



Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Planeación Urbana y Regional  
Maestría en Estudios de la Ciudad



# Islas de calor urbanas superficiales. Casos de Toluca y Zinacantepec, Zona Metropolitana de Toluca

Tesis

Que para obtener el grado de Maestro en Estudios de la Ciudad

Presenta

Lic. en C.A. Martín David Rosas Martínez

Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento:

Ordenamiento Ambiental y Vulnerabilidad Urbana

Comité de Tutores

Tutor académico: Dr. en C. Salvador Adame Martínez

Tutores adjuntos: Dr. en C.A. Alejandro Rafael Alvarado Granados

Mtra. en D.M. Guadalupe del Carmen Hoyos Castillo

Toluca, Estado de México, septiembre de 2024



La Maestría en Estudios de la Ciudad, impartida en la Facultad de Planeación Urbana y Regional (FaPUR) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), forma parte del Sistema Nacional de Posgrados del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). Esta investigación se realizó gracias al apoyo de la beca otorgada por el CONAHCYT, que promueve la excelencia en la formación de posgrados en México.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Planteamiento del problema.....	7
Justificación.....	11
Objetivos e Hipótesis .....	12
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES.....	14
1.1. Clima urbano.....	14
1.1.1. Causas y consecuencias del clima urbano.....	16
1.1.2. Zonas climáticas locales.....	18
1.1.3. Cambio y variabilidad climáticos.....	26
1.2. Isla de Calor Urbana (ICU).....	29
1.2.1. Tipos.....	30
1.2.2. Características.....	33
1.2.3. Conformación.....	35
1.2.4. Impactos.....	40
1.2.5. Métodos de detección.....	42
1.3. Estructura urbana.....	46
1.4. Percepción remota.....	49
1.5. Reflectancia.....	58
1.6. Análisis espacial.....	61
1.7. Conclusión parcial.....	63
CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA DE ISLAS DE CALOR URBANAS.....	67
2.1. Estudios de casos a nivel internacional.....	67
2.2. Estudios de casos a nivel nacional.....	78
2.3. Estudios de casos a nivel estatal.....	84

2.4. Conclusión parcial.....	88
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA MEDIR ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES.....	90
3.1. Descripción de la zona de estudio.....	90
3.2. Materiales y método.....	93
3.2.1. Datos para condiciones atmosféricas.....	94
3.2.2. Datos y procesos para temperatura superficial.....	94
3.2.3. Datos para superficie artificial (uso de suelo urbano).....	98
3.3. Conclusión parcial.....	100
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	102
4.1. Superficie artificial (uso de suelo urbano).....	103
4.2. Temperatura superficial por estaciones.....	104
4.2.1. Temperatura de la superficie en primavera (26 de marzo).....	105
4.2.2. Temperatura de la superficie en verano (30 de junio).....	107
4.2.3. Temperatura de la superficie en otoño (12 de octubre).....	110
4.2.4. Temperatura de la superficie en invierno (29 de enero).....	112
4.3. Identificación de islas de calor urbanas superficiales.....	114
4.3.1. Islas de calor urbanas superficiales en primavera (26 de marzo).....	115
4.3.2. Islas de calor urbanas superficiales en verano (30 de junio).....	120
4.3.3. Islas de calor urbanas superficiales en otoño (12 de octubre).....	124
4.3.4. Islas de calor urbanas superficiales en invierno (29 de enero).....	127
4.4. Conclusión parcial.....	130
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	132
CONCLUSIONES.....	136
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	142
ANEXOS.....	152

