próximos a las diferentes avenidas principales, la superficie ocupada por esta intensidad (tabla No. 3) es de 0.3 km² siendo la intensidad con menor área. Se evidencia el continuo sólido de intensidad alta con una superficie de 15.8km² ocupando el 2do lugar en extensión, la homogeneidad de la distribución se identifica a partir de la Calzada Veracruz con dirección al oeste de la ciudad y tomando como referente esta avenida la fragmentación en la intensidad alta es más notoria al este de la vialidad en dirección al límite natural con la bahía. La intensidad media con la mayor superficie ocupada con 16km² está dispersa en forma de zona de transición entre la intensidad alta y la intensidad baja, envolviendo en diferentes puntos las áreas de intensidad baja ubicadas al interior de la ciudad. Las intensidades bajas se encuentran dispersas en algunos puntos al interior de la ciudad, pero su dominancia es circundante a las áreas de intensidad muy baja, se distingue una mayor localización de estas en la parte este y sur de la ciudad, sin embargo, también se localizan al noroeste en el área próxima al cuerpo de agua, el área de esta intensidad es de 5.8km². La intensidad muy baja se ubica predominantemente cercana al límite de la ciudad con la bahía, tanto al sur como al este y noreste, exceptuando el área de ubicada al oeste de la ciudad, su área es de 0.8 km².

Figura 5: Distribución espacial de la intensidad de la temperatura superficial en Chetumal para el periodo 2016- 2023



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3: Superficie en km² que ocupada por las diferentes categorías de intensidad

Muy baja ($\leq 2^{\circ}\text{C}$)	Baja ($2^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$)	Media ($4^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$)	Alta ($6^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$)	Muy Alta ($> 8^{\circ}\text{C}$)
0.8 km ²	5.8 km ²	16.0 km ²	15.8 km ²	0.3 km ²

Fuente: Elaboración propia

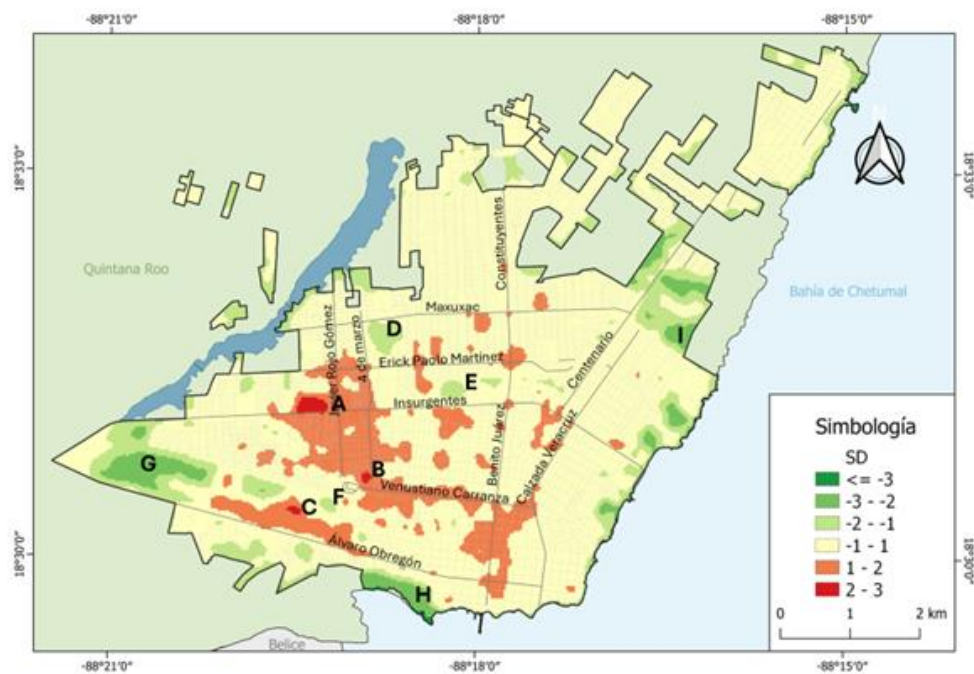
Las anomalías térmicas superiores o muy cálidas exhiben un comportamiento similar al ya descrito en temperatura superficial e intensidades (Figura No. 6), al observar la superficie de la ciudad, estos puntos de mayor concentración de temperaturas presentan características similares (Figura No. 7) el punto “A” es el centro comercial “Plaza las Américas” donde se observa una superficie abierta en el área de estacionamiento con predominancia de elementos artificiales como el pavimento y baja presencia de cobertura vegetal, el punto “B” corresponde a una unidad deportiva cuya superficie está cubierta por pasto sintético y que de igual forma no presenta cobertura vegetal y es un área abierta, el punto “C” se localiza en el aeropuerto de la ciudad, sin embargo, a pesar de la dimensión ocupada por la pista de aterrizaje es el polígono próximo al área de abordaje donde se presenta las mayores anomalías.

