

Vigencia de la detección de la isla de calor urbana mediante recorridos: dos ejemplos en el oriente de México

Validity of urban heat island detection through walkthroughs: two examples in eastern Mexico

Irving Rafael Méndez-Pérez,* Adalberto Tejeda-Martínez,** José Juan Lino-Solano***
y Carlos Octavio Rivero Blanco(†)§

Recibido: 04/05/2023. Aprobado: 23/06/2023. Publicado: 28/08/2023

Resumen. A casi un siglo del primer recorrido en vehículo para detectar efectos de la urbanización en el clima local (Viena, Austria, 1927; Karlsruhe, Alemania, 1929) el método sigue vigente como lo evidencian investigaciones recientes. El presente trabajo recupera datos de temperatura atmosférica de dos campañas de mediciones mediante trayectos vehiculares en el oriente de México: de junio a septiembre de 2012 en una ciudad costera (Coatzacoalcos, 320 000 habitantes) y de agosto a noviembre de 2018 en un asentamiento montañoso (Emiliano Zapata, 20 000 habitantes). En ambas campañas se detectó la presencia de la isla de calor urbana, cuya intensidad resultó dependiente del tipo de superficie y de los sistemas de circulación atmosférica predominantes al momento de las mediciones. La intensidad máxima de la isla de calor urbana diurna en el sitio costero es de 8.7 °C y de 3 °C en el periodo nocturno, mientras que en el sitio montañoso fue de hasta 1.9 °C. También se mostró que la intensidad de ambas islas de calor urbana excede a lo estimado estadísticamente para ciudades de Latinoamérica en función de la población.

Palabras clave: Isla de calor urbana, transectos móviles, costa, montaña, dosel urbano.

Abstract. One century after the first drive tour to detect the effects of urbanization on the local climate (Vienna, Austria, 1927; Karlsruhe, Germany, 1929), the method is still valid, as evidenced by recent research mentioned throughout this article. This method was applied in two data recording campaigns in eastern Mexico: June to September 2012 in a coastal city (Coatzacoalcos, 320 thousand inhabitants) and August to November 2018 in a mountainous site (Emiliano Zapata, 20 thousand inhabitants). In both campaigns, the urban heat island (ICU, for its acronym in Spanish) was detected within the urban canopy, whose intensity depended on the type of surface and the dominant atmospheric circulation systems at the time of data recording. The peak ICU intensity at the coastal site is 8.7 °C in the daytime and 3 °C at night, while it is up to 1.9 °C at the mountainous site.

The tours included the urban area and its periphery, with temperature recorded at points representative of the different surfaces or land uses. Gasoline motor vehicles were used. The data recording equipment was calibrated before the campaigns and installed as far away from the engine as possible to avoid data biased by the heat emitted by the engine. Sensors were set to record data at 1-minute

* Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán S/N, Edificio B Facultad de Instrumentación Electrónica, Col. Zona Universitaria Xalapa Veracruz, C.P. 91090. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0125>. Email: irmendez@uv.mx

** Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria, Xalapa, Veracruz, C.P. 91090. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2513-3454>. Email: atejeda@uv.mx

*** Consultor ambiental. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1648-8377>. Email: jjuanlino@gmail.com

§ Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos, Veracruz, México.

intervals. At each recording point, a 10-minute waiting time was allowed to stabilize sensors; then, the temperature corresponding to minute 10 was recorded. We used a HOBO U10-003 data logger in Coatzacoalcos and a Kestrel 4500 portable meteorological station in Emiliano Zapata.

Data were recorded outside of the hours when minimum and maximum temperatures occur because around them it is impossible to identify a clear trend to nighttime or evening cooling or morning warming — a trend necessary to know to reproduce simultaneous thermal measurements.

In both sites, the temperatures recorded were corrected according to the thermal trend during tours and altitudinal differences between recording points.

Eighteen and ten tours were driven for coastal and mountainous sites, respectively. Various weather conditions were considered, for example, clear or partly cloudy skies prior to a cold front or a tropical wave.

From the results, it is inferred that the type of surface, the meteorological events during data recording, and the size of the urban area are key factors determining ICU intensity.

At the coastal site, an anticyclone seems to promote the development of the ICU, except for significant meteorological disturbances that induce a weak ICU (thermal differences less than 2 °C).

INTRODUCCIÓN

En el siglo XVII inician las observaciones meteorológicas instrumentales propiamente dichas (Frisinger, 1977). El primero en indagar el contraste en los climas urbano/rurales mediante mediciones fue el químico londinense Luke Howard, quien publicó sus hallazgos en el libro *The Climate on London* en dos tomos (1818 y 1820) y en 1833 en una edición en tres tomos (Howard, 2006). Con datos higrotérmicos de Londres de 1797-1831, encontró que la temperatura ambiente en el centro urbano era más alta que en la periferia con una diferencia de 3.7 °C durante la noche y de aproximadamente 1 °C durante el día. En la actualidad a este fenómeno se le conoce como la isla de calor urbana (ICU), término empleado en la literatura por primera vez en alemán (*städtische Wärmerinsel*) por Peppler (1929) y casi dos décadas después lo retoman en inglés (*urban heat island*) Balchin y Pye (1947).

Oke *et al.* (2017) identifican cuatro tipos de ICU —sub-superficial, superficial, dentro del dosel urbano y por encima de este, en la capa límite—, pero solo las dos últimas ocurren en la atmósfera y a ellas se referirá el presente trabajo, sobre todo

Although the mountainous site, Emiliano Zapata, has an area and population 1:10 relative to the coastal site, it does have an ICU, with a higher temperature in the central urban area, compared to its surroundings where vegetated areas predominate. The average ICU intensity is weak, 1.5 °C.

It is worth mentioning that the analysis of atmospheric temperature alone is limited because multiple additional factors, such as wind, atmospheric humidity, and anthropogenic heat emissions, influence the ICU genesis and evolution.

Based on the results and experience gathered in this study, we recommend continuing data recording efforts to extend the ICU study period and include other seasons of the year to have a more detailed characterization. While driving tours have proven to be a suitable method for ICU recording in urban areas, setting a relatively dense network of fixed rooftop stations may improve the analysis and yield at least two ICU detection levels (within the urban canopy through drive tours and above it by fixed stations). Infrared satellite images could supplement the analysis to represent the phenomenon at three levels: ground, canopy, and above-canopy.

Keywords: urban heat island, mobile transects, coastal site, mountainous site, urban canopy.

dentro del dosel urbano, donde se hicieron mediciones mediante recorridos en vehículo.

En la escala horizontal, Oke *et al.* (2017) identifican, de menor a mayor, tres escalas: la microescala (como una calle y sus edificios, con magnitudes de decenas a un par de cientos de metros); la escala local (de medio a un par de kilómetro), y la mesoescala, que abarca el área total de una ciudad. Los ejemplos que se mostrarán en este artículo están en las dos últimas escalas.

La ICU consiste en que los núcleos urbanizados suelen tener temperaturas más altas que sus alrededores. Este contraste térmico se debe principalmente a: 1) la sustitución del terreno natural y la cubierta vegetal por áreas pavimentadas y construcciones, que reducen la permeabilidad del suelo y con ello la evapotranspiración; 2) las propiedades térmicas y radiativas de los materiales de construcción; 3) la producción de calor antropogénico (transporte, sistema de climatización, servicios públicos, industrias, etc.) y 4) la geometría de calles y edificios, como los cañones urbanos, la reducción de la velocidad del viento, menor albedo y menor fracción de cielo visible (Oke, 1995; Oke *et al.*, 2017).

