

Impacto microclimático de las propuestas de mejora urbana en el Centro Histórico de Mexicali, México

Alan García-Haro ¹ | David Alejandro Becerril Varela ²

Recibido: 14-11-2023 | Versión final: 06-06-2024

Resumen

En un contexto climático desértico, el uso del espacio público urbano se ve limitado por el estrés térmico causado por las altas temperaturas diurnas que naturalmente se registran en la región y el efecto de isla de calor urbana que se extiende con mayor énfasis hacia el periodo nocturno. Esta investigación evalúa la influencia microclimática de propuestas de diseño urbano en un espacio público en el entorno desértico del Centro Histórico de Mexicali, México, recientemente transformado para reinstaurarlo como punto de encuentro social y recreativo. Se establecieron tres etapas de análisis: 1) un análisis climático mediante teledetección para identificar variaciones térmicas espaciales; 2) un análisis detallado del comportamiento térmico de los elementos físicos a través de mediciones de campo, evaluando variaciones específicas de temperatura de aire y superficie; y 3) una evaluación climática de diferentes escenarios mediante simulación térmica con ENVI-met para analizar distintas estrategias de diseño urbano. Finalmente, en los resultados y conclusiones se discute la efectividad de las estrategias de diseño propuestas para mejorar el comportamiento climático de la zona, generando lineamientos para reducir el estrés térmico y promover el uso del espacio público en el contexto analizado.

Palabras clave: isla de calor; percepción remota; simulación térmica de exteriores; mediciones de campo

Citación

García-Haro & Becerril Varela (2024). Impacto microclimático de las propuestas de mejora urbana en el Centro Histórico de Mexicali, México. *ACE: Architecture, City and Environment*, 19(56), 12455. <https://doi.org/10.5821/ace.19.56.12455>

Microclimatic Impact of Urban Improvement Proposals in the Historic Center of Mexicali, Mexico

Abstract

In a desert climate context, the use of urban public space is limited by thermal stress caused by the high daytime temperatures naturally occurring in the region and the urban heat island effect that intensifies during the nighttime period. This research evaluates the microclimatic influence of urban design proposals in a public space in the desert environment of the Historic Center of Mexicali, Mexico, which has recently been transformed to reestablish it as a social and recreational meeting point. Three stages of analysis were established: 1) a climatic analysis through remote sensing to identify spatial thermal variations; 2) a detailed analysis of the thermal behavior of physical elements through field measurements, evaluating specific variations in air and surface temperature; and 3) a climatic evaluation of different scenarios through thermal simulation with ENVI-met to analyze various urban design strategies. Finally, the results and conclusions discuss the effectiveness of the proposed design strategies in improving the climatic behavior of the area, generating guidelines to reduce thermal stress and promote the use of public space in the analyzed context.

Keywords: urban heat island; remote sensing; outdoor thermal simulation; field measurements

¹ Arquitecto, Profesor-investigador (ORCID: [0000-0002-4302-6492](https://orcid.org/0000-0002-4302-6492)); ² Dr. Arquitecto, Profesor-Investigador (ORCID: [0000-0002-1132-4524](https://orcid.org/0000-0002-1132-4524)). Universidad Autónoma de Baja California (ROR: <https://ror.org/05xwccq167>), Facultad de Arquitectura y Diseño. Correo de contacto: alan.haro@uabc.edu.mx

1. Introducción

El uso obligado de los espacios públicos urbanos para la movilidad peatonal en horarios donde las condiciones climáticas pueden ser nocivas para la salud de los usuarios representa uno de los principales problemas de planeación y diseño urbano de las ciudades desérticas. Si bien, las condiciones climáticas de frío y calor extremo son condicionantes del uso de los espacios públicos de numerosas ciudades alrededor del mundo, las muertes y afectaciones a la salud relacionadas con las altas temperaturas en exteriores urbanos, han sido referidas con mayor frecuencia en los últimos años (Ellena, Breil, & Soriani, 2020). Este problema se acentúa en contextos de una creciente isla de calor urbana y el aumento en la frecuencia e intensidad de los episodios extremos de olas de calor, agravados por el cambio climático global (Arellano-Ramos, y otros, 2022).

La adaptación de la vida en los espacios exteriores en estas ciudades va desde la adopción de hábitos y rutinas programadas en horarios de menor incidencia solar, hasta la definición de lineamientos urbanos y arquitectónicos para generar espacios climáticamente sensibles (González Álvarez & Del Caz, 2024). Si bien, desde los primeros asentamientos de estas poblaciones, las tipologías urbanas y arquitectónicas se vieron fuertemente influenciadas por la búsqueda de generar recorridos habitables y donde se redujera la vulnerabilidad al estrés térmico de los habitantes (Abufayed, Rghei, & Aboufayed, 2005; Yildirim, 2020), las ciudades contemporáneas con una fuerte presencia de vehículos motorizados, nuevamente requieren acudir a estrategias de transformación del medio edificado para sobrevenir las inclemencias del calentamiento en las ciudades.

En general, múltiples estudios han concluido que las ciudades desérticas se ven beneficiadas por las estrategias mitigantes del calentamiento de las ciudades de otros contextos climáticos. Donde la generación de sombra mediante árboles, la volumetría edificada o estructuras de cubiertas (Ahmadi Venhari, Tenpierik, & Taleghani, 2019; Colter, Middel, & Martina, 2019), así como la sustitución de acabados de suelo por otros de mayor albedo (Sen, Mendèz-Ruiz Fernández, & Roesler, 2020), son fundamentales en la reducción de temperatura y el estrés térmico en los espacios exteriores.

No obstante, las tendencias del desarrollo de los espacios públicos urbanos en las últimas décadas han revelado deficiencias en las consideraciones climáticas en su diseño y construcción (Jabareen, 2015; Norton, y otros, 2015). A menudo, se han priorizado aspectos funcionales de la movilidad motorizada, sobre la salud y el bienestar de la población, lo que ha llevado a la creación de entornos urbanos poco aptos para enfrentar las crecientes temperaturas extremas (Santamouris, 2020). La falta de planificación adecuada para mitigar el impacto del cambio climático en la vida urbana ha exacerbado los desafíos existentes, aumentando la exposición de la población a riesgos relacionados con el calor, como golpes de calor, deshidratación y problemas respiratorios (Hondula, Balling, Vanos, & Georgescu, 2015). En este contexto, la necesidad de adoptar enfoques holísticos y sostenibles en el diseño urbano se vuelve imperativa. Es fundamental integrar consideraciones climáticas desde las etapas iniciales de planificación, incorporando estrategias de diseño pasivo y activo, así como evaluando mediante modelos predictivos de simulación, los impactos que pudieran tener el conjunto de elementos que componen la propuesta.

