



# La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México

## *The surface urban heat island and its manifestation in the urban structure of Mexico City*



Itzia Gabriela Barrera Alarcón , Camilo Alberto Caudillo Cos , Sandra Lizbeth Medina Fernández   
Felipe Gerardo Ávila Jiménez , Jorge Alberto Montejano Escamilla 

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Contoy 137, Col. Lomas de Padierna,  
Alcaldía Tlalpan, CP. 14240, Ciudad de México, México

**Autor de correspondencia:** Itzia Gabriela Barrera Alarcón, Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Contoy 137, Col. Lomas de Padierna, Alcaldía Tlalpan, CP. 14240, Ciudad de México, México, E-mail: [ibarrera@centrogeo.edu.mx](mailto:ibarrera@centrogeo.edu.mx), ORCID: 0000-0002-5561-7177.

**Recibido:** 21 de Junio del 2022

**Aceptado:** 28 de Septiembre del 2022

**Publicado:** 30 de Septiembre del 2022

**Resumen.** - *A partir del procesamiento de imágenes satelitales de alta y baja resolución (Landsat y Modis), el desarrollo de correlaciones bivariadas entre Temperaturas de Superficie Terrestre diurnas, nocturnas y 27 métricas asociadas a la estructura urbana y localización, este trabajo ha analizado la intensidad del fenómeno de la Isla de Calor Urbano en La Ciudad de México en uno de los meses más cálidos del año 2018. Esto ha permitido identificar las zonas más vulnerables ante dicho fenómeno y su asociación con las características de estructura urbana de la misma. En este sentido, se identificó que las temperaturas nocturnas más altas se encuentran a una menor distancia del centro de la Ciudad, es decir, en la zona más consolidada de la misma. La población de 65 o más años, que es la más vulnerable a sufrir problemas de salud asociados a las altas temperaturas por un problema de termorregulación corporal, se localizan en zonas de la ciudad donde se concentran las temperaturas nocturnas más altas. Asimismo, aunque en menor medida, se tiene una correlación directa con las altas temperaturas y las zonas de mayor densidad de vivienda, mayor superficie de calles pavimentadas y mayor concentración de unidades económicas por hectárea. Por el contrario, las zonas con las temperaturas nocturnas más bajas identificadas dentro de la Ciudad se localizaron en las zonas con mayores alturas sobre el nivel del mar, sobre pendientes más pronunciadas y con mayor superficie de áreas libres. Asimismo, la población de 0 a 14 años identificada también dentro del rango de vulnerabilidad a las altas temperaturas se localiza principalmente en las zonas con temperaturas moderadas y/o bajas en las zonas periurbanas principalmente. Por otro lado, para identificar las variaciones térmicas diurnas y nocturnas, tanto en suelo artificial como en suelo con cobertura natural, se generaron perfiles térmicos con mediciones a cada 1000 m, identificando también el uso de suelo. Este perfil térmico ha permitido observar oscilaciones térmicas más pronunciadas durante el día, localizando las temperaturas más altas en las áreas de cultivo, suelo habitacional y de uso mixto. Por el contrario, las temperaturas nocturnas se estabilizan y manifiestan el fenómeno de la Isla de Calor Urbano en el cual se muestra que las temperaturas más altas se concentran en la zona más densa de la ciudad (Alcaldía Cuauhtémoc y Alcaldía Benito Juárez), que han almacenado una mayor cantidad de calor debido a las características de los materiales y composición del entorno urbano, y las zonas con cobertura natural bajan debido a la facilidad para disipar el calor.*

**Palabras clave:** Isla de calor urbano superficial; Estructura urbana; Percepción remota.

**Abstract.** - *From the processing of high- and low-resolution satellite images (Landsat and Modis), the development of bivariate correlations between daytime and nighttime land surface temperatures, and 27 metrics associated with urban structure and location, this work has analyzed the intensity of the phenomenon of Urban Heat Island manifested in Mexico City in one of the warmest months of the year 2018 to identify the most vulnerable areas to this phenomenon and their urban structure characteristics. Thus, the highest temperatures are found at a shorter distance from the inner city, as the most consolidated area. The population aged 65 or over, which is the most vulnerable to health problems associated with high temperatures and body thermoregulation, is located in areas of the city where the highest night temperatures are concentrated. Likewise, to a lesser extent, there is a direct correlation between high temperatures and areas with higher housing density, a greater surface area of paved streets, and a greater concentration of economic units per hectare. On the contrary, the zones with the lowest temperatures identified within the City were located in areas with the greatest heights above sea level, on steeper slopes, and with a greater surface of open areas. Likewise, the population aged 0 to 14 years, also identified within the range of vulnerability to high temperatures, is located mainly in areas with moderate and/or low temperatures. On the other hand, to identify the diurnal and nocturnal thermal variations, both in artificial and natural cover soil and their land use, thermal profiles were generated with measurements at every 1000 meters. This has allowed it to observe more pronounced thermal oscillations during the day, with the highest temperatures in the cultivation areas, residential land, and mixed-use. On the contrary, night temperatures stabilize and manifest the phenomenon of the Urban Heat Island in which it is shown that the highest temperatures are concentrated in the densest area of the city (Alcaldía Cuauhtémoc and Alcaldía Benito Juárez), which have stored a greater amount of heat due to the characteristics of the materials and composition of the urban environment, and the areas with a natural cover go down due to the ease of dissipating heat.*

**Keywords:** Surface urban heat island; Urban structure; Remote sensing.

## 1. Introducción

El fenómeno de la Isla de Calor Urbana se ha definido como la diferencia térmica entre el área urbana y sus alrededores, siendo esta una clara manifestación del impacto de las actividades antropogénicas y el espacio para desarrollarlas. Se entiende que emerge como resultado de dos procesos diferentes pero asociados entre sí. El primero se refiere a la alteración de la cobertura del suelo, que pasa de ser suelo natural a suelo artificial, cuyos materiales normalmente poseen mayor inercia térmica. De tal manera que a mayor superficie construida, mayor es la alteración de los parámetros climáticos que contribuyen a regular el clima local [1].

El segundo proceso, se refiere a las actividades antropogénicas que se desarrollan en las ciudades asociadas, por una parte, a la generación y consumo energético [2]. Por tanto, la combinación de los efectos de dicho fenómeno, el crecimiento de la población urbana y las actividades inherentes a su desarrollo, así como la necesidad espacial para llevarlas a cabo están minando la seguridad de las ciudades [3].

A partir de su medición, las Islas de Calor Urbano pueden clasificarse en dos: i) las atmosféricas (ICUA), que se identifican a partir de la temperatura del aire localizada entre la capa dosel y la capa límite de la ICU; y ii) las superficiales (ICUS), que se evalúan a partir de las Temperaturas de Superficie Terrestre obtenidas mediante percepción remota. Sin embargo, aunque ambas poseen patrones espaciales similares, las ICUA suelen manifestar una mayor diferencia térmica durante la noche, mientras que las ICUS lo hacen en el día [3] [4] [5].

Asimismo, la intensidad de la ICU de una ciudad está sujeta a las métricas empíricas e indicadores utilizados para cuantificar el fenómeno. De tal manera que al analizar su esencia física, está determinada por una variedad de factores que se pueden clasificar a grandes rasgos en [6]:

- Externos: incluyen la ubicación (lat./lon.), el clima (en particular el viento), la proximidad a los cuerpos de agua (asociados con la circulación de la brisa del mar o lago), vegetación, etc.
- Intrínsecos: representan características específicas de la ciudad (por ejemplo, tamaño de la ciudad, fracciones de la cubierta terrestre, emisiones de calor antropogénicas, su estructura funcional, etc.