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las islas de calor urbanas superficiales y atmosféricas.....	31
Cuadro 2. Factores que influyen en el desarrollo de las ICU.....	37
Cuadro 3. Características urbanas y suburbanas importantes para la formación de ICU y su efecto en el balance energético de la superficie terrestre.....	39
Cuadro 4. Impacto de las islas de calor urbanas, clasificada por región climática.....	40
Cuadro 5. Casos de estudio internacionales.....	77
Cuadro 6. Casos de estudio nacionales.....	84
Cuadro 7. Diseño de la investigación.....	93
Cuadro 8. Fechas de estudio con condiciones anticiclónicas.....	94
Cuadro 9. Descripción de las categorías utilizadas en la superficie artificial.....	99
Cuadro 10. Clasificación de la superficie artificial por intensidad de antropización.....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las zonas climáticas locales.....	22
Figura 2. Principales características de las ICU.....	33
Figura 3. Formas de teledetección.....	50
Figura 4. Componentes de un sistema de Teledetección.....	53
Figura 5. Propagación de la energía electromagnética.....	55
Figura 6. El espectro electromagnético.....	56
Figura 7. Formación de la imagen multiespectral.....	58
Figura 8. Mapa de la dinámica de la isla de calor de Krasnodar, Rusia 2014 – 2020.....	72
Figura 9. Mapa de las temperaturas de la superficie terrestre (LST) y la ubicación de las zonas industriales de Minsk el 11 de junio de 2020.....	76
Figura 10. Plano de la ciudad de Tampico, incluyendo los recorridos que se marcan en color rojo.....	80
Figura 11. Ubicación geográfica de la Zona Metropolitana de Toluca y zona de estudio.....	92
Figura 12. Procedimiento para el análisis de la isla de calor superficial (ICUS).....	95
Figura 13. Superficie artificial de 2022.....	103
Figura 14. Temperatura de la superficie en primavera 2022 (26 de marzo).....	105
Figura 15. Temperatura de la superficie en verano 2022 (30 de junio).....	108
Figura 16. Temperatura de la superficie en otoño 2022 (12 de octubre).....	111
Figura 17. Temperatura de la superficie en invierno 2022 (29 de enero).....	112

Figura 18. Islas de calor superficiales en primavera (26 de marzo).....	116
Figura 19. Islas de calor superficiales en verano (30 de junio).....	121
Figura 20. Islas de calor superficiales en otoño (12 de octubre).....	125
Figura 21. Islas de calor superficiales en invierno (29 de enero).....	128
Figura 22. Constancia de Aceptación de Publicación del Artículo Científico.....	153
Figura 23. Constancia de Diplomado en Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Ambientales (DESCA).....	155

## **RESUMEN**

Las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) son un fenómeno cada vez más relevante en el estudio del cambio climático y la planificación urbana, ya que influyen en el bienestar humano y en el medio ambiente. Este estudio se enfoca en la identificación y análisis de las ICUS en los municipios de Toluca y Zinacantepec, en la Zona Metropolitana de Toluca, durante el año 2022. A través del uso de imágenes satelitales de alta resolución (Landsat) y técnicas de percepción remota, se midió la temperatura superficial en las diferentes estaciones del año, lo que permitió identificar las áreas más afectadas por este fenómeno. El estudio también analiza la relación entre la intensidad de las ICUS y diversos factores urbanos, como el uso de suelo, la densidad de población y la morfología de la ciudad.

Los resultados muestran que las áreas con mayor concentración de superficies impermeables, como asfalto y concreto, presentan una mayor intensidad de las ICUS, mientras que las zonas con vegetación y cuerpos de agua tienden a experimentar temperaturas más bajas. Además, se identificaron variaciones estacionales significativas en la distribución de las ICUS, siendo más intensas en verano. Este análisis permite no solo comprender el comportamiento térmico de la Zona Metropolitana de Toluca, sino también proponer medidas de mitigación a través de la implementación de políticas públicas orientadas a reducir la temperatura en áreas críticas. Se recomienda aumentar las áreas verdes y mejorar la planificación urbana para mitigar los efectos de las ICUS en el contexto del cambio climático.

Palabras clave:

Islas de calor urbanas, temperatura superficial, percepción remota, uso del suelo, planificación urbana, políticas públicas.