1.1 Caso de estudio

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia microclimática de las transformaciones físicas de los espacios públicos urbanos del Centro Histórico de la ciudad de Mexicali, México. Zona de interés debido a las múltiples intervenciones que se han generado en años recientes como parte del proceso de regeneración urbana que busca reinstaurarla como punto de encuentro comercial, recreativo, cultural y social (Hernández, 2022). No obstante, debido a que la ciudad se encuentra inmersa en una región de clima desértico cálido [BWh, en la clasificación climática de Köppen-Geiger (Peel, Finlayson, & McMahon, 2007)], el uso de los espacios exteriores enfrenta desafíos relacionados con las elevadas temperaturas que naturalmente se presentan en la región y las cuales se espera que aumenten en aproximadamente 2°C hacia 2030 debido al cambio climático global (IPCC, 2023). Asimismo, el efecto de isla de calor urbana, que es ocasionado en gran medida por la predominante presencia de asfalto y la poca vegetación en la zona (Casillas-Higuera, García-Cueto, & Leyva-

Camacho, 2014), prolonga la liberación del calor almacenado por las superficies hasta horas después de la puesta de sol (Arellano & Roca, 2021), extendiendo la vulnerabilidad al estrés térmico hacia el periodo nocturno y reduciendo los periodos donde la población tenga la posibilidad de realizar actividades sociales y recreativas en estos espacios.

Con este propósito, el presente trabajo se planteó en tres etapas: 1) análisis climático mediante teledetección, donde se identificaron las variaciones térmicas espaciales usando imágenes de satélite; 2) análisis detallado del comportamiento térmico de los elementos físicos mediante mediciones de campo, evaluando las variaciones específicas de temperatura de aire y superficie; y 3) evaluación climática de diferentes escenarios mediante simulación térmica con el modelo ENVI-met.

El modelado y la simulación de escenarios permitieron analizar el impacto de las intervenciones realizadas y las propuestas en una fase inicial del proyecto. Lo que nos permite determinar el grado de eficiencia en el control microclimático de las intervenciones, definiendo así, aquellas cuyo comportamiento térmico actual, requiere estrategias de mejora para reducir el estrés térmico y promover el uso del espacio público en este contexto de clima desértico cálido.

2. Datos y métodos

Este trabajo se condujo mediante tres etapas de análisis: 1) un reconocimiento del comportamiento térmico de la zona mediante imágenes de percepción remota; 2) un estudio detallado del comportamiento térmico de los espacios físicos por medio de mediciones de campo; y 3) una evaluación climática de diferentes escenarios por medio de simulación térmica con ENVI-met.

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia con información del INEGI (2020) y Esri (2022).

2.1 Descripción del caso de estudio

El área de estudio está comprendida por la intersección entre la Av. Reforma y Calle José María Morelos, extendiéndose hacia el sur hasta la glorieta que interseca con la Av. Álvaro Obregón y Bulevar Adolfo López Mateos; en la Colonia Primera Sección, en el Centro Histórico de la ciudad de Mexicali, Baja California, México [32.6632°N, -115.4890°O]. La ciudad se encuentra ubicada en la frontera con Estados Unidos al norte del país, así como está inmersa dentro de la zona conocida como Desierto

de Sonora (Figura 1), una región climática desértica cálida, donde las temperaturas alcanzan máximas alrededor de los 45°C y mínimas alrededor de 5°C en periodos regulares de calor y frío respectivamente (Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, 2021).

2.2 Análisis mediante percepción remota

Con el objetivo de reconocer el comportamiento térmico general de la zona, se comparó la Land Surface Temperature (LST) de Landsat 8 OLI/TIRS de dos fechas distantes. Particularmente, se compararon las imágenes del 21 y 27 de marzo de 2022 contra las imágenes de 23 y 22 de marzo de 2013, ambos casos, diurna y nocturna respectivamente. Para su selección, se tomó la imagen más antigua con cielo despejado de la zona y su correspondiente fecha en el año más reciente.

La LST se calculó mediante el algoritmo de corrección de emisividad (Artis & Carnahan, 1982),

$$LST = \frac{T_B}{\left[1 + \left(\lambda \times \frac{T_B}{\alpha}\right) \ln \varepsilon\right]} - 273.15 \quad (1)$$

donde LST es en °C; T_B es la temperatura de brillo del sensor (°C) de la banda térmica-infrarroja 1 (TIRS1 – banda 10); λ es el ancho de onda de la banda TIRS1 (10.895 μ m); α es la constante de radiación de la superficie (1.4388 $\times 10^{-2}$ mK); ε es la emisividad de la superficie estimada mediante el método simplificado de límites de NDVI (Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini, 2004) aplicando los valores de (Stathopoulou, Cartalis, & Petrakis, 2006).

2.3 Registro microclimático mediante mediciones de campo

Con equipo portátil se registró la temperatura de aire (T_a) y superficies (T_s), en 20 puntos del área estudiada (Figura 1), el día 6 de mayo del 2022 entre las 15:30 y 16:31 y la noche después, el 7 de mayo entre las horas 00:10 a las 00:49hrs (hora local). Se utilizó el medidor de estrés térmico Extech HT30 y el anemómetro Extech 45118 ubicados a una elevación de 1.5m sobre el suelo para obtener las variables atmosféricas y una cámara termográfica Fluke TiS20 para registrar la temperatura de superficies con radiación directa de sol, bajo sombra y en la noche. Para su interpretación espacial, se elaboró un mapa de T_a para los registros de día y noche por medio de una interpolación de Ponderación de distancia inversa (IDW) en ArcGIS.