Para Oke (1984), la climatología urbana estudia los procesos físicos y químicos que provocan cam-

bios en el estado medio de la atmósfera en las ciudades. El Primer Simposio Internacional sobre Climas Urbanos y Edificaciones en 1968, promovido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1970), permitió reconocer la presencia de la ICU en distintas ciudades del mundo. Stewart (2011) señala que durante los 50 años previos a esa publicación se había estudiado la ICU en 225 ciudades, y Santamouris (2015, 2020) cuantifica 263 ciudades: 101 de Asia y Australia, 110 de Europa, 43 de América (incluyendo Latinoamérica) y 9 de África.

En México los trabajos sobre la ICU se inician propiamente alrededor de los 1970, pero destacan dos estudios aislados hacia finales de los siglos XVIII y XIX. En su estancia en la Nueva España entre 1790 y 1791, el naturalista guatemalteco Antonio Pineda llevó a cabo una serie de mediciones en el centro de Celaya, Guanajuato, donde observó que la temperatura variaba de 18 a 21.5 °C, mientras que en las afueras de la ciudad oscilaba de 17 a 18 °C (González, 1988). Cien años más tarde (1895-1896), con mediciones de temperaturas en observatorios meteorológicos, Manuel Moreno y Anda detectó en la Ciudad de México una diferencia de 1.4 °C entre el Palacio Nacional (urbano) y el Observatorio de Tacubaya, rural en aquellos años (Moreno y Anda, 1895).

Para la Ciudad de México, Riquelme (1968) utilizó mediciones termohigrométricas de equipos fijos ubicados en cuatro puntos (Balbuena, Industrial, Tacubaya y Ciudad Universitaria) y encontró una diferencia urbano/rural de 2 °C, que atribuyó a las construcciones y fábricas del centro de la ciudad en contraste con la vegetación de las afueras. Hacia 1968 y 1969, Jáuregui (1971), mediante recorridos móviles, muestreo al menos 80 puntos en la Ciudad de México, observando una diferencia térmica de 4 a 5 °C entre la “zona de mayor densidad de edificios” y los alrededores. A partir de estos dos estudios al presente se ha publicado alrededor de medio centenar de trabajos en torno a la ICU en el país, en promedio uno por año.

Para la determinación de la ICU en México se han aplicado tres métodos por separado o combinados: estaciones meteorológicas (por ejemplo, Tejeda y Acevedo, 1990; Moreyra-González *et al.*, 2022), transectos móviles (por ejemplo, Jáuregui, 1971;

Mercado, 2022) y la aplicación de la percepción remota (por ejemplo, García-Cueto *et al.*, 2007; Galindo, 2009; Cui y De Foy, 2012; Colunga *et al.*, 2015).

En este trabajo se presenta una primera aproximación a la intensidad y distribución espacial de la ICU en dos sitios: uno en la zona montañosa central y otro costero al sur, ambos del estado de Veracruz (México). Esta detección de la ICU, con mediciones térmicas de recorridos vehiculares, demuestra que aun en asentamientos humanos relativamente pequeños como Emiliano Zapata (20 000 habitantes, 3 km²) o uno sujeto a la circulación costera (Coatzacoalcos) es detectable este fenómeno.

MATERIALES Y MÉTODOS

El primero de los sitios que comprende este estudio, se ubica en el municipio costero de Coatzacoalcos, al sur del estado de Veracruz (México), y el segundo en la parte montañosa central del mismo estado, en el municipio de Emiliano Zapata (Figura 1).

Coatzacoalcos

El puerto de Coatzacoalcos se localiza en las llanuras de sotavento del estado de Veracruz, a unos 420 km en carretera de la ciudad de Xalapa, capital del estado (Figura 1a), entre los paralelos 18°03' y 18°13' N y 94°13' y 94°39' O, a 10 msnm. Es el tercer municipio más poblado de la entidad con aproximadamente 320 000 habitantes (97% urbanos) distribuidos en 310 km² (SEDATU, 2020).

El municipio colinda al norte con el Golfo de México, y el río Coatzacoalcos lo divide en dos: al oeste se ubica el centro histórico y el recinto portuario; al este hay una urbanización reciente y un complejo petroquímico. Tiene un clima tropical húmedo del tipo Am en el sistema de Köppen-García (García, 1981), con 2580 mm de precipitación media anual, el 70% concentrada en el semestre mayo-octubre. La temperatura media anual es de 26 °C; en el mes de mayo se presenta el valor más alto de la temperatura máxima promedio de 32 °C (SMN, 2022; García, 1981) con una temperatura mínima promedio en enero de 19.6 °C. En la costa veracruzana, a escala sinóptica, dominan los

vientos alisios en el verano y otoño, y los nortes en invierno, pero en ausencia de esos sistemas la circulación diaria está determinada por sistemas de circulación locales, particularmente por las brisas marina diurna y terrenal nocturna (Tejeda-Martínez *et al.*, 1989).

Emiliano Zapata

Se localiza entre las coordenadas 19°30'20", 19°29'21" N y 96°51'44", 96°50'38" O, en los límites este-sureste de la ciudad de Xalapa. Tiene una altitud entre 1142 y 1219 msnm y su extensión es de 3 km². La habita una población de alrededor de 20 000 habitantes (Lino, 2019), distribuida en casas-habitación de carácter popular y residencial de una a dos plantas, más 12 edificios de cinco niveles (Figura 1b).

Su clima es templado subhúmedo, C(w1) en el sistema de Köppen-García (García, 1981), con tem-

peratura media anual de 21 °C aproximadamente, la máxima promedio es de 28.5 °C que se presenta en los meses de abril y mayo; la temperatura mínima promedio es de 11.5 °C durante enero. De acuerdo con las normales climatológicas 1981-2010, la precipitación media es de 1509 mm anuales, el 75% ocurre entre mayo y octubre (Lino, 2019).

Método

Un método utilizado en el estudio de la distribución espacial de la temperatura ambiente dentro del dosel urbano consiste en recorridos del área urbana y su periferia haciendo mediciones de temperatura en puntos representativos de los diferentes tipos de superficie o usos del suelo. Si bien esta metodología data de hace casi un siglo, cuando Schmidt (1927) la empleó para estudiar el clima de la ciudad de Viena, Austria, y Pepler (1929) para la ciudad de Karlsruhe en Alemania,