Sin embargo, ambas están ampliamente relacionadas a los usos de suelo y la morfología urbana, provocando contrastes térmicos en zonas expuestas a la radiación solar y otras al sombreado generado por las edificaciones [7].

Así, la manifestación de este fenómeno ha sido estudiado en diversas ciudades con distintas variaciones en cuestión de cantidad, temporalidad, tamaño, características de suelo (tipos de revestimiento en calles y carreteras, materiales de construcción, tipos de laminados, cantidad de áreas verdes y cuerpos de agua), procesos de planeación y estructura urbana, climatología [8] [9] [10][11], entre otros. Esto ha permitido vislumbrar estrategias que posibiliten la mejora de condiciones térmicas dentro de las ciudades, haciendo uso de una gran variedad de modelos numéricos diseñados para simular los procesos clave que rigen el intercambio de calor, humedad e impulso de la cubierta urbana.

Así, una de las recomendaciones para estos estudios de acuerdo T.R. Oke [12], es realizar trabajos comparativos entre ciudades con las mismas características haciendo referencia a la topografía, cuerpos de agua, clima (misma latitud, región climática y condiciones de nubosidad), tiempo (mismos días y periodos), e instrumentación de medición, ya que se ha demostrado la relación existente entre el tamaño de una aldea, pueblo o ciudad y la magnitud de la isla de calor urbano que esta

produce, siendo la población el parámetro más representativo para identificar el nivel de urbanización.

Por citar algunos ejemplos de casos de estudio, se encuentra el realizado por H. Tran [13] que a partir de imágenes MODIS reportaron 18 mega ciudades asiáticas donde correlacionaron la isla de calor urbano con la población de la ciudad, densidad de urbanización y cubierta vegetal. Por otra parte, M.L. Imhoff [14] también indicó que hay un ciclo diurno y estacional de la isla de calor urbano superficial mostrando que la isla de calor urbano superficial de verano ( $4.3^{\circ}\text{C}$ ) es más intensa que la isla de calor urbano de superficie de invierno ( $1.3^{\circ}\text{C}$ ) sobre las 38 ciudades con mayor población en todo Estados Unidos utilizando MODIS LST. Otro estudio a escala mundial [15] intenta representar la variación estacional de la intensidad de la isla de calor urbano superficial (SUHII) en 419 ciudades, evaluando diversos factores biofísicos y socioeconómicos a partir de la utilización de imágenes MODIS diurnas y nocturnas. La investigación demuestra que existe una correlación positiva con el albedo y la luz nocturna entre las áreas urbanas y sus alrededores con respecto a la Intensidad de la Isla de Calor Urbano Superficial (SUHII), mientras que la SUHII diurna presenta altas correlaciones negativas con respecto a la cantidad de cobertura natural y el tipo de actividades que se desarrollan en las zonas urbanas y suburbanas. Oleson por su lado [16], emplea un esquema urbano dentro de un Modelo Climático Global (GCM) para cuantificar el impacto potencial de los techos blancos como una estrategia de mitigación del clima.

Las diferentes manifestaciones de la SUHII durante ciertos periodos de tiempo en un

espacio determinado, son otros de los aspectos que se evalúan para entender los diferentes procesos urbanos que afectan dicho fenómeno. Un ejemplo es el estudio realizado por J. Peng [17] en la ciudad de Beijing el cual evalúa la manifestación de la ICU a partir de los cambios morfológicos y sistemas de conectividad del año 2000 al 2015. Los resultados muestran que estos procesos incidieron en el incremento de la superficie asociada a la conectividad y las altas temperaturas, generando así un gran archipiélago de calor urbano que ha llegado a ocupar hasta el 79.85% de la superficie de la ciudad. Otro trabajo desarrollado en la ciudad de Rotterdam por L. Van Hove et al [18], integra al estudio de la variación espacio temporal 2010-2012, en este caso, a la isla de calor urbano atmosférica, los parámetros del confort térmico viéndose afectado principalmente en las zonas donde se manifiesta más intensamente la ICUA en los meses de verano.

Por otro lado, en México se han desarrollado diversos trabajos en torno al estudio de la Isla de Calor Urbana tanto atmosférica como superficial [19][20][21][22][23][24][25].

Aquellas que han analizado dicho fenómeno en ciudades de clima templado o cálido-húmedo, han determinado que las temperaturas más altas se presentan en las zonas céntricas y de mayor densidad edificatoria, principalmente por el tipo de materiales utilizados en las superficies, el uso de suelo, la falta de vegetación, y el empleo excesivo de sistemas de refrigeración al interior de las edificaciones. Por el contrario, aunque han sido más escasos, aquellos estudios realizados en ciudades con clima cálido-seco, demuestran que las zonas más densas de la ciudad se manifiestan como Islas Urbanas de Frío, siendo las periferias y las

zonas más dispersas las que registraron las temperaturas diurna más altas [2] [17] [23].

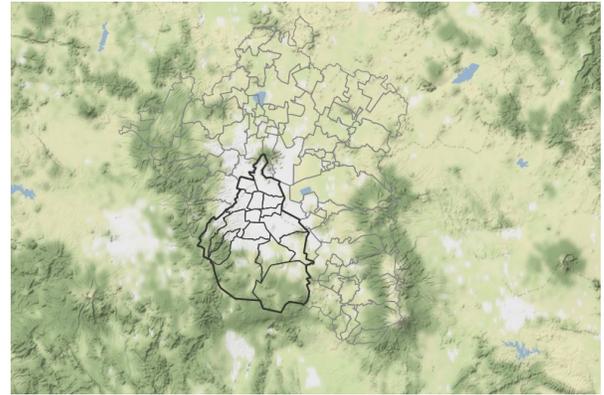
La mayoría de estos estudios se han enfocado en el análisis del fenómeno de la ICU atmosférica en la microescala a partir del empleo de datos monitoreados por diversas estaciones meteorológicas [19][20][21][23][24][25]. El uso de percepción remota para el análisis de la ICU Superficial, por el contrario, ha sido menos utilizado en el país para estudiar el fenómeno a escala local o meso escala [22][27][2][26]. Sin embargo, el trabajo realizado por Navarro-Estupiñán [27], integra a su análisis métricas de la estructura urbana funcional asociadas a la vulnerabilidad térmica y su relación espacial con la ICU Superficial en la ciudad de Hermosillo.

Así, el objetivo de este trabajo es el de identificar las zonas más vulnerables ante el fenómeno de la Isla de Calor Urbano a partir de su localización y su relación con diversos elementos que conforman la estructura<sup>1</sup> urbana de la ciudad. De tal manera que los resultados puedan ser considerados para la integración de la política pública y planeación de la Ciudad de México.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

Este trabajo se enfoca en el estudio del fenómeno de la Isla de Calor Urbano Superficial generado en la Ciudad de México, que con más de 9 millones de habitantes y una extensión de casi mil 500 km<sup>2</sup>, forma parte de la zona Metropolitana del Valle de México [28].



**Figura 1.** Límite estatal de la Ciudad de México en la Zona Metropolitana del Valle de México. Fuente: [29]

Su temperatura media anual es de 16°C, con una máxima media anual de 25°C y mínima media anual de 5°C. Además de concentra cuatro tipos de clima: templado subhúmedo, semifrío subhúmedo, semifrío húmedo y semiárido seco. Gran parte de la Ciudad se localiza a una altura de 2,240 msnm [30].

### 2.2. Metodología, materiales y método

Para identificar y analizar la Isla de Calor urbano Superficial de la Ciudad de México, se desarrolló una metodología que consta de cuatro etapas: extracción y procesamiento de información de percepción remota; generación y análisis de información de estructura urbana; desarrollo de Correlaciones bivariadas a partir del Índice de Correlación de Pearson; y análisis de resultados.