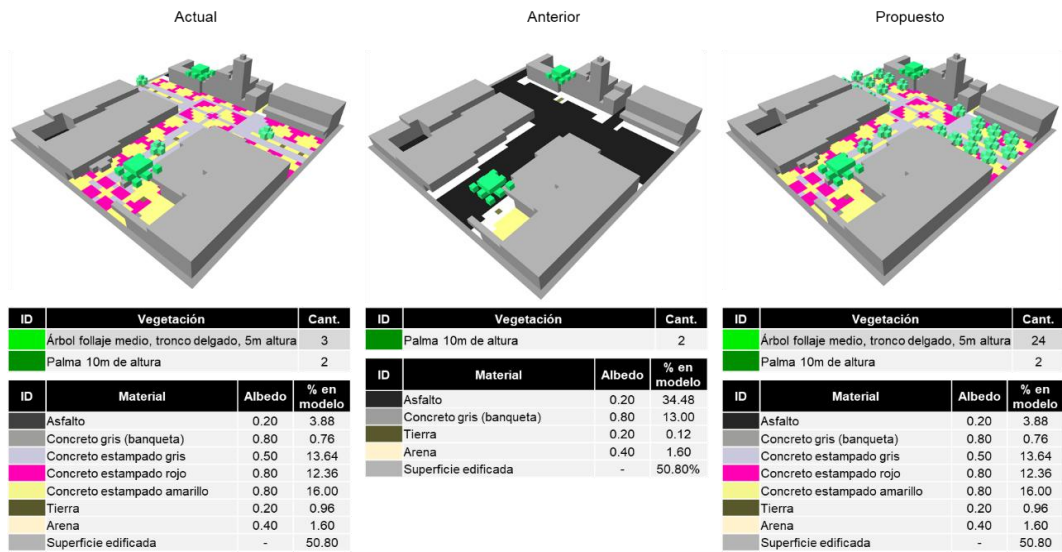
2.4 Modelado y simulación térmica de escenarios

La simulación térmica de los espacios exteriores se realizó mediante el modelo microclimático integrado de ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998). Donde se evaluaron 3 escenarios diferentes (Figura 2): 1) condiciones actuales; 2) características anteriores; y 3) escenario propuesto de mejora. Éstos se modelaron en un área cuadrangular de 100m por lado (Figura 1) y 2m por celda.

La simulación se efectuó para la misma fecha y hora de las mediciones de campo (6 y 7 de mayo de 2022), con los registros climáticos de la estación meteorológica más cercana con información disponible para dicho periodo (Sistema Meteorológico Nacional (SMN), 2022). En los tres escenarios, las edificaciones conservan las mismas características tipológicas y fueron modeladas con Concreto con aislamiento térmico moderado como material predominante. Mientras que los principales cambios entre escenarios corresponden a las superficies y vegetación de los espacios públicos urbanos.

Finalmente, se analizaron las imágenes de potencial temperatura de aire a 1.8m de altura. Tomando como referencia el corte de las 16:00hrs y 01:00hrs, para el periodo diurno y nocturno respectivamente.

Figura 2. Modelos de los tres escenarios simulados



Fuente: Elaboración propia en Spaces de ENVI-met.

Figura 3. Fotografías del estado actual del área de estudio



Fuente: Fotografías propias tomadas el 5 de mayo de 2022.

El modelo del escenario actual se realizó como una abstracción de las características físicas de los espacios identificadas mediante la visita de campo al sitio (Figura 3). Dicho espacio presenta la tipología arquitectónica de dos a tres niveles, encaminamientos peatonales cubiertos por los niveles superiores de las edificaciones, vialidades y banquetas de concreto estampado brillante de colores gris, amarillo y rojo; así como se observaron algunos árboles en el centro de las vialidades con una altura menor a cinco metros con un follaje de densidad media y dos palmas en diferentes banquetas del área. Por otra parte, sobre la Av. Reforma se encuentran unas cubiertas de malla montadas sobre una estructura de acero, dispersas a lo largo de la vialidad sobre los estacionamientos vehiculares.

En el modelo del escenario con las características anteriores, se recrean las condiciones previas a las transformaciones efectuadas a mediados de 2013. Donde predominaba el asfalto en vialidades y banquetas de concreto, así como se observa una pequeña porción de suelo desnudo y dos palmas en diferentes banquetas del área. (Figura 4).

Figura 4. Imágenes del área de estudio antes de intervención (2012)



Fuente: Imágenes tomadas de Gaspar (2012) y Google Inc. (2013).

El escenario propuesto está inspirado en el primer planteamiento que se hizo para el área de estudio. Donde se había dispuesto vegetación en diferentes líneas alrededor de las vialidades y andadores peatonales de los espacios descubiertos entre edificaciones. Como se puede observar en la imagen satelital de la zona en el año 2013 (Figura 5), este escenario incorporó 21 árboles más que el escenario actual, aunque conserva superficies y configuración arquitectónica de los espacios.

Figura 5. Imágenes de los primeros días después de terminada la intervención (septiembre de 2013)



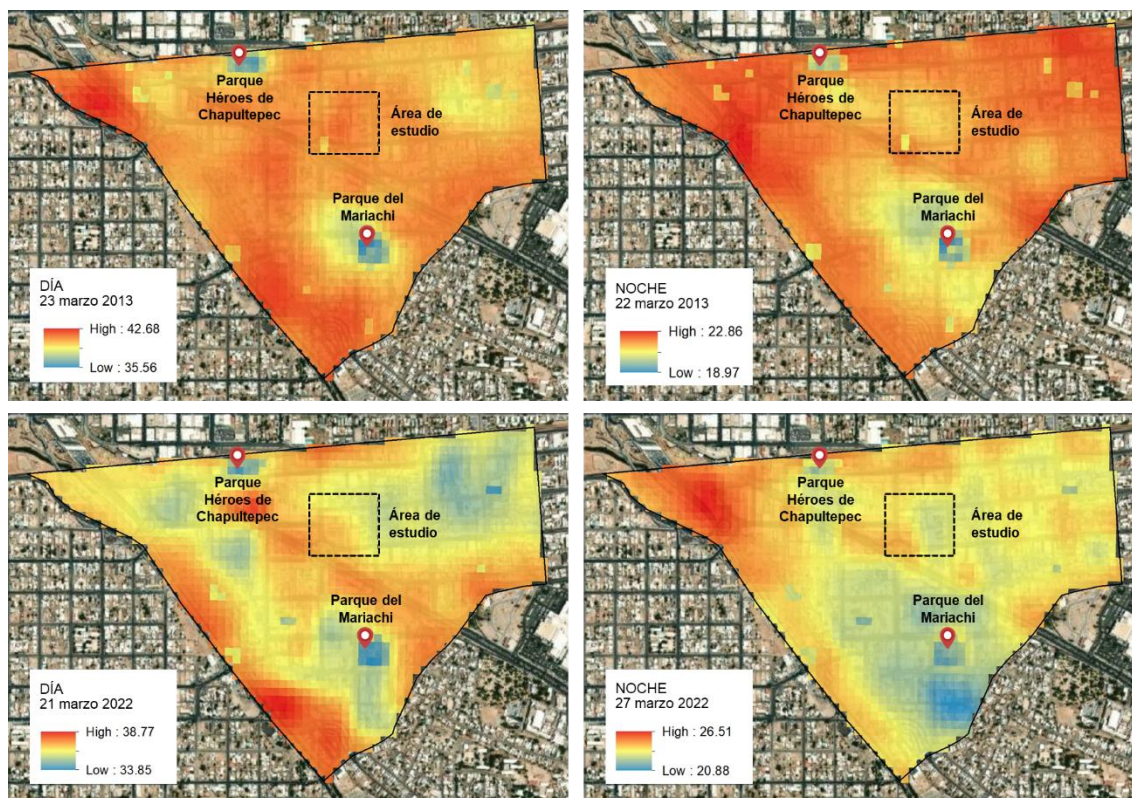
Fuente: Imágenes tomadas de Google Inc. (2013) y La Voz de la Frontera (2018).