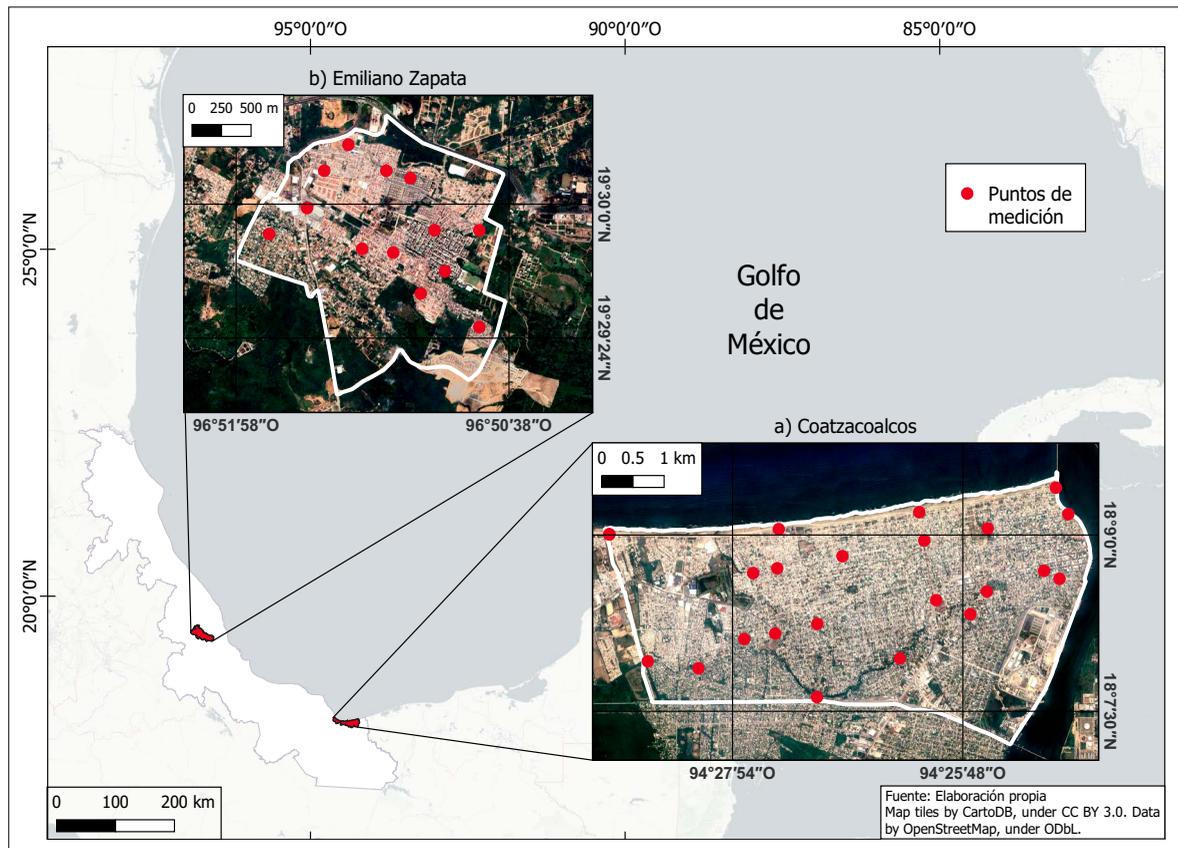


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio: a) Coatzacoalcos, costero y b) Emiliano Zapata, montañoso.

en la actualidad sigue vigente utilizando diferentes medios de desplazamiento: vehículos automotores (Kim *et al.*, 2019; Kousis *et al.*, 2021; Jaiswal *et al.*, 2023), bicicleta eléctrica o motoneta (Sun *et al.*, 2019; Romero *et al.*, 2021;), incluso caminando (Tsin *et al.*, 2016; Pigliautile y Pisello, *et al.*, 2018; Pioppi *et al.*, 2020).

Los anteriores trabajos se realizaron con vehículos instrumentados expofeso para mediciones de temperatura a nivel del dosel urbano. Recientemente se empiezan a utilizar los datos de temperatura obtenidos por los termómetros instalados de fábrica en automóviles (Anderson, *et al.*, 2012; Mahoney y O'Sullivan, 2013; Bell, *et al.*, 2021; Marqués, *et al.*, 2022), desde luego mediante ajustes y correcciones

resultantes de comparaciones con estaciones fijas y la aceptación voluntaria de los automovilistas, preservando su privacidad.

En México el método de recorridos o transectos por medio de automóvil instrumentado expofeso se ha utilizado en 16 estudios distribuidos en nueve ciudades de los cuales únicamente uno es sitio costero, Tampico (Tabla 1).

En este artículo se analizará la ICU a partir de dos campañas de recorridos con vehículos: la primera abarcó de junio a septiembre de 2012 en el sitio costero de Coatzacoalcos; la segunda, en el sitio montañoso de Emiliano Zapata de agosto a noviembre de 2018. Las características de los sitios y de las campañas de mediciones se detallan en la

Tabla 1. Publicaciones arbitradas sobre mediciones o detección de la ICU atmosférica (dosel y capa límite) en México por medio de recorridos o transectos móviles.

Autor	Ciudad o entidad federativa	Periodo de mediciones	Horario de mediciones	Intensidad máxima de la ICU (°C)
Jáuregui, 1971	Ciudad de México	1968-1969	4-6 y 21-23hrs	4 – 5
Jáuregui, 1975	Ciudad de México	1970-1972	Al amanecer y durante la noche	5
Jáuregui, 1979	Toluca	2/02/1977	4-6 y 22:30-24hrs	4 – 5
Vidal y Jáuregui, 1991	Toluca	Octubre/1990	23-2 hrs	6
Cervantes <i>et al.</i> , 2000	Villahermosa	Junio-Agosto/ 1997	22hrs	2.7
Cervantes <i>et al.</i> , 2001	Xalapa	Junio y octubre/1998	18hrs	1.5-2.5
Evans y De Schiller, 2005	Tampico	6/06/2005	20-21hrs	4
Fuentes, 2014	Tampico	Enero-Agosto/ 2012	20-21hrs	9.4
Rosas <i>et al.</i> , 2016	Tampico	23/09/2015	9, 12, 15 y 18hrs	2.5
Mercado y Marincic, 2017	Hermosillo	26, 29 y 30 de agosto/2015	8-9, 13-14 y 21-22 hrs	11.5
Balderas, 2018	Puebla	28/02/1997 y 11/05/1998	3-6hrs	3
Flores <i>et al.</i> , 2018	Torreón	7/12/2016	9-17hrs	4
Noh <i>et al.</i> , 2018	Puebla	No se especifica	6-9, 12-15 y 18-21 hrs	5
Rosas, 2019	Zona Metropolitana de Tampico	22/08/2016	20-22 hrs	3
Sánchez <i>et al.</i> , 2019	Atlixco	Junio y octubre/2018	No se especifica	5.5
Mercado, 2022	Hermosillo	25/08/2015 y agosto/2020	9, 15 y 21hrs	7

Tabla 2. En la Figura 1 se muestra la ubicación de los puntos de medición.

Para ambos trayectos se utilizaron vehículos de motor a gasolina. Los equipos de medición fueron calibrados antes de las campañas de mediciones y posteriormente instalados lo más lejos posible del motor para que el calor que emite no alterara las mediciones. Los sensores fueron programados para registrar cada minuto. En cada punto de medición se consideró un tiempo de espera de 10 minutos para estabilizar los sensores y se registró la temperatura correspondiente al minuto número 10; posteriormente se avanzó al siguiente punto, y así sucesivamente. En Coatzacoalcos se utilizó un HOBO U10-003 (Figura 2a) y en Emiliano Zapata (Figura 2b) una estación meteorológica portátil Kestrel 4500.

Las mediciones se efectuaron en los horarios indicados en la Tabla 2, para evitar las horas en que se presentan la temperatura mínima y la máxima, pues alrededor de ellas no es posible identificar una tendencia clara al enfriamiento nocturno o vespertino ni al calentamiento matutino, tendencia que es necesario conocer para emular mediciones simultáneas de las temperaturas, como se explicará más adelante. Además se evitaron las horas de mayor tránsito vehicular, coincidentes aproximadamente con las horas de ocurrencia de las temperaturas extremas diarias. No se realizaron recorridos nocturnos en Emiliano Zapata para evitar problemas de inseguridad.

En ambos sitios se hicieron correcciones a las temperaturas medidas: a) por la tendencia térmica durante los recorridos, y b) por diferencias altitudinales entre los puntos de medición.

Tabla 2. Características de los dos sitios de estudio.

	Coatzacoalcos	Emiliano Zapata
Ubicación	Costero	Montañoso
Altitud (msnm)	10	1219
Población (miles)	320	20
Superficie (km ²)	310	3
Periodo de campaña	Junio a septiembre de 2012	Agosto a noviembre de 2018
Días de mediciones	18	10
No. de puntos de muestreo térmico móvil	23	13
Trayecto de recorrido (km)	32	9
Hora de inicio del muestreo móvil	11 o 20 horas	9 o 16:30 horas



Figura 2. Vehículos equipados para los recorridos en: a) Coatzacoalcos y b) Emiliano Zapata.