<sup>1</sup> Para este trabajo, se aborda la estructura urbana desde su ámbito funcional y no morfológico.

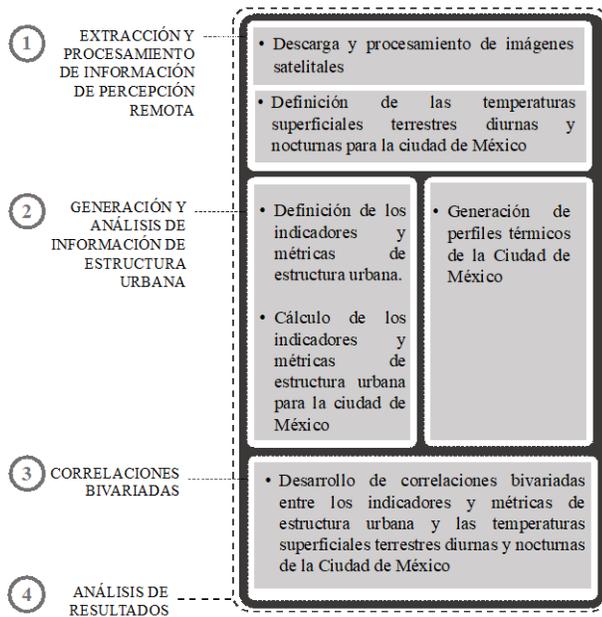


Figura 2. Proceso metodológico implementado en la investigación. Fuente: elaboración propia.

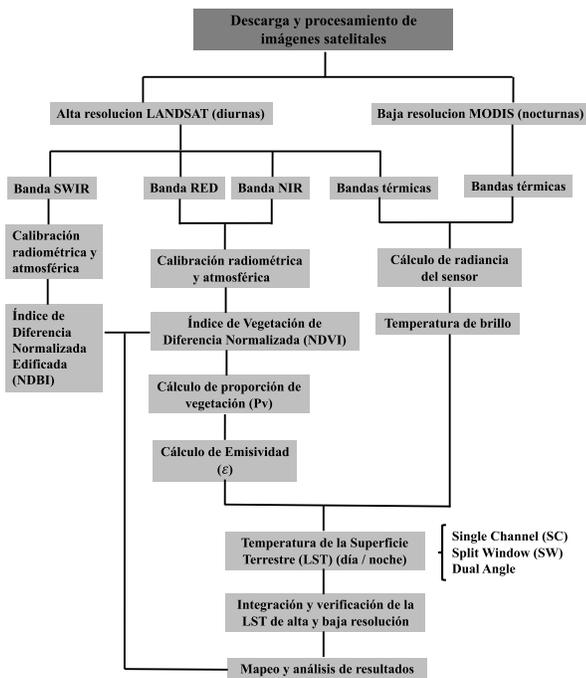
### 2.3. Extracción y procesamiento de información de percepción remota.

Algunos de los sensores TIR actuales transmitidos por satélite pueden proporcionar mediciones de la Temperatura Superficial Terrestre (LST por sus siglas en inglés Land Superficie Temperature) a una resolución espacial razonablemente alta. Su utilización en estudios de clima urbano está restringida debido a la baja resolución temporal y a los limitados datos de imágenes disponibles durante la noche [31].

De acuerdo con un estudio encabezado por Weng [32], ningún sistema de satélites en la actualidad proporciona datos TIR de cobertura global que combine altas resoluciones espaciales y temporales. De tal manera que se han desarrollado diversas técnicas para poder mejorar estas dos características, tales como la fusión de imágenes, la fusión imagen-datos, la nitidez espacial, la reducción de escala y la desagregación (afilado térmico espacial y las técnicas de afilado térmico temporal).

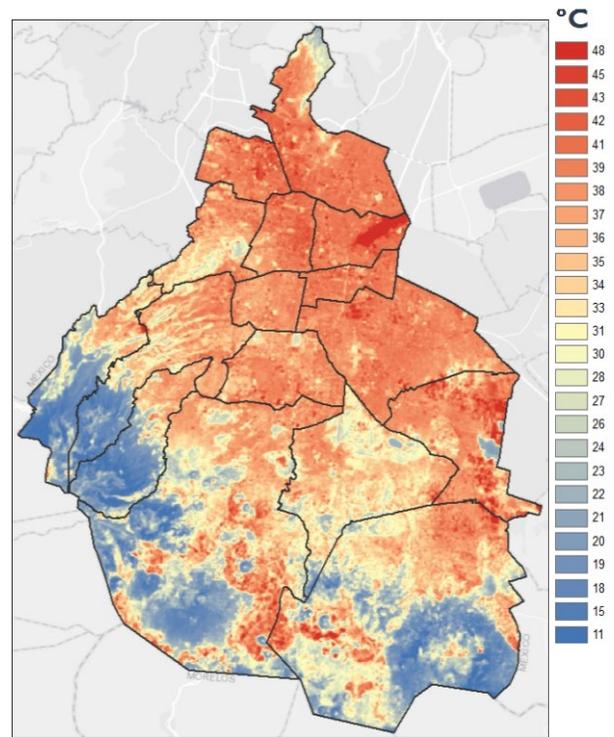
Por tanto, para este trabajo se obtendrán datos de LST de día mediante Landsat a 30 m y LST de noche a través de Modis a 1 km. Para esta última será necesaria la aplicación de la técnica de afilamiento térmico espacial que permita pasar de una resolución espacial baja a un alta mediante el algoritmo TsHARP. De acuerdo a Agam, N. et al. 2007, la técnica de TsHarp se basa en la supuesta relación entre el NDVI y la LST dentro de una escena del sensor. Sin embargo, la pendiente de esta relación varía con la cobertura del suelo y el clima, por lo que, esta metodología es muy específica al área de estudio o escena, siendo recomendable no aplicar en áreas grandes [33].

Así, la metodología empleada para el trabajo de percepción remota se desarrolló en 4 etapas: descarga de imágenes satelitales de alta resolución (Landsat8) y de baja resolución (Modis); calibración de bandas Landsat; cálculo de la Temperatura de Superficie Terrestre (LST); e integración de resultados de distintas escalas



**Figura 3.** Metodología de percepción remota. Fuente: elaboración propia.

a) Imágenes satelitales de alta resolución Landsat. Para la Ciudad de México se descargó una escena Landsat 8 mediante la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) [34]. La imagen diurna seleccionada corresponde al día 8 de mayo del año 2018. Su descarga y procesamiento se generó a partir dicha plataforma empleando sus insumos y métodos de procesamiento.



**Figura 4.** LST (Landsat) Diurna de la Ciudad de México. Fuente: elaboración propia.

b) Imágenes satelitales de baja resolución Modis. La temperatura superficial del terreno (LST) para el sensor Modis fue descargado como producto MOD11A2 v006 y MYD11A2 v006, proporcionada como promedio de 8 días por píxel con una resolución de 1 kilómetro.

Dado que al ser descargadas las escenas ya cuentan con el resultado de LST, únicamente se realiza la re-proyección a la zona UTM correspondiente y el recorte al tamaño del área de estudio, además dado que el resultado se encuentra en un rango válido de 7 500 a 65 535, este debe ser multiplicado por el factor de escala 0.02 y al resultado restarle -273.15 para convertir de grados Kelvin a Celsius.