3. Resultados

3.1 LST del Centro Histórico de Mexicali

Mediante la LST recuperada de Landsat 8, se identificó que las transformaciones físicas entre 2013 y 2022 han generado una reducción de temperatura en algunas zonas del Centro Histórico. Si bien, las condiciones atmosféricas pudieran haber influido en los valores máximos y mínimos de temperatura, las variaciones espaciales de LST expresan la expansión del efecto de enfriamiento, que, en 2013, se encontraba principalmente concentrado en los parques urbanos de la zona, y que ahora se extiende a lo largo de los diferentes espacios urbanos en el día y noche (Figura 6).

Figura 6. LST diurna y nocturna del Centro Histórico de Mexicali de 2013 y 2022



Fuente: Imágenes tomadas de Esri (2022) y U.S. Geological Survey (USGS, 2022).

En cuanto al área de estudio, se observa que en 2022 la temperatura se redujo en su límite este, entre la Av. Reforma y Av. Álvaro Obregón. Mientras que las altas temperaturas continúan concentrándose en la Calle Morelos, uno de los principales ejes de la transformación en el Centro Histórico. A partir de esto, se definen los puntos de medición para el análisis microclimático detallado.

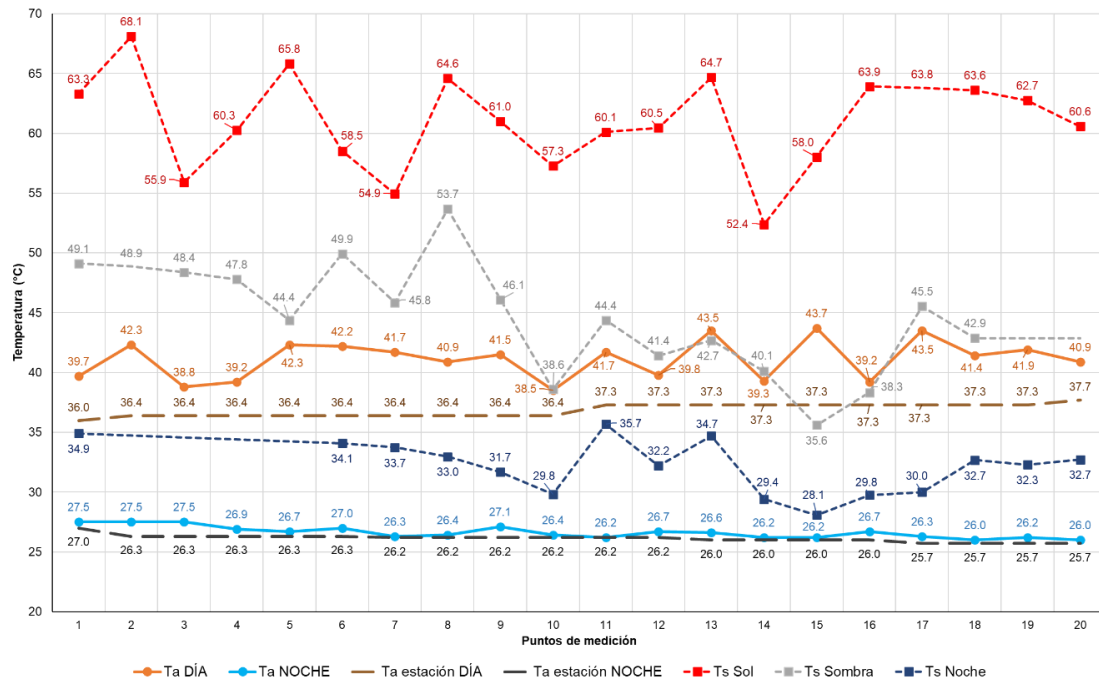
3.2 Registros micrometeorológicos

Las mediciones de campo registraron temperaturas de aire (T_a) entre los 38.5 y 43.7°C durante la campaña diurna, mientras que la noche presentó valores entre los 26.0 y 27.5°C (Figura 7). Se observó que durante la noche los valores de T_a oscilan próximos a los registrados por la estación meteorológica, lo que indica una relación similar entre las variaciones atmosféricas y el medio físico construido en ambos puntos durante la noche.

No obstante, durante el día se registró una diferencia máxima de T_a de 6.4°C más elevada que la de la estación en el punto 15, lo que indica un alto nivel de efecto de isla de calor en la zona de dicho punto.

Por su parte, la temperatura de superficie (T_s) media registró un rango entre los 52.4 y 68.1°C bajo sol, 35.6 y 53.7°C bajo sombra, así como 28.1 y 35.7°C durante la noche. Particularmente, la T_s media en sombra registró valores aproximados a la T_a a partir del punto 10, donde se pasaba de la C. Morelos a la Av. Reforma, mientras que los puntos anteriores registraron valores entre los 1.9 y 12.8°C más elevados que la T_a . Por otra parte, la T_s media nocturna registró valores que iban desde los 1.9°C hasta los 9.5°C arriba de la T_a . Esto evidenciando la acumulación de calor por las superficies del suelo en los diferentes puntos de medición, aunque también su baja influencia sobre las variables micrometeorológicas en la capa superficial de la atmósfera.