Las anomalías cálidas conforman un corredor que almacena los puntos “A” y “B” siendo este espacio el de mayor superficie ocupada, en la

parte centro superior de la ciudad tienen una distribución fragmentada y dispersa, las condiciones sobre la ciudad de esta área corresponden a la presencia de casa – habitación en su mayoría, con presencia limitada de vegetación. La mayor superficie de la ciudad tiene un comportamiento de anomalía normal, en ciertos puntos de la ciudad la característica en común de estas áreas es un equilibrio entre la parte edificada y la cobertura vegetal presente.

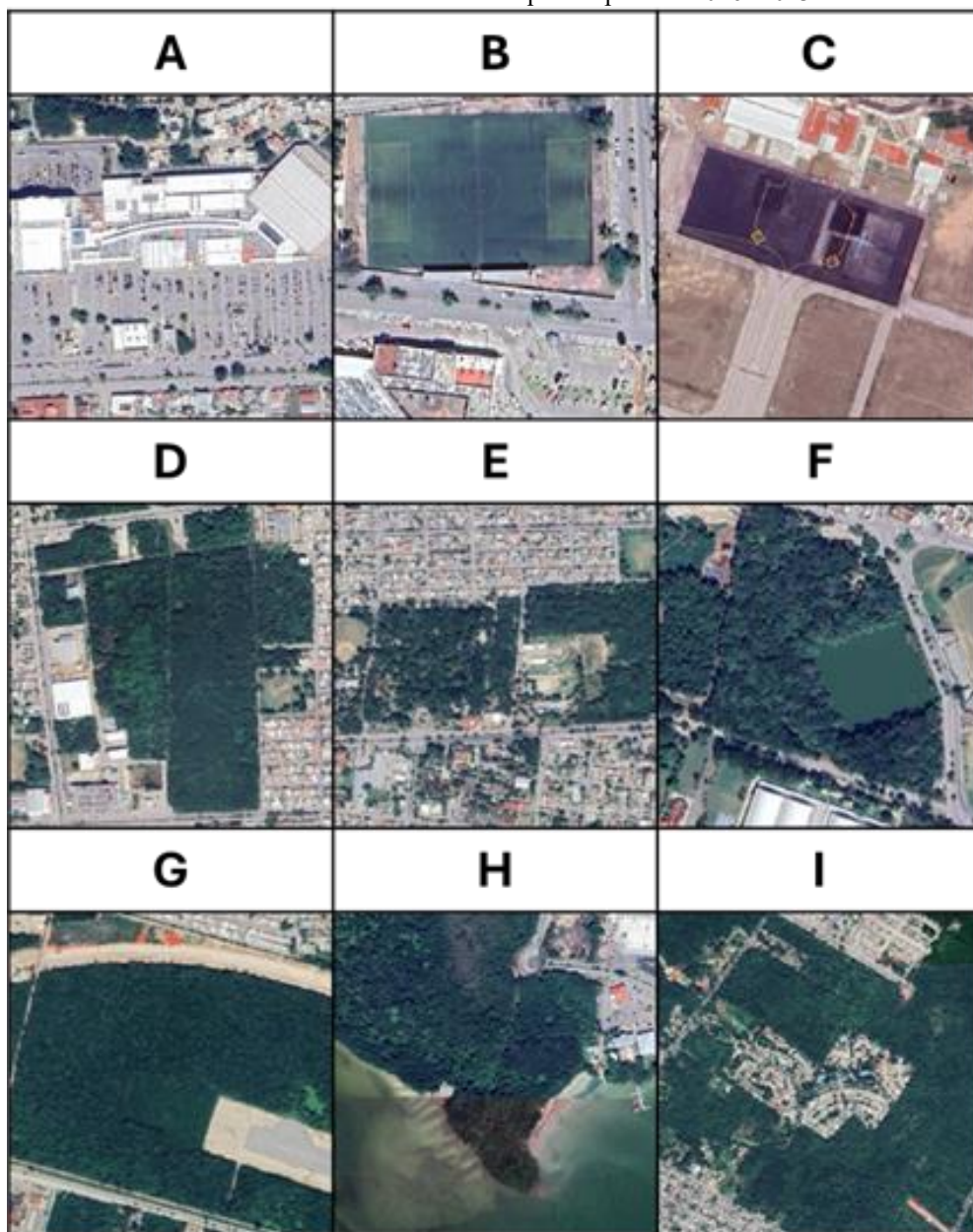
Las anomalías frías (-2 - -1SD) presentan dos tipos de distribución, en la periferia de la ciudad actúan zona de transición de las anomalías muy frías y al interior de la ciudad como islas, el punto “D”, “E” y “F” son el ejemplo de estos muestran en las características de estos sitios que en común comparte la dominancia de densidad de vegetación y son rodeados de elementos artificiales, el punto “F” adicionalmente cuenta con un cuerpo de agua. Los puntos con menores anomalías o considerados muy fríos se ubican próximos a los límites de la ciudad, compartiendo comportamiento espacial con la intensidad, ejemplo de estos lugares son el punto “G”, “H”, “I”, la mayoría de los sitios con anomalías muy frías se encuentran cerca del límite de la bahía, en este caso el punto “G” siendo un punto con mayor distancia de este cuerpo de agua, mayor cobertura vegetal y reducidos elementos artificiales, para el caso de “H” espacialmente se observa una forma de península en la punta sur presentando anomalías menores, este sitio con proximidad al agua al igual que el punto “G” presentan dominancia de cobertura vegetal, el punto “I” exhibe