### 2.4. Integración de resultados de distintas escalas.

Para este trabajo se han obtenido los datos de LST de día mediante Landsat a 30 m y LST de noche a través de Modis a 1 km, por lo que ha sido necesario aplicar la técnica de afilamiento térmico espacial en Modis para pasar de una resolución espacial baja a un alta mediante el algoritmo TsHARP. De acuerdo a Agam [35], la técnica de TsHarp se basa en la supuesta relación entre el NDVI y la LST dentro de una escena del sensor. Sin embargo, la pendiente de esta relación varía con la cobertura del suelo y el clima [33].

### 2.5. Verificación de resultados

Una vez obtenidos los resultados de la técnica de afilamiento térmico, estos fueron evaluados con el resultado original de la Temperatura de Superficie Terrestre de los productos MOD11A2 v006 y MYD11A2 v006 correspondiente. De acuerdo a Agam [35], propone la evaluación de precisión de recuperación, en donde mide el nivel de acuerdo entre los campos de temperatura de referencia ( $T_{Rref}$ ) y de la temperatura con la técnica aplicada ( $\widehat{T_{Rhigh}}$ ) se evalúan mediante el Error medio Absoluto (MAE) y el Error Medio Cuadrático (RMSE). Calculando con las siguientes formulas:

$$RMSE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n (\widehat{T_{Rhigh}} - T_{Rref})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$MAE = \left[ n^{-1} \sum_{i=1}^n |\widehat{T_{Rhigh}} - T_{Rref}| \right] \quad (2)$$

Tabla 1. Resultados de RMSE, MAE y R. Fuente: elaboración propia.

CIUDAD	EVALUACIÓN		
	MAE	RMSE	R
Ciudad de México	0.49	0.58	0.991116
	DIFERENCIA DE TEMPERATURAS		
	Dif max (absoluta)	Dif min (absoluta)	Promedio (absoluto)
	0.24	0.85	0.34

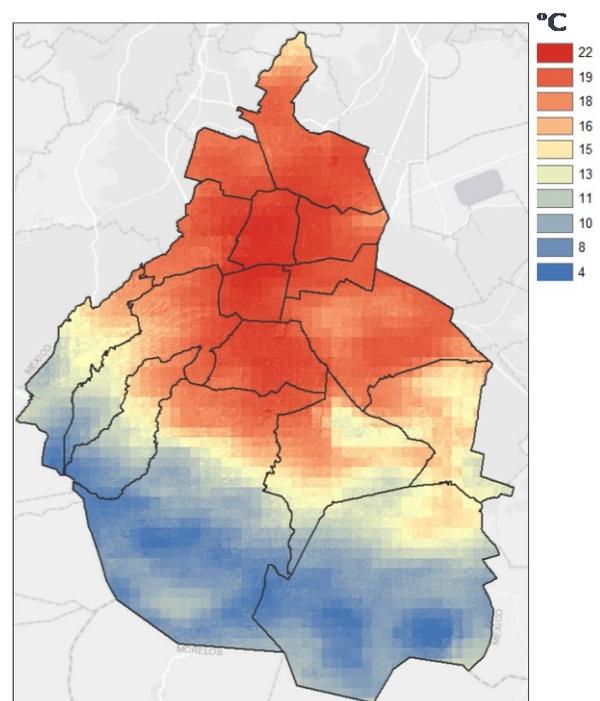


Figura 5. LST (Modis) nocturna de la Ciudad de México. Fuente: elaboración propia.

### 2.6. Generación y análisis de información de estructura urbana.

Una vez obtenidas las imágenes LST tanto diurnas y nocturnas de la Ciudad de México, se generó la cartografía térmica por Área Geoestadística Básica (AGEB), considerando la mediana de las temperaturas por píxel localizados dentro de los límites de cada una de

ellas. Esto se realizó tanto para las temperaturas superficiales diurnas como nocturnas.

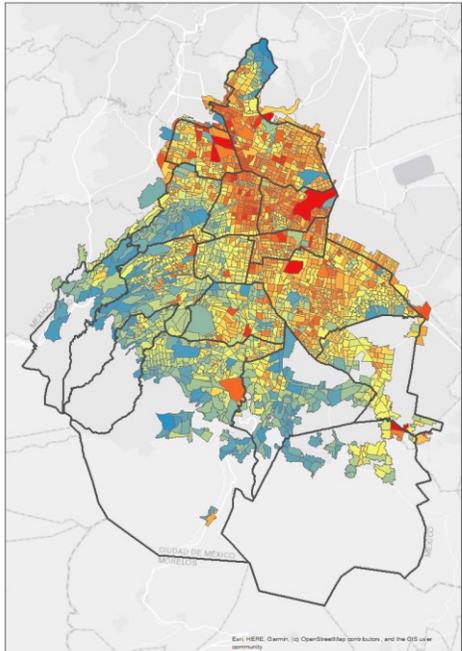


Figura 6. Mapa de temperaturas superficiales diurnas por AGEb. Fuente: elaboración propia

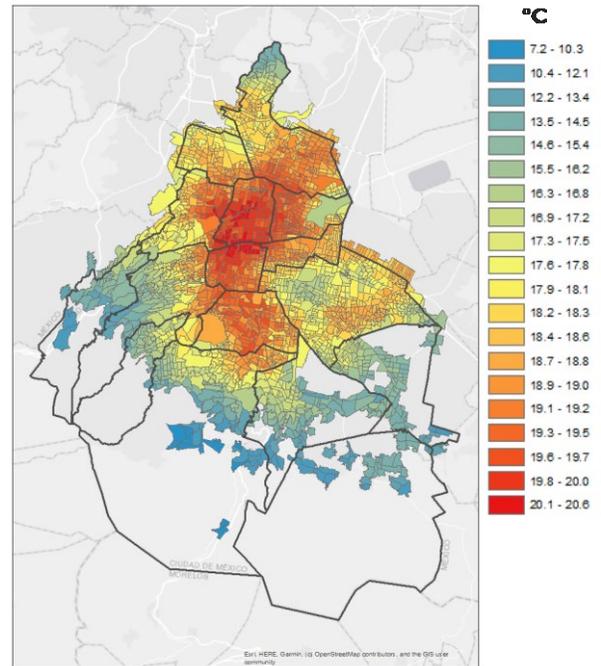


Figura 7. Mapa de temperaturas superficiales nocturnas por AGEb. Fuente: elaboración propia.

Asimismo se retomaron 25 de las métricas empleadas en el trabajo de investigación Forma Urbana y productividad en México 1995-2015 [36], asociadas a la estructura urbana, y se emplearon dos más correspondientes a la localización: altura y pendiente.<sup>2</sup>

Tabla 2. Tabla de indicadores. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Medida	Fuente	Fórmula
1. Distancia	Distancia al centro de la ciudad KM	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015	Distancia euclidiana al centro de la ciudad, calculada a partir de los centroides de ageb en Km.
2. Densidad habitacional	Densidad habitacional (neta)	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2016	Vivienda / hectárea
3. Construcción vs área libre	Índice de ocupación del suelo	Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019.	Área construida / área libre

**Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 5 (3): 312-330.**

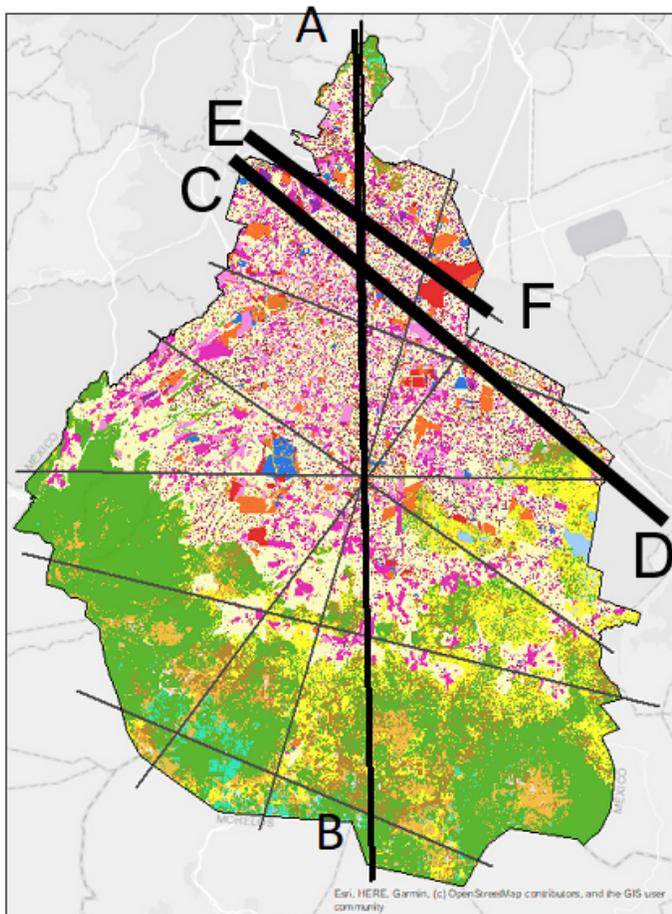
<b>4. Suficiencia vial y personal ocupado</b>	Índice de Saturación Vial (PO)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vialidad en el AGEB / raíz cuadrada de la / (superficie construida * personal ocupado promedio) * 100.
<b>5. Suficiencia vial y población</b>	Índice de Saturación Vial (Pob)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vialidad en el AGEB / raíz cuadrada de la / (superficie construida * población del AGEB) * 100
<b>6. Suficiencia vial por personal ocupado y población</b>	Índice de Saturación Vial (PO+Pob)	Manzanas del Inventario Nacional de Vivienda 2016 (INV 2016), vialidad del Scince 2015 (Scince 2015) y AGEB del Marco Geoestadístico Nacional 2015 MGN (2015).	Longitud total de vía * (Personal Ocupado + población residente) / raíz cuadrada (superficie vial + espacio público)*100.
<b>7. Concentración urbana física</b>	Concentración urbana (física)	INV 2016 y DENUE 2016, INEGI.	(Unidades económicas + viviendas en una manzana) / superficie construida de la manzana.
<b>8. Concentración urbana funcional</b>	Concentración urbana (funcional)	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Total de habitantes + personal ocupado en una manzana) / (viviendas + UE de la manzana).
<b>9. Unidades económicas por hectárea</b>	Distribución territorial de UE	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016.	Unidades económicas / superficie de AGEB en hectáreas
<b>10. Relación de empleos con ocupación</b>	Relación de la población ocupada con la población económicamente activa ocupada	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016.	Personal Ocupado promedio / población económicamente activa ocupada
<b>11. Coeficiente de ocupación del suelo</b>	% de suelo construido	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019	Superficie construida / superficie total por AGEB
<b>12. Porcentaje de vialidad y espacio público</b>	% de espacio público y vial	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INV 2016, INEGI	(Área vial + área libre) * 100) / superficie total del AGEB
<b>13. Porcentaje de área libre</b>	% de áreas libres	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Área construida y libre identificada a partir de la percepción remota de imágenes RapidEye 2016 obtenidas del proyecto de Forma Urbana y Productividad en México, CentroGeo 2018-2019	área libre en el AGEB / superficie del AGEB * 100
<b>14. Porcentaje de población</b>	% de pob. 0 a 14 años de edad	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	(Población de 0 a 14 años / Población total) * 100

de 0 a 14 años			
15. Porcentaje de población de 65 años y más	% de pob. 65 y más años de edad	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	Población de 65 años y más / población total) * 100
16. Personal ocupado por unidad económica	Número de personas ocupadas por unidad económica	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	Total de PO / Total de UE en el AGEB
17. Porcentaje de calles pavimentadas	Materiales viales	en INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. INEGI. Sistema de Integración Territorial (ITER), 2010	longitud de vías pavimentadas / longitud total de vía en el AGEB
18. Porcentaje de áreas verdes	Camellones y áreas verdes	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de áreas verdes / superficie total del AGEB) * 100
19. Porcentaje de comercio y servicios	Comercios y servicios	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de comercio y servicios / superficie total del AGEB) * 100
20. Porcentaje de equipamiento	Equipamiento	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de equipamiento / superficie total del AGEB) * 100
21. Porcentaje de uso habitacional	Superficie habitacional	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), 2016	(Superficie de uso habitacional / superficie total del AGEB) * 100
22. Porcentaje de industria	Superficie industrial	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Superficie de industria / superficie total del AGEB) * 100
23. Porcentaje de uso mixto	Superficie con usos mixtos	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INV 2016.	(Superficie de usos mixtos / superficie total del AGEB) * 100
24. Porcentaje de uso mixto especializado	Superficie con usos mixtos especializados	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INV 2016.	(Superficie de usos mixtos especializados / superficie total del AGEB) * 100
25. Porcentaje de otros usos	Superficie con otros usos	INEGI. Marco Geoestadístico Nacional, 2015.	(Superficie de otros usos / superficie total del AGEB) * 100
26. Altura	Altura sobre el nivel del mar	INEGI. Continuo de Elevaciones Mexicano	Altura sobre el nivel del mar donde se localiza en AGEB
27. Pendiente	Grados	INEGI. Continuo de Elevaciones Mexicano	Grados de inclinación del terreno del AGEB.

## 2.7. Desarrollo de perfiles térmicos

A partir de los usos de suelo de planeación para La Ciudad, el Mapa prototipo de Cobertura y Uso de la Tierra de México<sup>3</sup>, y las temperaturas superficiales diurnas y nocturnas obtenidas, se realizaron tres perfiles térmicos (A-B, C-D, E-F) – empleando una serie de puntos localizados a cada 1000 m entre sí y cuyo objetivo es el de identificar la magnitud térmica diurna y nocturna generada por el tipo de cobertura y uso de suelo, dentro y fuera de los límites urbanos

de la Ciudad de México. La localización del perfil A-B busca identificar estas métricas en la sección más grande de La Ciudad que va de norte a sur y que pasa por las zonas más consolidadas hasta aquellas con mayores áreas de coberturas naturales. El perfil E-F atraviesa una sección al norte va de norponiente a suroriente donde se localiza suelo industrial y equipamiento internacional (el Aeropuerto Internacional Benito Juárez). El perfil C-D se localiza también la zona norte de La Ciudad abarcando la zona de mayor consolidación urbana y con mayor mezcla de usos de suelo.



## Cobertura y uso de suelo



Figura 8. Localización de perfiles térmicos

<sup>3</sup> Desarrollado en el proyecto “Climate Change Initiative CCI-Land Cover project 2017, por la Agencia Espacial Europea de Sentinel-2

## 2.8. Correlaciones bivariadas

Finalmente, para establecer las asociaciones entre los indicadores de estructura urbana y localización con las Temperaturas de Superficie Terrestre diurnas y nocturnas, se calculó el índice de correlación de Pearson (de producto momento) y posteriormente se filtraron aquellas variables que tuvieran un índice absoluto mayor que 0.15.

## 3. Resultados y discusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el procesamiento de las imágenes diurnas y nocturnas, y el cálculo de los indicadores de estructura urbana y localización por AGEb, la aplicación del índice de Pearson muestra en la tabla 3, las correlaciones bivariadas positivas y negativas de mayor peso en torno a la temperatura superficial terrestre diurna.