## **ABSTRACT**

Surface Urban Heat Islands (SUHI) have become an increasingly important phenomenon in the study of climate change and urban planning, as they significantly impact human well-being and the environment. This research focuses on the identification and analysis of SUHI in the municipalities of Toluca and Zinacantepec, located within the Metropolitan Area of Toluca, during the year 2022. Using high-resolution satellite imagery (Landsat) and remote sensing techniques, surface temperatures were measured across the different seasons, allowing for the identification of areas most affected by this phenomenon. The study also examines the relationship between SUHI intensity and various urban factors, such as land use, population density, and urban morphology.

The findings reveal that areas with a higher concentration of impermeable surfaces, such as asphalt and concrete, exhibit greater SUHI intensity, whereas zones with vegetation and water bodies tend to experience lower temperatures. Additionally, significant seasonal variations in SUHI distribution were observed, with the highest intensities recorded during the summer months. This analysis not only enhances the understanding of the thermal behavior within the Metropolitan Area of Toluca but also offers recommendations for mitigation strategies through the implementation of public policies aimed at reducing temperatures in critical areas. It is recommended to increase green spaces and improve urban planning to mitigate the effects of SUHI, especially in the context of global climate change.

Keywords:

Urban heat islands, surface temperature, remote sensing, land use, urban planning, public policies.

## **INTRODUCCIÓN**

En un mundo cada vez más urbanizado, las ciudades se han convertido en puntos candentes de actividad humana y desarrollo. Sin embargo, detrás del resplandor de los edificios y la estructura urbana, se esconde un fenómeno que está ganando cada vez más atención: las Islas de Calor Urbanas Superficiales (ICUS). Estas áreas, comúnmente encontradas en entornos urbanizados, representan una manifestación tangible de cómo nuestras actividades humanas pueden alterar significativamente el clima local y, en última instancia, influir en el bienestar de las personas y el medio ambiente.

Las islas de calor superficiales se han convertido en un tema de creciente interés en el ámbito de la investigación urbana y ambiental. Este fenómeno se refiere al aumento de la temperatura en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes, debido a la alta concentración de superficies impermeables y materiales que absorben y retienen calor, como el asfalto y el concreto.

La urbanización rápida y no planificada contribuye significativamente a la creación de islas de calor superficiales, ya que reemplaza la vegetación natural con infraestructuras artificiales que alteran el balance energético de las ciudades (Oke, 1982).

Las Islas de Calor Urbanas Superficiales se definen como la disparidad de temperaturas entre el área urbana y sus entornos adyacentes, evidenciando el impacto directo de las actividades humanas y el espacio destinado para ellas. Este fenómeno surge de dos procesos interrelacionados. El primero es la transformación del suelo natural en suelo artificial, cuyos materiales suelen tener una mayor capacidad para retener el calor. Por consiguiente, a medida que aumenta la extensión de las superficies construidas, se incrementa la modificación de los factores climáticos que regulan el clima local.

El segundo proceso alude a las actividades humanas que tienen lugar en las ciudades, principalmente relacionadas con la producción y consumo de energía. Esta combinación de factores, que incluye el fenómeno mencionado, el aumento de la población urbana y las actividades asociadas a su desarrollo, así como la demanda de espacio para llevarlas a cabo, están poniendo en riesgo la seguridad de las ciudades.

Según su medición, las Islas de Calor Urbanas pueden dividirse en dos categorías: las atmosféricas (ICUA), que se detectan mediante la temperatura del aire entre la capa dosel y la capa límite de la ICU; y las superficiales (ICUS), que se analizan a partir de las temperaturas de superficie terrestre obtenidas por percepción remota. Aunque ambas muestran patrones espaciales similares, las ICUA tienden a presentar una mayor disparidad térmica durante la noche, mientras que las ICUS lo hacen durante el día.