Puesto que la primera y la última medición de cada recorrido se tomaron en el mismo punto cerrando un circuito, se obtuvo la tendencia térmica temporal durante el recorrido y fue aplicada para corregir las temperaturas de modo que sus valores se aproximaran a los que se habrían obtenido si las mediciones hubiesen sido simultáneas, con el procedimiento siguiente:

$$T_{j\text{corregida}} = T_j + \left(\frac{T_f - T_i}{\Delta t} \right) \Delta t_j \quad (1)$$

Donde:

T_i es la temperatura registrada en la primera medición.

T_f es la temperatura registrada en última medición del recorrido.

T_j es la temperatura registrada en el j -ésimo punto de medición.

Δt es el tiempo transcurrido en minutos entre la primera y la última medición.

Δt_j es el tiempo transcurrido en minutos entre la primera y la j -ésima medición.

También se aplicó una corrección por altitud (ΔZ) para eliminar el efecto del gradiente vertical de temperatura:

$$\Delta Z = (Z_x - Z) \left(\frac{\Delta T}{\Delta Z} \right) \quad (2)$$

Donde Z_x es la altitud mayor de todas las estaciones termohigrométricas móviles y Z es la altitud registrada en cada una de las estaciones; $\frac{\Delta T}{\Delta Z}$ es el gradiente vertical de temperatura troposférico de -6.5 °C/km, es decir, -0.0065 °C/m (Stull, 2000, p. 54):

A cada dato de temperatura proveniente de los recorridos se le aplicó el ajuste por altitud y el ajuste por la tendencia térmica temporal.

La información se integró en el Sistema de Información Geográfica QGIS 3.22. Para la representación espacial térmica se seleccionó el método de interpolación Kriging ordinario, debido a la confiabilidad que se le ha atribuido en diversos trabajos (por ejemplo, Appelhans *et al.*, 2015; Shtiliyanova *et al.*, 2017; Yadav y Sharma, 2018).

Uno de los elementos meteorológicos que pueden interferir en el desarrollo de la ICU es la intensidad del viento cuando supera una velocidad crítica (V_{crit} en m/s), que Oke (1976) propuso como función del número de habitantes (P) en ciudades de Estados Unidos:

$$V_{crit} = 3.06 \log P - 6.79 \text{ m/s} \quad (3)$$

A falta de una parametrización adecuada a ciudades de México o de la zona de estudio, se usó la expresión anterior. Las V_{crit} , calculadas para Coatzacoalcos y Emiliano Zapata fueron de 10.1 m/s y 6.4 m/s, respectivamente. Con datos de vientos del observatorio del Servicio Meteorológico Nacional localizado en Xalapa, para Emiliano Zapata, y de Coatzacoalcos, se comprobó que para las fechas y horas de los recorridos no se superó el valor de la V_{crit} , con valores de 6 y 4.3 m/s, respectivamente, por lo que los datos de temperatura obtenidos en este trabajo son representativos de la ICU.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron 18 y 10 recorridos para los sitios costero y montañoso, respectivamente. Se consideraron diversas condiciones meteorológicas, por ejemplo, cielos despejados, parcialmente nublados, previo a un frente frío o a una onda tropical.

Para identificar la intensidad de la ICU se utilizó la propuesta de Fernández-García (1995, p. 264): isla débil (menor a 2 °C), moderada (entre los 2 °C y por debajo de 4 °C), fuerte (entre 4 °C y 6 °C) y muy fuerte (por arriba de 6 °C).

Sitio costero

De junio a septiembre de 2012, en la ciudad de Coatzacoalcos, se realizaron 18 recorridos, 3 durante el día y 15 en la noche, con un trayecto aproximado de 32 kilómetros cada uno y una duración en promedio de dos horas treinta minutos, siguiendo una dirección de oeste a este partiendo del malecón de la ciudad, paralelo a la línea de costa, pasando por la zona turística y comercial, la zona habitacional e histórica y la periferia, para finalmente retornar al punto de partida.

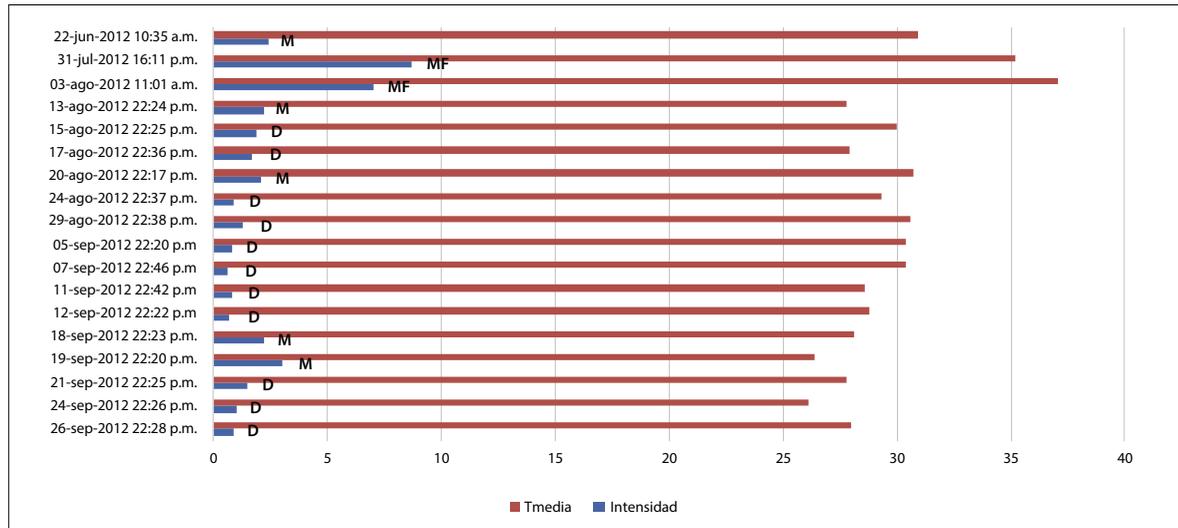


Figura 3. Temperatura media (T_{media}) e intensidad de la ICU ($^{\circ}\text{C}$) en Coatzacoalcos, junio a septiembre de 2012. Se indica a la izquierda la hora de inicio y final de cada recorrido y en el extremo de la barra de intensidad, su categoría: D: débil, M: moderada, F: fuerte y MF: muy fuerte.

De los 18 recorridos, once ICU se catalogaron con intensidad débil, mientras que cinco de intensidad *moderada* (Figura 3), tres de ellos ocurrieron en recorridos diurnos. Además, dos casos de intensidad *muy fuerte* con 7°C (3 de agosto 2012) y 8.7°C (31 de julio 2012). Si bien se trata de una muestra pequeña (18 recorridos) es de notar en la Figura 3 la relación directa entre la temperatura media de cada recorrido y la intensidad de la ICU, con un coeficiente de correlación lineal de 0.76.

En la Figura 4 se muestra un segmento del trayecto diurno donde se aprecia notablemente el perfil térmico de acuerdo al uso de suelo, iniciando en el Malecón, pasando por el Parque Central Miguel Hidalgo, ubicado en el centro de la ciudad de Coatzacoalcos, llegando a la zona céntrica y comercial y terminando a los alrededores de amplios espacios con vegetación (Club Campestre, estadios de béisbol y fútbol y una zona boscosa de instalaciones de PEMEX). Se destaca la diferencia de 4.2°C de temperatura entre la zona comercial y las afueras del Parque Central a una distancia en la horizontal de alrededor de 500 metros.