**Tabla 2.** Índice de Pearson con Temperaturas de Superficie Terrestre Diurnas. Fuente: elaboración propia

Variables con correlaciones > 0.15 con LandSat	
Indicador	Correlación
Coefficiente de Ocupación de Suelo (COS)	0.500
Densidad habitacional	0.312
Unidades económicas por hectárea	0.260
Porcentaje de calles pavimentadas	0.242
Unidades económicas	0.201
Suficiencia vial y personal ocupado	-0.185
Superficie vial	-0.189
Suficiencia vial y personal ocupado	-0.228
Superficie de área libre	-0.401
Distancia al centro de la ciudad	-0.445
Pendiente	-0.471
Porcentaje de vialidad y espacio público	-0.484
Porcentaje de área libre	-0.530
Altura	-0.555

Los resultados indican que, para la Ciudad de México, hay una correlación positiva que varía entre el 0.5 y el 0.201 entre las temperaturas

diurnas más altas y las zonas con un mayor COS, donde se localiza una mayor densidad habitacional, una mayor concentración de unidades económicas por hectárea y donde hay un mayor porcentaje de calles pavimentadas.

Asimismo, las correlaciones negativas más significativas - que van desde el -0.555 al -0.185 -, demuestran que las zonas que se localizan a mayor altura (en el rango de entre 2 221 y 3 069 msnm) en la Ciudad mantienen las menores temperaturas diurnas, así como en las zonas donde hay un mayor porcentaje y superficie de área libre, un mayor porcentaje de vialidad y espacio público, así como las zonas localizadas en superficies con mayor pendiente y cuya distancia al centro es menor.

En cuanto a las variables con correlaciones positivas más significativas entre las temperaturas nocturnas y los diferentes elementos de la estructura urbana y localización, en la figura 8 se observa una variación entre 0.476 y 0.152. La correlación más fuerte es de 0.476 y corresponde a la temperatura de Landsat, es decir, en las zonas donde se presentan las temperaturas nocturnas más altas también corresponden a las mayores temperaturas diurna.

Asimismo, se identifica que uno de los sectores de la población más vulnerable debido al problema de termorregulación corporal asociado a la edad, que oscila entre los 65 o más años, se encuentra localizado en las zonas donde se presentan las temperaturas nocturnas más altas. Asimismo, y al igual que en las temperaturas diurnas más altas, en las zonas con mayor densidad habitacional, mayor porcentaje de calles pavimentadas y mayor concentración de unidades económicas por hectárea, se localizan también las temperaturas nocturnas más altas.

Sin embargo, la correlación más significativa entre las distintas variables y las temperaturas fue de -0.826 y es la asociada a la distancia al centro de la ciudad, es decir, que mientras más alejado se esté de la zona más consolidada de la ciudad, menor temperatura se tendrá. Asimismo, la variable de la altura tiene un peso significativo de -0.723, lo que explica que las zonas más altas dentro de la ciudad disipan el calor más rápido que las zonas bajas.

También se identifica que el segundo sector más vulnerable por edad que va de 0 a 14 años (-0.496), en realidad se localizan en las zonas donde se concentran en menor medida las temperaturas nocturnas altas, así como las zonas con mayor pendiente (-0.401), mayor porcentaje de área libre (-0.392) y donde se tiene mayor superficie vial por personal ocupado y población (-0.373).

En cuanto a los perfiles térmicos, el primero de ellos que muestra el corte A-B (figura 9) y que cruza la ciudad de norte a sur, se puede observar una mayor oscilación térmica que varía entre los 30 y los 42.5 °C durante el día tanto, en la zona urbana como en las afueras de la misma. Algunos de los usos de suelo habitacional, mixtos y mixto especializado, son los que mantienen las temperaturas más altas a lo largo del perfil, pero sobre todo en la parte sur de la ciudad.

Asimismo, las áreas de cultivo localizadas al sur de la ciudad, es una de las coberturas

naturales que presenta las temperaturas más altas, por el contrario, a las áreas cubiertas por árboles.

Tabla 3. Índice de Pearson con Temperaturas de Superficie nocturnas. Fuente elaboración propia.

<b>VARIABLES CON CORRELACIONES &gt; 0.15 CON MODIS</b>	
<b>Indicador</b>	<b>Correlación</b>
LandSat	0.476
Población 65 o más	0.460
Densidad habitacional	0.386
Porcentaje de calles pavimentadas	0.307
Unidades económicas por hectárea	0.272
Población ocupada	0.226
COS	0.200
Unidades económicas	0.169
Porcentaje de uso mixto	0.158
Vivienda	0.152
Porcentaje de vialidad y espacio público	-0.193
Longitud de vía por manzana	-0.330
Suficiencia vial por personal ocupado y población	-0.373
Porcentaje de área libre	-0.392
Pendiente	-0.401
Población de 0 a 14 años	-0.496
Altura	-0.723
Distancia al centro de la ciudad	-0.826

Por otro lado, en cuanto a las temperaturas nocturnas distribuidas en el perfil, se puede observar una mayor estabilidad en las mismas, concentrando las temperaturas más altas de manera más uniformemente en la zona urbana y las más bajas en el área circundante.

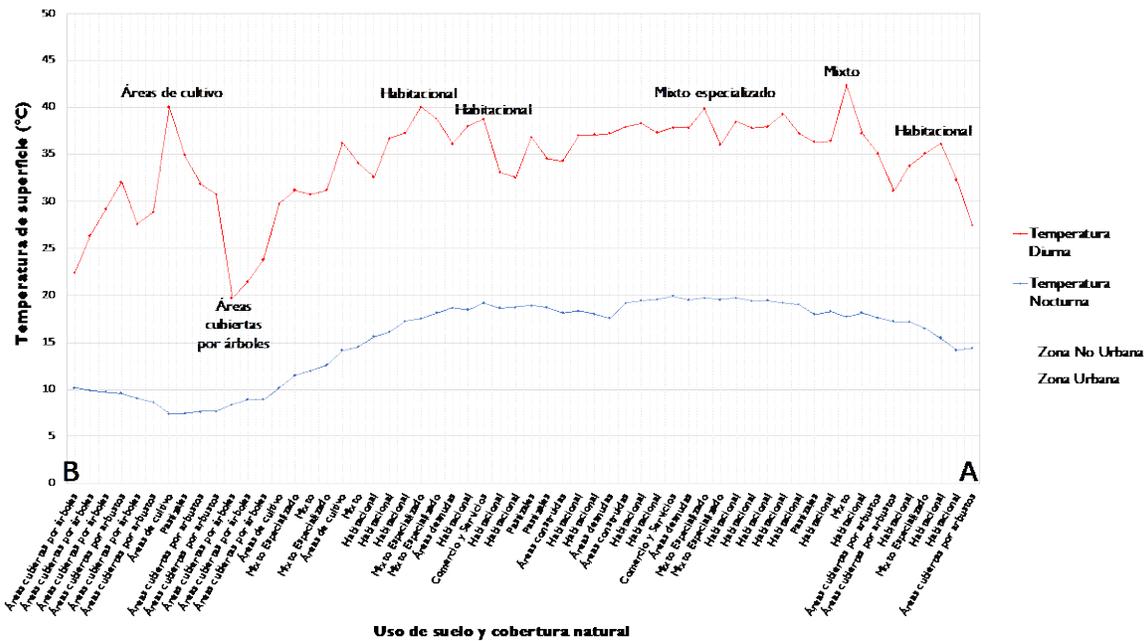


Figura 9. Perfil térmico A-B. Fuente: elaboración propia.