por un lado el comportamiento de las anomalías más frías pero también permite distinguir el comportamiento de las anomalías frías como zona de transición, en el mapa se observa una zona de anomalías normales rodeada por anomalías frías, sobre la superficie de Chetumal, el área de anomalías normales corresponde a un fraccionamiento que está rodeado de vegetación, superficialmente en la imagen satelital no se logra distinguir un cambio en la comunidad arbórea pero el efecto entre estos dos tipos de cobertura se remarca en los resultados obtenidos.

Figura 6: Distribución espacial de anomalías térmicas en Chetumal para el periodo 2016-2023



Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Ejemplos de tipos de cobertura asociados con la distribución espacial de anomalías térmicas en Chetumal para el periodo 2016- 2023



Fuente: Elaboración propia

Discusión

El análisis de la temperatura atmosférica es un desafío en Chetumal, debido a la localización de las estaciones meteorológicas y la ausencia de registro de datos, por ello la estimación de la temperatura superficial a través

de imágenes satelitales da la oportunidad sobre el análisis de temperatura atmosférica de estudiar un área mayor en diferentes puntos simultáneamente (Kim & Brown, 2021), sin embargo, la adquisición de imágenes con condiciones óptimas para su procesamiento es complicado debido a factores climáticos como la nubosidad y precipitación, lo que hace que imposibilite realizar observaciones en tiempo prolongados del terreno (Zhang et al., 2022), pese a ello, las seis imágenes obtenidas de Chetumal para el periodo entre mayo – septiembre del 2016, 2019, 2023 permiten identificar de forma general el patrón de distribución de temperatura superficial en la ciudad.