La intensidad de las ICUS de una ciudad depende de las métricas empíricas e indicadores utilizados para medir el fenómeno. Por lo tanto, al examinar su naturaleza física, está influenciada por diversos factores que pueden clasificarse generalmente según Barrera y otros (2022) en:

1. Factores Externos: Incluyen la ubicación geográfica (latitud/longitud), el clima (especialmente el viento), la proximidad de los cuerpos de agua (relacionadas con la circulación de brisas marinas o de lagos), la presencia de vegetación, entre otros.
2. Factores Intrínsecos: Representan características específicas de la ciudad, como su tamaño, la composición del suelo, las emisiones de calor generadas por la actividad humana, la estructura funcional de la ciudad, entre otros.

No obstante, tanto las Islas de Calor Atmosféricas como las Superficiales están estrechamente ligadas a las características del uso del suelo y la configuración

urbana, lo que resulta en diferencias térmicas entre áreas expuestas directamente a la radiación solar y aquellas que están sombreadas por edificaciones.

Se han investigado las manifestaciones de este fenómeno en varias ciudades, cada una con sus propias particularidades en cuanto a la intensidad, duración, extensión, características del suelo (como tipos de pavimento en calles y carreteras, materiales de construcción, tipos de techos, cantidad de áreas verdes y cuerpos de agua), procesos de planificación urbana, estructura urbana, y clima, entre otros aspectos. Este enfoque ha permitido la exploración de estrategias que buscan mejorar las condiciones térmicas dentro de las ciudades. Para ello, se emplean diversos modelos numéricos diseñados para simular los procesos fundamentales que regulan el intercambio de calor, humedad e impulso en la cubierta urbana.

Igualmente, investigaciones recientes han demostrado que las islas de calor superficiales no solo afectan la temperatura del aire, sino que también influyen en el consumo energético, la calidad del aire y la salud pública. Por ejemplo, estudios han mostrado que las ciudades con mayores temperaturas superficiales experimentan una demanda energética más alta debido al uso intensivo de aire acondicionado, lo que a su vez incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero (Santamouris, 2015). Además, las altas temperaturas pueden exacerbar problemas de salud como el estrés térmico y las enfermedades respiratorias, afectando desproporcionadamente a poblaciones vulnerables (Tan y otros, 2010).

Por otro lado, la mayor parte de este tipo de investigaciones se ha centrado en examinar la Isla de Calor Urbana Atmosférica a nivel microescala, utilizando datos recopilados por varias estaciones meteorológicas. Por otro lado, el uso de tecnologías de percepción remota para analizar la Isla de Calor Urbana Superficial ha sido menos común en el país para estudiar este fenómeno a nivel local.

El propósito de esta investigación es detectar las áreas más susceptibles al fenómeno de la Isla de Calor Urbana Superficial, analizando su ubicación y su relación con

diferentes aspectos de la estructura urbana de la ciudad. Se busca que los hallazgos obtenidos puedan ser utilizados para orientar la formulación de políticas públicas y la planificación urbana en la Zona Metropolitana de Toluca.

Este estudio ha analizado la intensidad y comportamiento de las Islas de Calor Urbanas Superficiales en los municipios de Toluca y Zinacantepec durante las cuatro estaciones del año 2022, utilizando imágenes satelitales de alta resolución (Landsat) y estableciendo las relaciones bivariados entre las temperaturas superficiales diurnas y diversos aspectos de la estructura urbana y la ubicación geográfica. Gracias a este tipo de análisis, se ha logrado detectar las áreas con mayor susceptibilidad a este fenómeno, así como su relación con las características específicas de la estructura urbana en dichas zonas.

## **Planteamiento del problema**

En las últimas décadas, los climas urbanos a nivel mundial han experimentado cambios significativos debido principalmente a la urbanización acelerada y la transformación del uso del suelo. Estos cambios han afectado considerablemente el bienestar de los habitantes, manifestándose en diversos fenómenos que alteran la calidad de vida. La urbanización no solo modifica la estructura física de las ciudades, sino que también influye en la calidad del aire, el régimen de precipitaciones, y la biodiversidad urbana (Godínez y otros, 2018).