El perfil C-D (figura 10) presenta en general una menor variación entre las temperaturas diurnas máximas y mínimas (de 35 a 42 °C) dentro y fuera de la Ciudad, a excepción de uno de los puntos de medición (a) correspondiente a la cubierta de un centro comercial que recientemente había sido recubierta por un material termorreflejante. Esto permitió

mantener una temperatura superficial de cubierta por debajo de los 20 °C, manteniendo una diferencia de hasta 22 °C con respecto a sus alrededores. De tal manera que también durante la noche, la cubierta mantuvo casi la misma temperatura que durante el día, sino que también con su entorno.

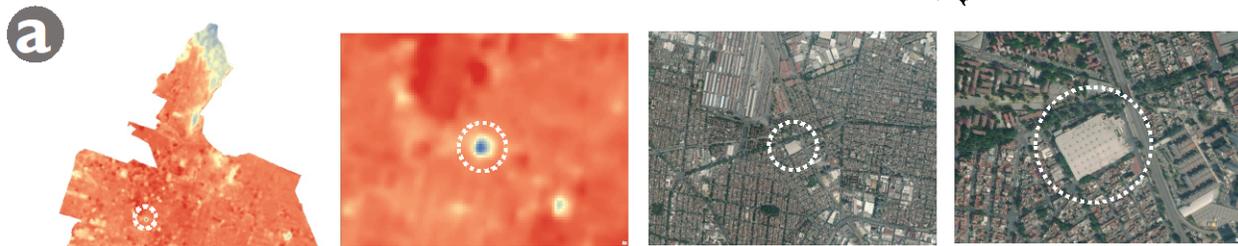
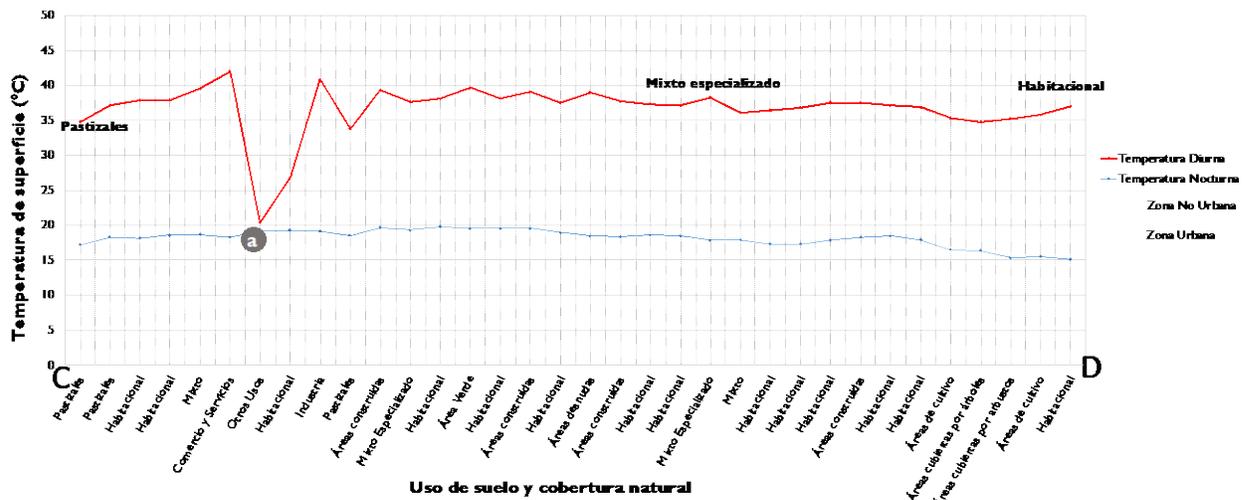


Figura 10. Perfil térmico C-D. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el tercer perfil E-F (figura 11) se localizó en el norte de la Ciudad, integrando al Aeropuerto Internacional Benito Juárez (b) como parte de los equipamientos e infraestructura de mayor superficie. En este sentido se puede ver que, a lo largo del perfil térmico diurno, las temperaturas máximas y mínimas oscilan entre los 31 y 45°C, siendo la zona del aeropuerto donde se concentran las temperaturas más altas.

Por el contrario, en la noche, las temperaturas bajan entre los 17 y 20 °C, localizando las temperaturas mínimas nuevamente en el aeropuerto. Esto, probablemente, debido a que la mayor superficie del equipamiento es terreno natural permitiendo disipar el calor almacenado durante el día, de manera más eficiente.

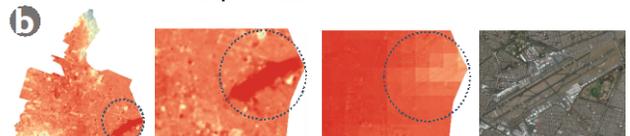
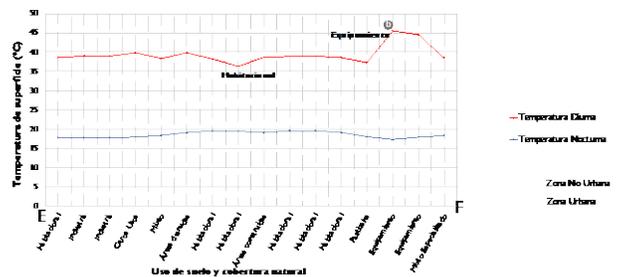


Figura 11. Perfil térmico E-F. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

El análisis de la manifestación de la Isla de Calor Urbano conforme a la estructura funcional de La Ciudad de México ha permitido identificar las relaciones socioeconómicas, de uso, cobertura,

localización, etc., de mayor vulnerabilidad debido a su relación espacial con las zonas de mayor temperatura diurna y nocturna en este territorio.

De tal manera, se identificó que las zonas donde se ha manifestado una mayor concentración del fenómeno de la Isla de Calor Urbano con temperaturas de superficie nocturnas de hasta 22 °C<sup>4</sup>, corresponde a gran parte del centro-norte de la ciudad (Alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez), siendo estas las más consolidadas, más densas, de mayor actividad económica y con mayor cantidad de población vulnerable a las altas temperaturas, es decir, aquella cuya edad oscila entre los 60 y 65 años. Por el contrario, las temperaturas más bajas se localizaron en las zonas menos consolidadas de la Ciudad por su carácter de irregularidad y dispersión con grandes áreas intermedias de cobertura natural, además de localizarse a mayor altura y a mayor distancia con respecto al centro de la Ciudad.

Contrario a lo que conceptualmente se ha planteado respecto a que la ciudad sustentable corresponde a una ciudad morfológicamente compacta y de estructura centralizada, para el caso de la Ciudad de México y específicamente en términos térmicos, se manifiesta de manera opuesta.

Con esto lo que se propone no es generar ciudades dispersas y fragmentadas, sino que, a partir de la identificación de las zonas consolidadas, densas y de mayor superficie artificializada dentro de las ciudades, se integren áreas intermedias de cobertura natural que hagan de la ciudad un conjunto de espacios más permeables que posibiliten la disipación

<sup>4</sup> La temperatura del aire de confort térmico para La Ciudad de México oscila entre los 24.09 °C y los 19.09 °C de acuerdo con Auliciems.

del calor más eficientemente. Por otro lado, el empleo de materiales termorreflejantes en cubiertas industriales o de grandes comercios y usos mixtos, permitiría bajar la intensidad no sólo de la Isla de calor urbano superficial e incluso atmosférica, sino también reducir los consumos energéticos para la climatización al interior de las edificaciones con dichos materiales.

## 5. Reconocimiento de autoría

*Itzia Gabriela Barrera Alarcón:* Administración del proyecto; Metodología; análisis de datos; análisis formal; investigación; escritura-borrador original; escritura-revisión y edición. *Camilo Caudillo Cos:* Metodología; curación de datos; recursos; análisis formal. *Sandra Lizbeth Medina Ramírez:* Metodología, curación de datos; recursos. *Gerardo Felipe Ávila Jiménez:* Metodología, curación de datos; recursos. *Jorge Alberto Montejano Escamilla:* supervisión; conceptualización, ideas, revisión.