Los mapas de isotermas de la Figura 5 indican que las mayores intensidades de la ICU pueden

presentarse tanto durante el día como durante la noche. Se aprecia que durante el día en los sectores urbanos con actividades comerciales y de servicios, se localizan los puntos más cálidos, mientras que en las noches son más fríos. La diferencia térmica en la noche alcanza los 3°C .

Sitio montañoso

Se debe recordar que el municipio de Emiliano Zapata se sitúa en la periferia de Xalapa, y que durante la última década ambos han tenido un crecimiento inmobiliario tal que se han conurbado.

Durante la última parte del verano y el otoño de 2018 se realizaron un total de 10 recorridos diurnos; la mitad empezando a las 9 horas y la otra, a las 16:30 horas. Aplicando los criterios de Fernández-García (1995), se tiene que en todos los casos la intensidad de la ICU es *débil*, con las intensidades máximas de la ICU diurna los días 3 y 19 de septiembre de 2018, con 1.9°C y 1.7°C , respectivamente (Figura 6). El día 3 de septiembre estuvo parcialmente nublado con periodos prolongados de sol, previo a la entrada de la onda tropical número 35 de ese año, mientras que para el día 19 de septiembre, se presentó un sistema de alta presión en el Golfo de México (PC-CEEC, 2021)

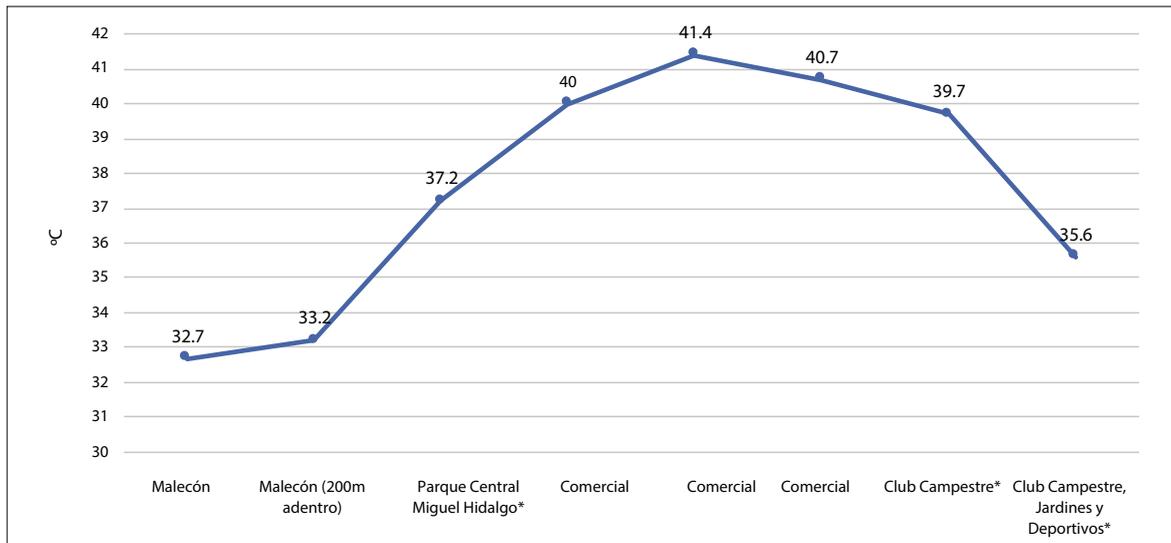


Figura 4. Temperatura ambiente (°C) en diferentes usos de suelo. Segmento del transecto diurno del 31 de julio de 2012 en Coatzacoalcos, de 16:30 a 17:15 horas; * indica que la medición se realizó en las cercanías y no en el centro del lugar señalado.

Ambos casos presentan una configuración concéntrica donde las máximas temperaturas se registraron en los fraccionamientos Bugambilias y La Pradera, los cuales tienen una mayor densidad de población y una mayor infraestructura comercial que el resto de los sectores monitoreados. El “sector frío” se ubica en la parte sureste del sitio de estudio, en el fraccionamiento Cascadas, cuya densidad de población y área construida es menor al resto del área estudiada, con la presencia de una zona boscosa.

La Figura 7 muestra la temperatura media de cada recorrido y la intensidad de la ICU; la temperatura más alta fue de 25.6 °C el 13 de septiembre de 2018 y el de más baja el 28 de noviembre con 17.7 °C. No obstante, las intensidades de la ICU variaron muy poco de 1.2 a 1.9 °C, de modo que, a diferencia de Coatzacoalcos, la correlación lineal entre temperaturas de los recorridos y la intensidad de la ICU es muy baja, de apenas 0.30.

CONCLUSIONES

El presente trabajo se suma a una serie de publicaciones recientes que muestran que la técnica de

recorridos para detectar la ICU sigue vigente, ya sea utilizando vehículos automotores (Kim *et al.*, 2019; Kousis *et al.*, 2021; Jaiswal *et al.*, 2023), bicicleta o motoneta (Sun *et al.*, 2019; Romero *et al.*, 2021), o caminando (Tsin *et al.*, 2016; Pigliautile y Pisello, *et al.*, 2018; Pioppi *et al.*, 2020). Además, se empiezan a utilizar los datos de temperatura obtenidos por los termómetros instalados de fábrica en automóviles (Anderson, *et al.*, 2012; Mahoney y O’Sullivan, 2013; Bell, *et al.*, 2021; Marqués, *et al.*, 2022). Como se mostró en la Tabla 1, en México el método de recorridos se ha utilizado en 16 estudios distribuidos en nueve ciudades, solo una de ellas costera (Tampico) además de Coatzacoalcos.

De los resultados se infiere que el tipo de superficie, los sistemas meteorológicos presentes durante las mediciones y el tamaño de la urbanización son determinantes en la intensidad de la ICU dentro del dosel urbano.

En el sitio costero un anticiclón parece favorable para el desarrollo de la ICU, no así en situaciones de perturbaciones meteorológicas importantes que inducen que la ICU sea de carácter débil (diferencias térmicas menores a los 2 °C).

En este sitio en el litoral en los trópicos, con una densidad de población de 1000 habitantes/km²,