Figura 7. Temperaturas de aire y superficie registradas en las campañas de medición

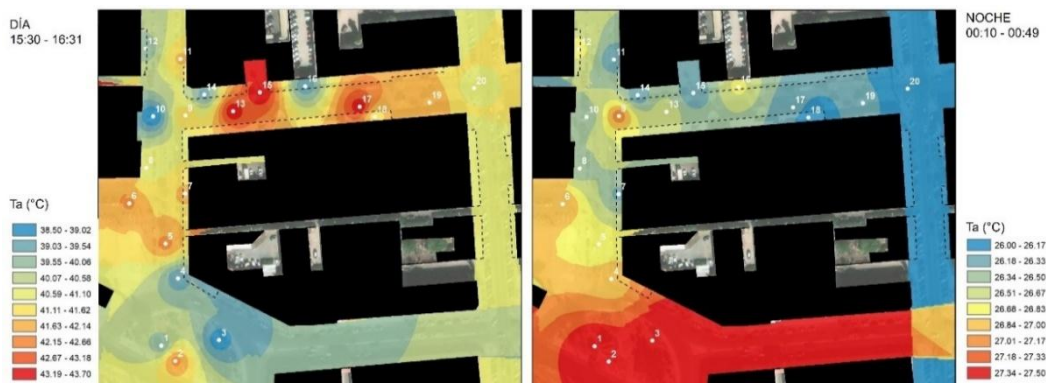


Fuente: Elaboración propia.

3.3 Variaciones espaciales de temperatura de aire

La T_a diurna registró variaciones espaciales heterogéneas entre los valores más elevados y bajos a lo largo de todo el transecto (Figura 8). De manera precisa, se puede observar que los puntos 10, 12, 14, 16 y 18 que se encuentran bajo la sombra de las edificaciones, registraron una caída de T_a con relación a sus puntos próximos. Asimismo, los puntos 1, 3 y 4, también registraron valores bajos, esto probablemente relacionado con la presencia de vegetación y su proximidad al cañón de viento proveniente de la Av. Álvaro Obregón al sureste del polígono. Por otra parte, los puntos 13, 15 y 17 sobre las zonas expuestas al sol de la Av. Reforma registraron las mayores temperaturas, seguidos por los puntos 5 y 6, ubicados en la intersección con la prolongación de la Av. Reforma al suroeste del polígono. En esta última zona, también se encuentra el punto 7, el cual se encuentra cubierto por la edificación en los niveles superiores, no obstante, al momento de la medición, el sol impactaba parcialmente las fachadas alrededor del punto, así como se encuentra próximo a los puntos ya mencionados con altas temperaturas.

Figura 8. Interpolación de mediciones de temperatura de aire



Fuente: Elaboración propia.

Durante la noche, las variaciones espaciales de T_a registraron un comportamiento más homogéneo que durante el día. Se puede observar la concentración de los puntos con valores más elevados sobre la glorieta de la intersección de la Calle Morelos con Av. Álvaro Obregón al sur del polígono. Dicha zona registra una alta presencia de asfalto de las vialidades mencionadas y el Bulevar Adolfo López Mateos. Asimismo, los puntos que registraron los valores más bajos se concentran principalmente sobre la Av. Reforma al centro del polígono. Donde los espacios están totalmente cubiertos por superficies de concreto estampado brillante, no hay presencia de asfalto y las edificaciones, con una altura promedio de 12m, cubren una proporción importante de superficie con sombra a lo largo del día, reduciendo la acumulación de calor en comparación de las calles al sur del polígono.

3.4 Comportamiento térmico de los materiales de superficie del suelo

Los materiales predominantes que conformaban los puntos de medición fueron el Concreto estampado brillante gris, rojo y amarillo. Si bien, existen algunas superficies de asfalto, concreto oscuro, entre otras; estas fueron las que se registraron de manera constante en la mayoría de los puntos de medición, así como ocupaban la mayor proporción de las superficies del suelo.

Dichos materiales, presentaron variaciones en cuanto a su posición con relación a la T_s (Tabla 1). Bajo el sol, la T_s máxima de los tres materiales la registró el concreto gris con 68.12°C, mientras que, durante la noche, el mismo material registró el más bajo con 24.84°C. En sol y sombra el concreto amarillo registra los valores más bajos de T_s , mientras que en la noche este material registra el valor más elevado de todos los puntos de medición. Finalmente, el concreto rojo registró la máxima T_s bajo sombra, mientras que no se posicionó como máximo o mínimo en sol o noche.

Tabla 1. T_s registrada bajo sol, sombra y noche por tipo de material

N=20 °C	Sol			Sombra			Noche		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min
Concreto estampado:									
Color gris	62.74	68.12	52.39	43.21	51.96	38.66	31.71	34.39	24.84
Color rojo	61.53	64.97	53.89	46.11	56.30	35.95	32.70	36.97	28.41
Color amarillo	58.46	64.56	50.73	44.23	53.25	35.25	32.40	37.33	28.07
T_s puntos (todos):	61.05	68.12	50.73	44.61	56.30	35.25	32.32	37.33	24.84

Fuente: Elaboración propia.

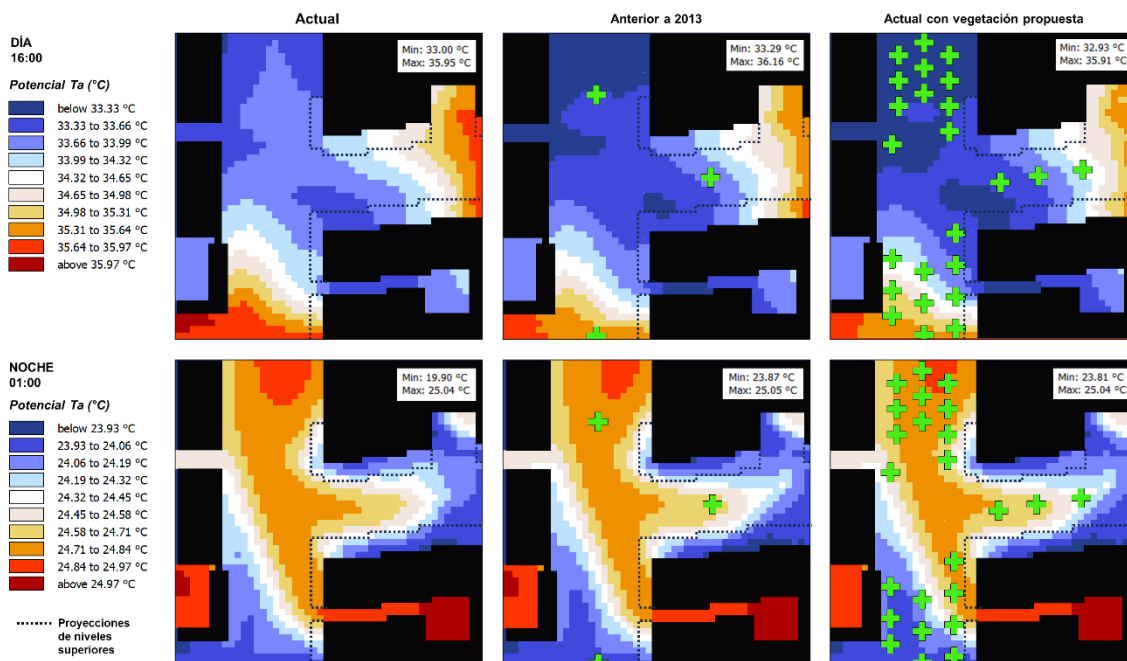
Tabla 2. Diferencia de T_s registrada entre sol, sombra y noche por tipo de material