El comportamiento del microclima urbano está en función de tres categorías principales de factores que agrupan distintos elementos (Shafaghat et al., 2016), no todos estos elementos contribuyen de la misma forma sobre la distribución de la temperatura superficial, en Chetumal en este estudio exploratorio describe la dispersión de la temperatura superficial de Chetumal en función de los factores geométricos como los elementos de edificación, materiales de construcción, tipos de cobertura y presencia de vegetación, encontrado relación similar a lo reportado por Hussain & mozahim, (2024), donde la vegetación obtuvo las menores temperaturas mientras que las áreas residenciales y de asfalto las mayores.

Abordando en particular el efecto del pavimento a la contribución de almacenamiento de temperaturas máximas en Chetumal, se observa en el área del aeropuerto la importancia del color y material empleado, puesto que a pesar de que el área circundante se compone de pavimento es el polígono con el color más oscuro el que atrapa y retiene la mayor cantidad de calor, esto es porque normalmente los pavimentos impermeables convencionales tienen una gran inercia térmica que absorben la radiación solar sin poder enfriar por medio de evaporación (Qin, 2015).

En el caso de la vegetación se ha demostrado que tienen una temperatura menor que la superficie gris (Hwang et al., 2023), dentro del perfil de la ciudad son justamente estas áreas que forman islas frescas en el continuo de la distribución de temperatura, las características que permiten esta disminución en la temperatura son el área de sombreado, las características de albedo de la vegetación y el proceso de evapotranspiración de las diferentes especies.

Chetumal al tener de límite natural la bahía presenta temperaturas menores en las áreas cercanas, este comportamiento es normal en ciudades costeras, ya que el agua tiene un papel importante en el comportamiento de la temperatura y se asocia la disminución en promedio de 2.5°C la temperatura como efecto de los cuerpos de agua (Cureau et al., 2023; Shafaghat et al., 2016; Wu & Zhang, 2019), aunque en este trabajo no se cuantifica la extensión de la influencia de los cuerpos de agua se calcula que puede adentrarse 800 metros a la ciudad, y que las zonas con vegetación son

las de mayor susceptibilidad de enfriamiento, también que la cercanía al cuerpo de agua fortalece el efecto de “borde frío” (Wu & Zhang, 2019), estas características son encontradas dentro de la ciudad, ya que la vegetación próxima a la bahía presenta los menores valores analizados, de igual forma, paralelamente a la línea de costa este de Chetumal se encuentra una zona lineal de temperaturas bajas que podría corresponder con el efecto de “borde frío”, pudiéndose explicar gracias a la transferencia de aire fresco a las áreas adyacente de la costa influenciado por la brisa marina que aumenta la velocidad del viento (Abulibdeh, 2021).

Conclusiones

La distribución de temperatura de Chetumal coincide con lo encontrado en la literatura, por un lado, la temperatura máxima se ubica en áreas de coberturas superficiales capaces de absorber y retener el calor, las áreas circundantes con condiciones urbanas ocupadas por casa – habitación, con dominancia de elementos artificiales y baja presencia de cobertura vegetal generan un corredor térmico capaz de encapsular las máximas temperaturas.

Por otro el otro lado, la presencia de vegetación dentro de la ciudad limita la dispersión de las temperaturas elevadas siendo espacialmente evidente el abrupto discontinuo que se genera, amortiguando las condiciones térmicas creando espacios de temperaturas menores que en conjunto con áreas circundantes próximas con las mismas características son capaces de generar corredores de bajas temperaturas superficiales.

La ubicación de la ciudad y su límite natural con la Bahía de Chetumal parece influenciar también el comportamiento de la temperatura, generando un “borde fresco” orientado al este paralelo a la orilla de la ciudad, es necesario indagar si este efecto es generado por la predominancia de vientos o si las condiciones urbanas son las que influyen en la distribución observada.