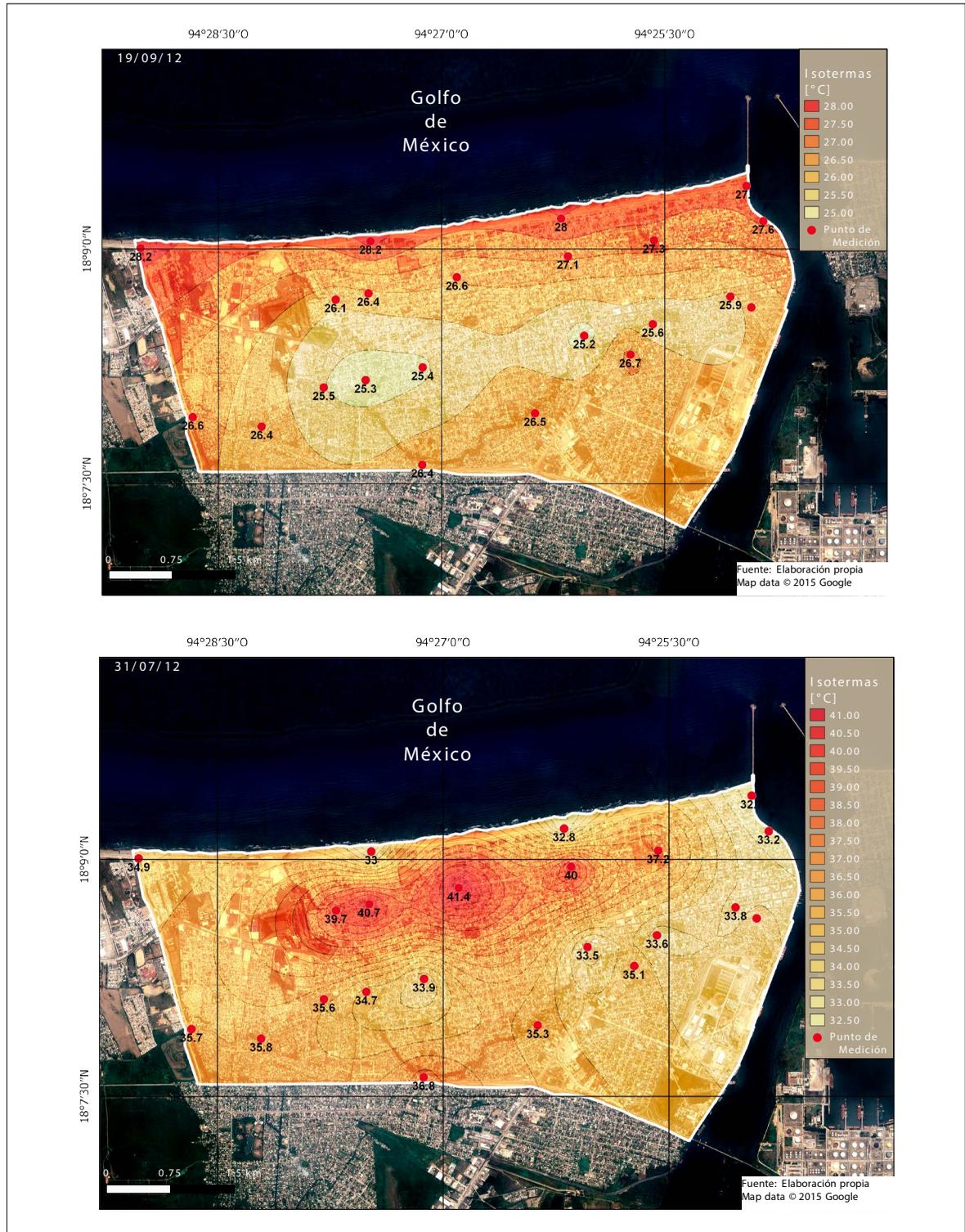


Figura 5. Isla de calor urbana diurna, Coahuila de Zaragoza 31 de julio de 2012 (superior); isla de calor urbana nocturna. 19 de septiembre de 2012 (inferior).

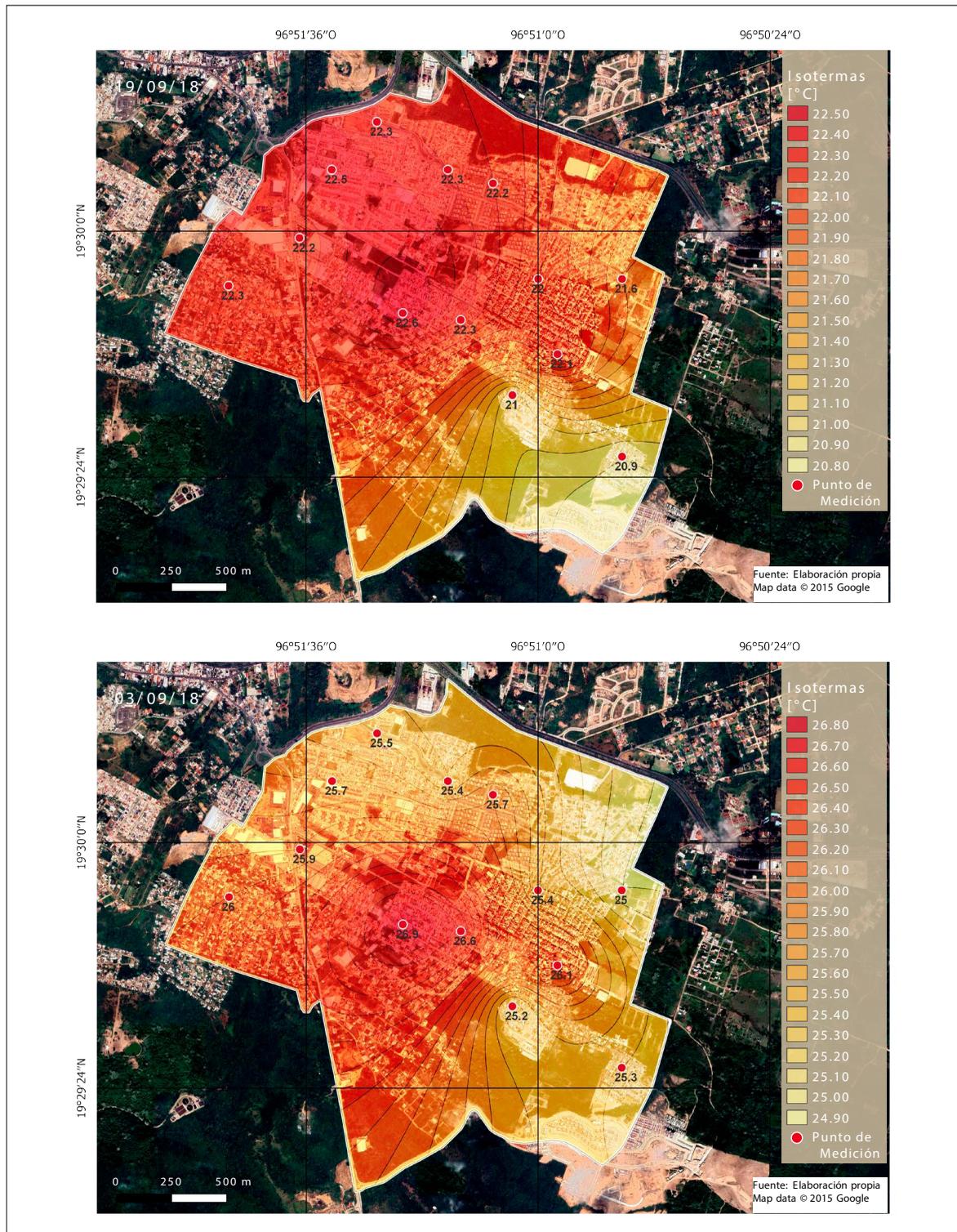


Figura 6. Mapa térmico dentro del dosel 3 de septiembre 2018 (17:00 horas) en Emiliano Zapata, con un ΔT de 1.9 °C (superior); 19 de septiembre de 2018 (16:40 horas), con un ΔT de 1.7 °C (inferior).