N=20 °C	Ts Sol – Ts Sombra			Ts Sol – Ts Noche			Ts Sombra – Ts Noche		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min
Concreto estampado:									
Color gris	19.53	16.16	13.73	31.03	33.73	27.55	11.50	11.57	13.82
Color rojo	15.42	8.67	17.94	28.83	28.00	25.48	13.40	19.33	8.54
Color amarillo	14.23	11.31	15.48	26.06	27.23	22.66	11.84	15.92	7.18
T_s puntos (todos):	16.39	16.16	13.73	28.64	33.73	22.66	12.25	19.33	7.18

Fuente: Elaboración propia.

Se registró que el material con mayor capacidad de enfriamiento es el concreto estampado brillante gris (Tabla 2). Con una diferencia de T_s media de 19.53°C entre sol y sombra y 31.03°C entre sol y noche, supera a los otros materiales. No obstante, la mayor diferencia entre la T_s de sombra y noche corresponde al concreto estampado rojo con una reducción media 13.40°C. Por otra parte, el material que registró una menor capacidad de enfriamiento es el concreto amarillo. Si bien, dicha condición se relaciona con la T_s menor que registra en comparación de los otros materiales, aun así, registró la menor diferencia media entre la T_s al sol y sombra, así como sol y noche. Mientras que la menor diferencia entre sombra y noche la registró el concreto pulido.

Figura 9. Potencial temperatura de aire



Fuente: Elaboración propia mediante Leonardo de ENVI-met.

3.5 Comparación de escenarios

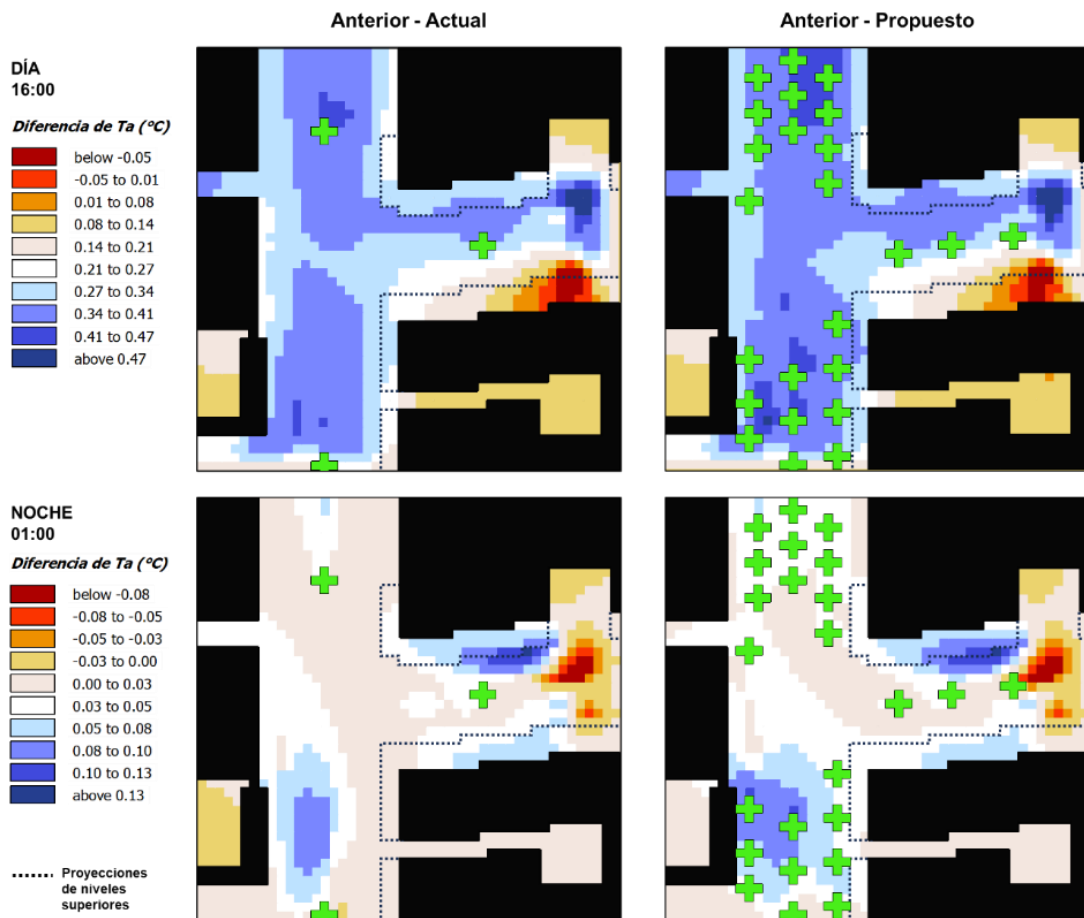
La potencial temperatura de aire obtenida mediante simulación térmica de exteriores presentó una distribución espacial semejante a la registrada durante las campañas de medición (Figura 9). Donde se observa un ligero enfriamiento en el centro del área de estudio que se propaga hacia el norte en el sentido del viento durante el día. Así como un aumento de temperatura de aire en las inmediaciones de la Av. Reforma al este del polígono y en la intersección con la prolongación de la misma calle al suroeste del polígono. Mientras que, durante la noche, la temperatura de aire (T_a) más elevada se concentra en la intersección de C. Morelos y Av. Reforma.

Mediante las simulaciones se observó que el escenario climáticamente más eficiente es el propuesto con vegetación sobre las vialidades, mientras que el menos eficiente es el escenario anterior (Figura 9). Durante el día, el escenario anterior registró una T_a 0.29°C y 0.21°C mayor sobre la mínima y máxima respectivamente del escenario actual. Así como el escenario propuesto, registró una reducción de T_a de 0.09 y 0.04°C de mínima y máxima con relación al escenario actual (Figura 10). Mientras que, durante la noche, no se registró diferencia entre mínimas y máximas del escenario actual y el propuesto. No obstante, el escenario anterior registró un aumento de 0.06 y 0.01°C entre las mínimas y máximas respectivamente con relación al escenario actual.