El acelerado incremento de la urbanización, en la actualidad, ha provocado que la mitad de la población mundial viva en ciudades, y se proyecta que crezca casi un 2% anual, según la Organización de las Naciones Unidas (2012). Como referencia, América Latina y el Caribe es la región más urbanizada del mundo, aunque también es una de las regiones menos pobladas en relación con su territorio. Casi el 80% de la población vive en ciudades. Desde la década de 1950 hasta la década de 1990 se aceleró el fenómeno de la migración rural-urbana, por lo que se cataloga como la “explosión urbana” (ONU-HABITAT, 2012).

El aumento poblacional genera incremento en la demanda de vivienda e infraestructura y equipamiento urbano en las ciudades, lo que da a procesos de cambios de uso de suelo y su cobertura. La población mundial está creciendo anualmente en alrededor de 83 millones de habitantes (1,1% por año). La población mundial ha pasado de 1000 millones en 1800 a 7900 millones en 2020. La Organización de las Naciones Unidas predice que la población seguirá creciendo, estimando que alcanzará los 8.600 millones a mediados de 2030, los 9.800 millones a mediados de 2050 y los 11.200 millones para 2100 (ONU, 2023).

La expansión de los asentamientos humanos y el crecimiento poblacional respectivo detonan el aumento de las edificaciones, uso de materiales como el hormigón y concreto, las redes viales pavimentadas, el número de automóviles y el de las

emisiones vehiculares, los cuales son factores importantes que han provocado un aumento significativo de la temperatura ambiente de los centros urbanos (Galindo y otros, 2012).

En el caso de México, se observa una clara tendencia hacia el incremento de la población urbana. En 1950, cerca del 40% de la población vivía en ciudades; actualmente, casi el 80% reside en áreas urbanas. Sin embargo, este crecimiento se ha ralentizado en las últimas décadas, ya que para el año 2050 se proyecta que solo el 88% de la población vivirá en zonas urbanas. Estos datos presentan un panorama sin precedentes en la historia del país (UNU, 2012).

En México, Jáuregui (1973) fue uno de los pioneros en el estudio del fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) en el país. Su investigación demostró que, para la década de 1970, la Ciudad de México presentaba islas de calor atmosféricas con una diferencia de 2°C en las temperaturas medias en comparación con las áreas circundantes. Jáuregui señaló que la isla de calor urbana en la Ciudad de México se intensificó debido al acelerado crecimiento demográfico y a la expansión espacial de la ciudad. Además, advirtió que este fenómeno podría agravarse con la formación de más ciudades, como es el caso de las zonas metropolitanas.

Por su parte, Parada (2015) encontró que, durante el período de 1996 a 2009, la isla de calor urbana (ICU) en la Zona Metropolitana de Guadalajara se concentraba principalmente en el centro, con temperaturas promedio de 32°C. El estudio señala que estas islas de calor tienden a surgir en áreas con un rápido crecimiento poblacional. Además, Parada demuestra que el comportamiento y la intensidad de las islas de calor varían significativamente según el tamaño de la ciudad o la zona metropolitana.

En el caso de los municipios considerados para esta investigación, se ha presentado un crecimiento acelerado derivado principalmente de la instalación de corredores industriales, inicialmente en Toluca generando cambios de uso de suelo por el

incremento poblacional asociado a las migraciones que se dieron a partir de 1960 (COESPO, 2012).