Este trabajo es un parteaguas en la zona de estudio ya que abre la oportunidad para estudiar la relación de la distribución espacial de la temperatura en condiciones climáticas diferentes como la temporada de meses con temperaturas mínimas o periodo de sequías, o bien relacionar el grado de influencia según la característica de los diferentes tipos de cobertura presentes en la ciudad o el aporte particular de los elementos naturales como las áreas arboladas y superficies de agua, sin descartar los elementos artificiales como el impacto del pavimento o el aporte de calor derivado de los sistemas de enfriamiento. Agradecimiento a CONAHCYT por el apoyo otorgado.

Conflicto de intereses: Los autores no declararon ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de los datos: Todos los datos están incluidos en el contenido del artículo.

Declaración de financiación: Los autores no obtuvieron financiación para esta investigación.

References:

1. Abulibdeh, A. (2021). Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities. *Environmental Earth Sciences*, 80(7), 259. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540-7>
2. Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016.
3. Cureau, R. J., Pigliautile, I., & Pisello, A. L. (2023). Seasonal and diurnal variability of a water body's effects on the urban microclimate in a coastal city in Italy. *Urban Climate*, 49, 101437. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101437>
4. Deilami, K., Kamruzzaman, Md., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
5. Hussain, R. N., & mozahim, R. (2024). Assessment of Land-sat Satellite Images used to calculate Land Surface Temperature(LST): A case study in Adhamiya Baghdad. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1300(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1300/1/012006>
6. Hwang, B., Sou, H.-D., Oh, J.-H., & Park, C.-R. (2023). Cooling effect of urban forests on the urban heat island in Seoul, South Korea. *PLOS ONE*, 18(7), e0288774. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288774>
7. Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
8. Kumar, B. P., Babu, K. R., Anusha, B. N., & Rajasekhar, M. (2022). Geo-environmental monitoring and assessment of land degradation and desertification in the semi-arid regions using Landsat 8 OLI /

- TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges*, 8, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100578>
9. Li, D., Bou-Zeid, E., & Oppenheimer, M. (2014). The effectiveness of cool and green roofs as urban heat island mitigation strategies. *Environmental Research Letters*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/5/055002>
 10. Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769–779.
 11. Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>
 12. Rizvi, S. H., Alam, K., & Iqbal, M. J. (2019). Spatio-temporal variations in urban heat island and its interaction with heat wave. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 185, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.001>
 13. Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
 14. Shafaghat, A., Manteghi, G., Keyvanfar, A., Lamit, H. B., Saito, K., & Ossen, D. R. (2016). Street geometry factors influence urban microclimate in tropical coastal cities: A review. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 17, 61. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2016-0006>
 15. Stache, E. (Eva), Schilperoort, B. (Bart), Ottelé, M. (Marc), & Jonkers, H. M. (Henk). (2022). Comparative analysis in thermal behaviour of common urban building materials and vegetation and consequences for urban heat island effect. *Building and Environment*, 213, refreshing the role of open water. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108489>
 16. Steeneveld, G. J., Koopmans, S., Heusinkveld, B. G., & Theeuwes, N. E. (2014). Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*, 121, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.001>
 17. Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., & de Vries, S. (2005). Benefits and uses of urban forests and trees. En *Urban forests and trees* (pp. 81–114). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_5
 18. Wang, Z., Xie, Y., Mu, M., Feng, L., Xie, N., & Cui, N. (2022). Materials to Mitigate the Urban Heat Island Effect for Cool

- Pavement: A Brief Review. *Buildings*, 12(8), 1221. <https://doi.org/10.3390/buildings12081221>
19. Wu, Z., & Zhang, Y. (2019). Water Bodies' Cooling Effects on Urban Land Daytime Surface Temperature: Ecosystem Service Reducing Heat Island Effect. *Sustainability*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su11030787>
20. Zhang, X., Kasimu, A., Liang, H., Wei, B., & Aizizi, Y. (2022). Spatial and Temporal Variation of Land Surface Temperature and Its Spatially Heterogeneous Response in the Urban Agglomeration on the Northern Slopes of the Tianshan Mountains, Northwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13067. <https://doi.org/10.3390/ijerph192013067>