Particularmente, se registró que, durante el día, el área de estudio pasó de una T_a predominante, de hasta 33.99°C con las características anteriores, a una mayor proporción de espacios con temperatura de hasta 33.33°C, una reducción de entre 0.33 y 0.66°C entre el escenario anterior y las condiciones actuales. Mientras que, con el escenario propuesto la reducción en comparación con el escenario anterior registra una mayor área cubierta por reducciones de T_a superiores a los 0.66°C. En contraste con las condiciones actuales, el escenario propuesto alcanzaría una diferencia de más de 0.33°C.

Los resultados de las simulaciones correspondientes al periodo nocturno registran una distribución de potencial temperatura de aire similar entre los tres escenarios. Aunque, se puede observar que existe un ligero aumento de superficie cubierta con el rango de T_a más elevado en el escenario con las características anteriores.

Figura 10. Diferencia de Temperatura de Aire entre escenarios



Fuente: Elaboración propia mediante Leonardo de ENVI-met.

4. Conclusiones

4.1 Eficiencia microclimática de las mejoras urbanas

A partir de este análisis, destacan tres atributos físicos como reguladores microclimáticos en el contexto del Centro Histórico de Mexicali: 1) cambio a superficies de mayor albedo; 2) andadores peatonales cubiertos; y 3) sombreado por vegetación.

Primeramente, se observó que el cambio a superficies de mayor albedo en los espacios abiertos del Centro Histórico generó una reducción predominante entre los 0.34 a 0.41 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura de aire (Figura 10). Dicha transformación se extiende a lo largo de casi la totalidad del área de estudio, lo que favorece su efecto. Asimismo, dicha reducción se manifestó en las superficies expuestas al sol, las cuales forman parte de los recorridos exteriores obligados para la movilidad peatonal.

Se ha estudiado ampliamente la influencia de los materiales con mayor reflectancia sobre el microclima urbano, destacando siempre como una estrategia positiva en la mitigación del calentamiento de los espacios exteriores (Morales-Inzunza, y otros, 2023). Particularmente en este caso, la reducción de temperatura se enfatiza en el periodo diurno, donde las superficies se encuentran expuestas al sol y pueden alcanzar su máxima temperatura.

Por otra parte, se identificó que los andadores peatonales cubiertos por los niveles superiores de las edificaciones y estructuras propuestas alcanzaron la mayor reducción de temperatura en las mediciones de campo y simulación (Figura 8). La protección de la radiación solar a lo largo de la

mayor parte del día, que se ofrece en estos espacios, resulta una estrategia a conservar y promover en un contexto de desértico cálido como el de Mexicali. Cabe destacar, que el diseño de andadores peatonales cubiertos por los niveles superiores de las edificaciones no es propio de las transformaciones para la regeneración de la zona, ya que dicha tipología edificada, es característica de los edificios históricos del centro de la ciudad, por lo que ya estaba presente desde el escenario anterior (Figura 4).

Estudios previos en contextos climáticos cálidos, han destacado la influencia positiva de los pasos cubiertos para reducir el estrés térmico durante la movilidad peatonal en exteriores (Yildirim, 2020). La radiación solar, es uno de los principales factores que define la temperatura media radiante percibida por los usuarios de los espacios, por lo que la protección de la radiación solar directa de manera continua en un trayecto durante el periodo diurno tiene gran representatividad en la reducción del calor latente en los espacios públicos urbanos. No obstante, esta estrategia está condicionada a la posibilidad de movilización del calor de los espacios mediante convección. Donde otros elementos como la apertura de los cañones urbanos, la orientación de la vialidad y en general los elementos que definen el nivel de rugosidad urbana de la zona, juegan un papel fundamental en la capacidad de reducción de temperatura y sensación térmica generada por el viento (Yildirim, 2020; Chew & Norford, 2018).

La vegetación alcanzó la mayor intensidad de reducción de temperatura de aire, pero con una ínfima influencia espacial. Estudios previos han identificado que el efecto de enfriamiento de la vegetación pudiera ser insuficiente para mitigar la isla de calor de su entorno urbano debido a su configuración y falta de densidad del dosel arbóreo (García-Haro, Arellano, & Roca, 2023). Los resultados que la disposición de una mayor cantidad de árboles en el escenario propuesto genera un efecto de enfriamiento que se distribuye por una mayor superficie que la del escenario actual, con rangos de temperatura similares entre los 0.41 a 0.47°C de reducción en el día y 0.08 a 0.10°C durante la noche. Asimismo, el análisis de la LST que cubre una mayor extensión del Centro Histórico (Figura 6), destaca el efecto de enfriamiento de los parques urbanos próximos al área de estudio con morfología urbana y tipología edificada semejantes, condición que pone en perspectiva la posibilidad de la generación de un efecto de enfriamiento contiguo a lo largo de la vialidades, conformando una red local de infraestructura verde que se integraría a los elementos que favorecen el uso lúdico, recreativo y para la movilidad en el espacio público de esta zona (García-Haro, Arellano, & Roca, 2023; Santiago Ramos & Hurtado Rodríguez, 2021).

4.2 Limitaciones y subsecuentes líneas de investigación

El presente estudio se desarrolló mediante un seguimiento metodológico pertinente para los objetivos planteados, pero con múltiples posibilidades para ampliar el detalle de los temas y métodos abordados. Desde una perspectiva general, se considera que la incorporación del calor antropogénico pudiera desempeñar un papel fundamental en la regulación microclimática de los espacios exteriores del Centro Histórico de Mexicali. Particularmente, la alta presencia de la flota vehicular que accede se moviliza y se estaciona en la zona, es un factor que no se consideró en este estudio.

El enfoque en un día específico del año siempre deja de lado la identificación de la posible influencia de las variaciones atmosféricas. De tal manera que una aproximación a la variaciones estacionales o temporales derivadas de fenómenos naturales o episodios extremos, contribuiría al reconocimiento de la capacidad de adaptación climática de los contextos urbanos.

Por otra parte, se reconoce la importancia del uso de modelos numéricos de simulación térmica de exteriores para la previsión de la influencia microclimática de las propuestas de mejora urbana. Mediante estos métodos, los proyectos de regeneración de la ciudad tendrían una visión climáticamente sensible, lo que permitiría favorecer el uso de los espacios públicos exteriores durante mayor número de horas a lo largo del año en las ciudades de clima desértico cálido.