## Referencias

- [1] T. R. Oke, "Towards better scientific communication in urban climate," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 84, no. 1-3, pp. 179-190, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0153-0>.
- [2] O. R. García-Cueto, E. Jáuregui-Ostos, D. Toudert, and A. Tejeda-Martinez, "Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use," *Atmósfera*, vol. 20, no. 2, pp. 111-131, 2007. <http://scielo.unam.mx/pdf/atm/v20n2/v20n2a1.pdf>
- [3] J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote

sensing of urban climates," *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, pp. 370-384, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).

[4] W. Zhou, G. Huang, and M. L. Cadenasso, "Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 102, no. 1, pp. 54-63, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>

[5] C. Yin, M. Yuan, Y. Lu, Y. Huang, and Y. Liu, "Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model," *Sci. Total Environ.*, vol. 634, pp. 696-704, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.350>

[6] B. Zhou, D. Rybski, and J. P. Kropp, "The role of city size and urban form in the surface urban heat island," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 4791, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2>

[7] Felipe Fernández García, Fernando Allende Álvarez, Domingo Rasilla Álvarez, Alberto Martilli, and Jorge Alcaide Muñoz, *Estudio de detalle del clima urbano de Madrid*. Madrid: Ayuntamiento de Madrid, 2016. <https://www.divulgameteo.es/fotos/meteoroteca/Estudio-clima-urbano-Madrid.pdf>

[8] T. R. Oke, *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. Taylor & Francis e-Library, 1987.

[9] M. C. Moreno-García, "Intensity and form of the urban heat island in Barcelona," *Int. J. Climatol.*, vol. 14, no. 6, pp. 705-710, 1994. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140609>

[10] P. Lin, S. S. Y. Lau, H. Qin, and Z. Gou, "Effects of urban planning indicators on urban heat island: a case study of pocket parks in high-rise high-density environment," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 168, pp. 48-60, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.024>

[11] A. J. Arnfield, "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of

energy and water, and the urban heat island," *Int. J. Climatol.*, vol. 23, no. 1, pp. 1-26, 2003. <https://doi.org/10.1002/joc.859>

[12] T. R. Oke, "City size and the urban heat island," *Atmos. Environ.*, 1973. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)

[13] H. Tran, D. Uchihama, S. Ochi, and Y. Yasuoka, "Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities," *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, vol. 8, no. 1, pp. 34-48, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003>

[14] M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, and L. Bounoua, "Remote Sensing of Environment Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 3, pp. 504-513, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>

[15] S. Peng et al., "Surface urban heat island across 419 global big cities," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 696-703, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1021/es2030438>

[16] K. W. Oleson, G. B. Bonan, and J. Feddema, "Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 37, no. 3, 2010. <https://doi.org/10.1029/2009GL042194>

[17] J. Peng, Y. Hu, J. Dong, Q. Liu, and Y. Liu, "Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: A radius approach," *Sci. Total Environ.*, vol. 714, p. 136792, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136792>

[18] L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, B. G. Heusinkveld, J. A. Elbers, B. L. van Driel, and A. A. M. Holtslag, "Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration," *Build. Environ.*, vol. 83, pp. 91-103, Jan. 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>

[19] L. Barradas, J. Cervantes, and G. Balderas, "UHI analysis in Puebla, Mexico, a high altitude tropical city." 2012. [https://www.researchgate.net/publication/270050127\\_UHI\\_analysis\\_in\\_Puebla\\_Mexico\\_a\\_high\\_altitude\\_tropical\\_city](https://www.researchgate.net/publication/270050127_UHI_analysis_in_Puebla_Mexico_a_high_altitude_tropical_city)

[20] I. Barrera, "Metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana a partir del análisis de las características climáticas y del medio físico construido.," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2018. 10.13140/RG.2.2.32151.44961

[21] V. Barradas, "La isla de calor urbana y la vegetación arbórea," *Oikos*, vol. 7, pp. 16-19, 2013.

[https://www.researchgate.net/publication/265905412\\_La\\_isla\\_de\\_calor\\_urbana\\_y\\_la\\_vegetacion\\_arborea](https://www.researchgate.net/publication/265905412_La_isla_de_calor_urbana_y_la_vegetacion_arborea)

[22] A. S. Díaz and E. P. Ruiz, "Uso De Percepcion Remota Y Sistemas De Informacion Geografica Para La Determinacion De Islas De Calor Urbano En Ciudad Juarez, Chihuahua," *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, 2015. <https://1library.co/document/zgwm113n-percepcion-remota-sistemas-informacion-geografica-determinacion-urbano-chihuahua.html>

[23] M. Méndez, C. Constantino, M. Uribe, G. Becerril, and L. Alejandra, "Isla de calor en Toluca, México," *Cienc. ergo sum*, vol. 14-3, pp. 307-316, 2007. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10414308>

[24] M. B. Oseguera and V. L. Barradas, "The Actual Urban Heat Island in Mexico City," *8th International Conference on Urban Climate*, vol. W5.222, no. August, pp. 10-11, 2012. 10.13140/2.1.3669.4081

[25] J. Villanueva-Solis, A. Ranfla, and A. Quintanilla-Montoya, "Isla de Calor Urbana:

Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima Árido Extremo," *SciELO*, 2017. doi: 10.4067/S0718-07642013000100003

[26] L. Mercado and I. Marincic, "Morfología de Isla de Calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable.," *Biotecnia*, vol. XIX, pp. 26-33, 2017. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v19i0.407>

[27] J. Navarro-Estupiñan, A. Robles-Morua, R. Díaz-Caravantes, and E. R. Vivoni, "Heat risk mapping through spatial analysis of remotely-sensed data and socioeconomic vulnerability in Hermosillo, México," *Urban Clim.*, vol. 31, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100576>

[28] INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "México en cifras," 2020. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=09#collapse-Resumen>.

[29] CentroGeo, "Plataforma de Información Geoespacial," 2022. [Online]. Available: <https://idegeo.centrogeo.org.mx>.

[30] INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Aspectos Geográficos. CDMX," 2018.

[31] M. Stathopoulou and C. Cartalis, "Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no. 12, pp. 2592-2605, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.017>

[32] Q. Weng, P. Fu, and F. Gao, "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data," *Remote Sens. Environ.*, vol. 145, pp. 55-67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.003>

[33] A. Karnieli, M. Bayasgalan, Y. Bayarjargal, N. Agam, S. Khudulmur, and C. J. Tucker,

**Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Volumen 5 (3): 312-330.**

"Comments on the use of the Vegetation Health Index over Mongolia," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 27, no. 10, pp. 2017-2024, 2006.  
<https://doi.org/10.1080/01431160500121727>

[34] USGS, "United States Geological Survey," 2020. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov>.

[35] N. Agam, W. P. Kustas, M. C. Anderson, F. Li, and C. M. U. Neale, "A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery," *Remote Sens. Environ.*, vol. 107, no. 4, pp. 545-558, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.006>

[36] J. Montejano et al., "Urban form and productivity in México 1995-2015," *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 9, no. 1, pp. 300-316, 2020.  
<https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n1p300>

Derechos de Autor (c) 2022 Itzia Gabriela Barrera Alarcón, Camilo Alberto Caudillo Cos, Sandra Lizbeth Medina Fernández, Felipe Gerardo Ávila Jiménez, Jorge Alberto Montejano Escamilla



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)