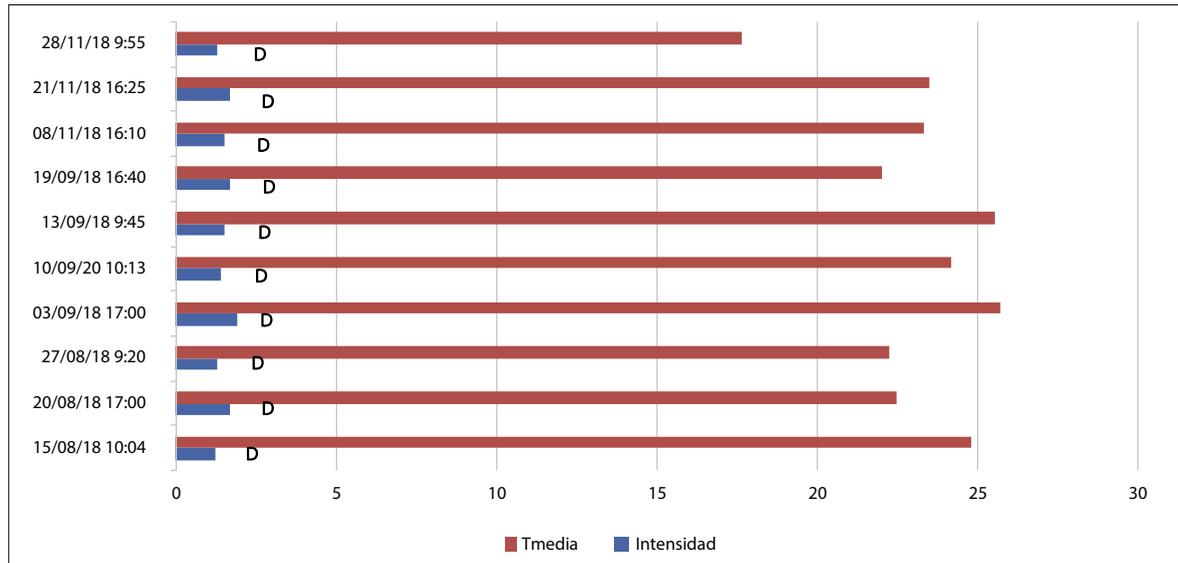


Figura 7. Temperatura media (T_{media}) e intensidad de la ICU ($^{\circ}\text{C}$) en Emiliano Zapata, agosto a noviembre de 2018. Se indica a la izquierda la hora de inicio y final de cada recorrido y en el extremo de la barra de intensidad, su categoría: D: débil, M: moderada, F: fuerte y MF: muy fuerte.

se encontró una ICU diurna hasta de 8.7°C , y la ICU nocturna puede alcanzar una diferencia térmica de 3°C .

Aun cuando el sitio montañoso, Emiliano Zapata, tiene un área y población 10:1 respecto al sitio costero, sí presenta ICU. Para este segundo caso, la ICU se corresponde con lo señalado en la literatura, con una mayor temperatura en la zona urbana céntrica, en las localidades de La Pradera y Jacarandas, en comparación con sus alrededores donde predominan áreas con vegetación. La intensidad es débil en promedio de 1.5°C .

Las intensidades máximas de la ICU aquí mostradas no se corresponden con la estimación estadística propuesta por Tejeda-Martínez y Jáuregui-Ostos (2004) para ciudades latinoamericanas:

$$ICU_{m\acute{a}x} = 2 \log_{10}P - 8^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

que al aplicarla a Emiliano Zapata (20 000 habitantes) arroja una ICU máxima de 0.61°C y de 3.0°C para Coatzacoalcos (320 000 habitantes), cuando los resultados experimentales son tres veces mayores. Quizás la explicación de este comportamiento se encuentre en los altos porcentajes

de áreas construidas. En Emiliano Zapata el 75% es de uso habitacional, 3% de uso industrial, 6% se encuentra en construcción y el 16% de áreas verdes (Lino, 2019); para el caso de Coatzacoalcos, específicamente para el área urbanizada, el uso residencial cubre el 68.3%; uso comercial y de equipamiento, el 18%; áreas verdes, el 4.2%; predios vacantes, un 5.7% y el uso de suelo mixto, el 3.8% (BID, 2019).

También debe tomarse en cuenta que la ecuación 4 es válida para las intensidades máximas de la ICU en la capa límite, y las mediciones mediante recorridos corresponden claramente al interior del dosel urbano.

Se debe reconocer que el análisis de solo la temperatura del aire es limitado, porque hay muchos otros factores que influyen en la génesis y evolución de la ICU, como el viento y la humedad atmosférica, así como las emisiones de calor antropogénico.

Con base en los resultados y la experiencia obtenida en el desarrollo de este trabajo, se recomienda continuar con las mediciones para ampliar el periodo de estudio de la ICU y durante otras épocas del año, a fin de tener una caracterización más detallada. Si bien los recorridos han demostra-

do ser un método útil para mediciones de la ICU dentro del dosel urbano, la ubicación de una red relativamente densa de estaciones fijas sobre azoteas podría ahondar el análisis, y así tener al menos dos niveles de detección de la ICU; las imágenes satelitales en infrarrojo podrían complementar el análisis para obtener una representación del fenómeno en tres niveles.

AGRADECIMIENTOS

A J. Omar Castro Díaz y Aranza Baruch Vera, por el apoyo en la elaboración y edición de las figuras. Adrián Álvarez Pérez (QED) y Diego Villegas de la Portilla, de la Licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana (UV), en Xalapa, apoyaron en la campaña de mediciones en Emiliano Zapata, y Elías Linderman Gerónimo, de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la UV, Coatzacoalcos, en la campaña de Coatzacoalcos.

REFERENCIAS

- Anderson, A. R. S., Chapman, M., Drobot, S. D., Tadesse, A., Lambi, B., Wiener, G. y Pisano, P. (2012). Quality of mobile air temperature and atmospheric pressure observations from the 2010 development test environment experiment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 691-701. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0126.1>
- Appelhans, T., E. Mwangomo, D. R. Hardy, A. Hemp y T. Nauss. (2015). Evaluation machine learning approaches for the interpolation of monthly air temperature at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Spatial Statistics*, 14(1), 91-113. <https://doi.org/10.1016/j.spa.2015.05.008>
- Bell, Z., Dance, S. L. y Waller, J. A. (2021). Exploring the characteristics of a vehicle-based temperature dataset for convection-permitting numerical weather prediction. *arXiv*, 28 pp. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.12526>
- Balderas, G. (2018). Efectos climáticos de la urbanización en la zona metropolitana de Puebla, 69-95. En N. Santillán y R. García-Cueto. *Ambiente urbano 2050*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Balchin, W.G.V. y N. Pye (1947). A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73, 297-323. <https://doi.org/10.1002/qj.49707331706>
- BID. (2019). *Coatzacoalcos, Ciudad marítima en equilibrio socioambiental. Territorio integrado, resiliente y equitativo*. Banco Interamericano de Desarrollo, Gobierno del municipio de Coatzacoalcos, Banobras y Colef.
- Cervantes, J., Barradas, V., Tejeda, A., Angulo, Q., Triana, C. y Gutiérrez, G. (2000). Aspectos del clima urbano de Villahermosa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*. 16(31), 10-18.
- Cervantes, J., Barradas, V., Tejeda, A. y Pereyra, D. (2001). Clima urbano, bioclima humano, hidrología y evaluación de riesgos por hidrometeoros en Xalapa. En C. Capitanachi E. Utrera, y C. B. Smith (Coords.), *Unidades ambientales: bases metodológicas para la comprensión integrada del espacio urbano*. (pp. 1-54). Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C.
- Colunga, M., Cambrón, V., Suzán, H., Guevara, A., y Luna, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Queretaro city, Mexico. *Atmósfera*. 28(3):205-218. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.05>
- Cui, Y. y De Foy, B. (2012). Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5):855-868. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0104.1>
- Evans, J.M. y De Schiller, S. (2005). La isla de calor en ciudades con clima cálido-húmedo. El caso de Tampico, México. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 9, 37-42.
- Fernández-García, F. (1995). *Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente y Planificación*. Editorial Síntesis.
- Flores, J. L., Villanueva, J., y Quiroa, J. A. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón. México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2): 123-140. <https://doi.org/10.15359/rca.52-2.7>
- Frisinger, H. H. (1977). *The History of Meteorology to 1800*. American Meteorological Society.
- Fuentes, C. A. (2014). Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 13(7), 495-515.
- Galindo, I. (2009). *A satellite time slots climatology of the urban heat island of Guadalajara Megacity in Mexico from NOAA/AVHRR THERMAL infrared monitoring*. European Geosciences Union General Assembly. EGU.
- García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, adaptado para las