Finalmente, tanto la escala como los métodos aplicados para el análisis de distintos casos en futuras investigaciones, desde ajustarse a las necesidades del área de estudio y la disponibilidad de información. Particularmente, el estudio que aquí se presenta permita vislumbrar un panorama

general del comportamiento térmico mediante el análisis en las variaciones en la temperatura de aire. En una siguiente fase, se debe buscar la estandarización del método y extensión espaciotemporal de análisis para la definición de parámetros que permitan la creación de instrumentos de gestión urbana que promuevan la evaluación microclimática de las propuestas de mejora urbana para la generación de espacios públicos urbanos habitables en el contexto desértico cálido de la ciudad de Mexicali.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a Daniela Atienzo, Keyla Granillo, Rene Rodríguez y Luis Pérez, alumnos de la Licenciatura en Arquitectura de la Escuela de Arquitectura del Centro de Estudios Superiores Xochicalco Campus Mexicali, por su apoyo en las mediciones de campo para este estudio. También, agradecemos a la Mtra. Eva Angelina Coronado Jaramillo, directora de dicho programa, por facilitar el equipo de medición y fomentar la colaboración entre instituciones para la integración de los estudiantes de licenciatura en la realización de investigación aplicada.

Autoría

El primer autor, diseñó y desarrolló la metodología de esta investigación, gestionó el procesamiento de imágenes de satélite, procesó la información gráfica obtenida de las mediciones de campo y redactó el documento con gran atención al detalle. Por su parte, el segundo autor aportó significativamente en los aspectos técnicos del modelado y simulación de espacios, y colaboró tanto en el procesamiento de imágenes como en la redacción de las secciones técnicas del documento.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Bibliografía

- Abufayed, A., Rghei, A., & Aboufayed, A. (2005). Urban Planning And Architecture Of The Historic City Of Ghadames, Libya: Lessons From The Past For Cities Of The Future. En C. Brebbia, & A. Torpiano (Edits.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture* (págs. 3-13). Wessex, Reino Unido: WIT Press. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/83/15286>
- Ahmadi Venhari, A., Tenpierik, M., & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009>
- Arellano, B., & Roca, J. (2021). Using remote sensing imagery to study urban heat island and heat waves. *Proceedings Volume 11829, Earth Observing Systems XXVI. 1182905*. San Diego, California, Estados Unidos: International Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). <https://doi.org/10.1117/12.2594387>
- Arellano-Ramos, B., Roca-Cladera, J., Serra, C., Martínez, M. D., Lana, X., & Biere-Arenas, R. (2022). Olas de Calor en la ciudad de Barcelona. 1971-2020. *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(50), 2022. <http://dx.doi.org/10.5821/ace.17.50.11684>
- Artis, D., & Carnahan, W. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing Environment*, 12(4), 313-319. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0034-4257(82)90043-8)
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3-4), 373-384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)

- Casillas-Higuera, Á., García-Cueto, R., & Leyva-Camacho, O. (2014). Detección de la Isla de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, B.C. México. *Información Tecnológica*, 25(1), 139-150. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642014000100015>
- Chew, L. W., & Norford, L. K. (2018). Pedestrian-level wind speed enhancement in urban street canyons with void decks. *Building and Environment*, 146, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.039>
- Colter, K., Middel, A., & Martina, C. (2019). Effects of natural and artificial shade on human thermal comfort in residential neighborhood parks of Phoenix, Arizona, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126429>
- Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. (2021). *Reporte del Clima en México. Reporte Anual 2020*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua de México. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/reportes-del-clima-en-mexico>
- Ellena, M., Breil, M., & Soriani, S. (2020). The heat-health nexus in the urban context: A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built environment characteristics. *Urban Climate*, 34, 100676. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100676>
- García-Haro, A., Arellano, B., & Roca, J. (2023). Quantifying the influence of design and location on the cool island effect of the urban parks of Barcelona. *Journal of Applied Remote Sensing*, 17(3), 034512. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.034512>
- González Álvarez, S., & Del Caz, M. R. (2024). El verde urbano desde el punto de vista ambiental, social y de la salud: políticas urbanas convergentes. *ACE: Architecture, City and Environment*, 19(55), 12129. <https://doi.org/10.5821/ace.19.55.12129>
- Google Inc. (2013). *Imagen satelital de Mexicali*. Obtenido de Google Earth.
- Hernández, O. (13 de Febrero de 2022). Regeneración del Centro Histórico de Mexicali. *La Voz de la Frontera*. <https://www.lavozdelafrontera.com.mx/analisis/regeneracion-del-centro-historico-de-mexicali-parte-ii-7855879.html>
- Hondula, D. M., Balling, R. C., Vanos, J. K., & Georgescu, M. (2015). Rising Temperatures, Human Health, and the Role of Adaptation. *Current Climate Change Reports*, 1(3), 144-154. <https://doi.org/10.1007/s40641-015-0016-4>
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)*, 35-115. Ginebra, Suiza: IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jabareen, Y. (2015). City planning deficiencies & climate change – The situation in developed and developing cities. *Geoforum*, 63, 40-43. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.05.017>
- Morales-Inzunza, S., González-Trevizo, M., Martínez-Torres, K., Luna-León, A., Tamayo-Pérez, U., Fernández-Melchor, F., & Santamouris, M. (2023). On the potential of cool materials in the urban heat island context: Scalability challenges and technological setbacks towards building decarbonization. *Energy and Buildings*, 296, 113330. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113330>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Peel, M., Finlayson, B., & McMahon, T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

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>

Santiago Ramos, J., & Hurtado Rodríguez, C. (2021). Análisis de servicios ecosistémicos para la configuración de una infraestructura verde en el área metropolitana de Sevilla. *ACE Architecture, City and Environment*, 16(46), 9884. <https://doi.org/10.5821/ace.16.46.9884>

Sen, S., Mendéz-Ruiz Fernandèz, J. P., & Roesler, J. (2020). Reflective Parking Lots for Microscale Urban Heat Island Mitigation. *Journal of the Transportation Research Board*, 2674(8), 663-671. <https://doi.org/10.1177/0361198120919401>

Sistema Meteorológico Nacional (SMN). (2022). *Registro de variables de Estación Meteorológica Mexicali*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>

Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

Stathopoulou, M., Cartalis, C., & Petrakis, M. (2006). Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 28(15), 3291-3304. <https://doi.org/10.1080/01431160600993421>

Yildirim, M. (2020). Shading in the outdoor environments of climate-friendly hot and dry historical streets: The passageways of Sanliurfa, Turkey. *Environmental Impact Assessment Review*, 80, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106318>