- condiciones de la República Mexicana (3ª. ed.). Offset Lario.
- García-Cueto, O. R., Jáuregui, E. D., Toudert, O., y Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., Mexico and its relationship with land use. *Atmósfera* 20(2), 111-131.
- González, V. (1988). *La expedición científica de Malaspina en Nueva España, 1789-1794*. El Colegio de México.
- Howard, L. (2006). *The Climate of London* (edición facsimilar a partir de los 3 volúmenes de 1833). International Association for Urban Climate.
- Jaiswal, N., Deb, S. K., Panda, S. K., Mandal, A. K., Khan, A. W., y Kishtawal, C. M. Estimation of intra-urban thermal variability in Ahmedabad city using moving vehicle transects. *Journal of Earth System Science*, 132, 41. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02063-8>
- Jáuregui, E. (1971). *Mesomicroclima de la Ciudad de México*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Jáuregui, E. (1975). El microclima del Bosque de Chapultepec. *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM*, 6, 63-72.
- Jáuregui, E. (1979). La isla de calor en Toluca, México. *Boletín del Instituto de Geografía-UNAM*, 9, 27-37.
- Kim, Y.-J., Kim, B.-J., Shin, Y.-S., Kim, H.-W., Kim, G.-T., y Kim, S.-J. (2019). A case study of environmental characteristics on urban road-surface and air temperatures during heat-wave days in Seoul. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 12(4), 261-269. <https://doi.org/10.1080/16742834.2019.1608791>
- Kousis, I., Pigliatile, I. y Pisello, A. (2021). Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Scientific Report*, 11, 9732. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88344-y>
- Lino, J. J. (2019). *Detección y caracterización espacial de la isla urbana de calor en la zona periferia de la ciudad de Xalapa en el municipio de Emiliano Zapata, Veracruz*. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad Veracruzana, México.
- Mahoney, W. P. III, y O'Sullivan, J. M. (2013). Realizing the potential of vehicle-based observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 1007-1018. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00044.1>
- Marqués, E., Masson, V., Naveau, P., Mestre, O., Dubreuil, V. y Richard, Y. (2022). Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, E1098-E1113. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0174.1>
- Mercado, L., y Marincic, I. (2017). Morfología de isla de calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, XIX E3), 27-33. <https://doi.org/10.18633/biociencia.v19i0.407>
- Mercado, L. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades*, 11, 85-110. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.187>
- Moreno y Anda, M. (1895). Comparación de los climas de México y Tacubaya. *Memorias de la Sociedad Científica "Antonio Alzate"*, tomo IX, 1895-1896, pp. 397-407.
- Moreyra-González, L. E., Tejeda-Martínez, A., y Elías-López, P. (2022). Islas urbanas de calor atmosférica y superficial en Guadalajara, México. Manuscrito inédito.
- Noh, K., Fernández, M., Sánchez, A. y Teutli, M. (2018). Evaluation of urban heat island for Puebla City, Mexico. *Sustainable Development and Planning*, 217, 867-879. <https://doi.org/10.2495/SDP180731>
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14, 268-277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. (1984). Methods in urban climatology. En W. Kirchofer, A. Ohmura, y H. Wanner, (Eds.) *Applied Climatology* (pp. 19-29). ETH Geog. Instit.
- Oke, T. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. En J. Cermak, A. Davenport, E. Plate y D. Viegas. *Wind climate in cities* (pp. 81-107). Springer.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., y Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- PC-CEEC. (2021). Archivos de Boletín meteorológico matutino y vespertino. Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Estado de Veracruz-Coordinación del Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos. <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- Pepler, A. (1929). Das auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. *Zeitschrift für angewandte Meteorologie*, 46, 305-308.
- Pigliatile, I., y Pisello, A. L. (2018). A new wearable monitoring system for investigating pedestrians' environmental conditions: Development of the experimental tool and start-up findings. *Science of the Total Environment*, 630, 690-706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.208>
- Pioppi, B., Pigliatile, I., y Pisello, A. L. (2020). Data collected by coupling fix and wearable sensors for addressing urban microclimate variability in an historical Italian city. *Data in brief*, 29, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105322>
- Riquelme, D. (1968). Microclimas del área metropolitana de la Ciudad de México. *Anuario de Geografía*, 8, 103-105.

- Romero, L., Sánchez, J., Sánchez de la Flor, F. J., y Álvarez, S. (2021). Analyzing the urban heat island: Comprehensive methodology for data gathering and optimal design of mobile transects. *Sustainable Cities and Society*, 55, 102027. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102027>
- Rosas, M. A., Bartorila, M. A. y Ocón, S. (2016). Laguna del Carpintero, regulador climático en el área urbana de Tampico, Tamaulipas, México. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 20, 113-124.
- Rosas, M. A. (2019). Islas de calor en la zona conurbada del Río Pánuco. *Architecture, City and Environment*, 13(39), 63-74. <https://doi.org/10.5821/ace.13.39.5359>
- Sánchez, A., Cruz, M. A., y Teutli, M. (2019). Valoración ambiental del centro histórico de Atlixco, Puebla. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 19(37), 151-168.
- Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities-Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Schmidt, W. (1927). Die Verteilung der Minimumtemperaturen in der Frostnacht des 12.5.1927 im Gemeindegebiet von Wien. *Fortschritte der Landwirtschaft*, 2, (H.21), 681-686.
- SEDATU (2020). *Programa de mejoramiento urbano. Municipio de Coatzacoalcos. Programa Territorial Operativo*. Gobierno de Veracruz-Municipio de Coatzacoalcos-Sedatu-Conavi-INSUS.
- Shtiliyanova, A., Bellocchi, G., Borrás, D., Eza, U., Martin, R., y Carrère, P. (2017). Kriging-based approach to predict missing air temperature data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 440-449. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.033>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2022). Normales Climatológicas 1981-2000. <https://smn.conagua.gob.mx>
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 200-217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stull, R. (2000). *Meteorology for scientists and engineers* (2a. ed.). Brooks/Cole.
- Sun, C.-Y., Kato, S., y Gou, Z. (2019). Application of low-cost sensors for urban heat island assessment: A case study in Taiwan. *Sustainability*, 11, 2759. <https://doi.org/10.3390/su11102759>
- Tejada-Martínez, A., Acevedo, F. y Jáuregui, E. (1989). *Atlas climático del estado de Veracruz*. Edit. Universidad Veracruzana.
- Tejada-Martínez, A. y Acevedo, F. (1990). Alteraciones climáticas por la urbanización en Xalapa, Ver. *La Ciencia y el Hombre*, 6, 37-48.
- Tejada-Martínez, A., y Jáuregui-Ostos, E. (2004). Cuatro décadas de climatología urbana en México. En M. Rodríguez-Viqueira (Ed.), *Estudios de Arquitectura Bioclimática* (vol. 6, pp. 163-178). LIMUSA- UAM Iztapalapa.
- Tsin, P. K., Knudby, A., Krayenhoff, E. S., Ho, H. C., Brauer, M., y Henderson, S. B. (2016). Microscale mobile monitoring of urban air temperature. *Urban Climate*, 18, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.001>
- Vidal, J., y E. Jáuregui. (1991). Evolución de la isla de calor en Toluca, Méx. Observatorio Geográfico América Latina. *Memoria del III Encuentro de Geografía de América Latina*. INEGI-UAEM.
- WMO (1970). *Urban Climates*. Technical Note No. 108 (vol. I). Geneva.
- Yadav, N., y Sharma, C. (2018). Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi. *Sustainable Cities and Society*, 37, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.026>