En esta zona, los datos de ICU disponibles están a nivel de ciudad. Torres (2020) demuestra que dentro de la ciudad de Toluca se presentó un crecimiento acelerado de población que ha generado cambios en el clima, donde la temperatura media anual de la ciudad de Toluca es de 12,9 °C, cayendo a -2,0 °C en invierno y subiendo a casi 28,0 °C en verano, con una oscilación térmica de 30,0 °C entre estaciones. La temperatura más alta es durante los meses de verano, de abril a mayo y oscila entre 26,0 °C y 28,0 °C.

Torres (2020) indica que el calor en el área urbana de Toluca está relacionado con el efecto de isla de calor. Durante el invierno, las temperaturas varían entre 3.0 °C durante el día y 1.5 °C en la noche, mientras que en verano la fluctuación es de 2.0 °C. La insolación y los materiales de construcción influyen en las diferencias extremas de temperatura entre el día y la noche, con temperaturas más altas durante el día, especialmente en verano (Torres, 2020).

Asimismo, los materiales usados en la construcción de los distintos espacios de la ciudad poseen propiedades térmicas que propician que la temperatura pueda tener un comportamiento distinto a lo largo del territorio. No obstante, se tiene que evidenciar si los elementos de la estructura urbana modifican las condiciones climáticas regionales de la zona, provocando variabilidad en la temperatura y posibilitando la formación de islas de calor. Así como también, se tiene que evidenciar cómo las trazas de las calles, la morfología y edificaciones de las ciudades están contribuyendo a la formación de las islas de calor.

Por otra parte, otro de los factores que se presentan en los municipios de Toluca y Zinacantepec es el efecto albedo, debido a la capacidad de las superficies para reflejar la radiación solar. El suelo más oscuro absorbe mucho más la energía calorífica, mientras que una superficie más clara tiende a rebotar esos rayos de sol.



La superficie urbana, en general, tiene tonalidades grises o negras debido a los materiales constructivos, con lo cual, el efecto albedo es bajo y la capacidad de absorción es muy elevada (Solé, 2021).

El problema radica, porque hay una alta capacidad calorífica de los materiales, el asfalto, el cemento, los edificios, las trazas de las calles, almacenan mucho calor durante el día y lo almacenan, de tal modo que durante la noche van 'liberando' lentamente esa energía acumulada. Este hecho puede impedir que la temperatura nocturna descienda en la Zona Metropolitana de Toluca.

Por lo tanto, la distribución de la temperatura en las zonas urbanas está afectada por la radiación solar que absorben los materiales que las componen. Las propiedades termo-físicas de estos materiales, especialmente el albedo solar y la emisividad infrarroja, influyen considerablemente en el balance energético de las ciudades. Materiales como el pavimento tienen una alta capacidad de absorción y una gran capacidad térmica. Estas características contribuyen significativamente al fenómeno de la isla de calor urbana, especialmente en climas áridos con altos niveles de radiación (Correa y otros, 2003).

Finalmente, es importante destacar que en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) se desconoce el comportamiento y la distribución de las islas de calor superficiales, especialmente en los municipios objeto de estudio. Por ello, se pretende evidenciar si este fenómeno se manifiesta a nivel de zonas metropolitanas y no únicamente en áreas específicas de una ciudad o municipio. Además, se busca identificar y analizar los posibles factores que contribuyen a la formación de este fenómeno.

Derivado de lo anterior, se planteó la siguiente pregunta:

¿Cómo el comportamiento e intensidad de las islas de calor superficiales se relacionan con los elementos de la estructura urbana?

## **Justificación**

Los cambios en el uso del suelo, la morfología y los materiales en el entorno construido son algunos de los remanentes de los procesos de expansión urbana y se consideran eventos del clima. Las ciudades varían en forma del centro a la periferia, al igual que la densidad de población, el uso de edificios, la presencia o ausencia de vegetación o la densidad del tráfico; estas variables determinan el comportamiento térmico de los espacios públicos; esto afecta el microclima urbano que, reflejando el aumento de las temperaturas y las olas de calor en las ciudades, ha incrementado el consumo de energía para refrigeración (Carrasco, Palme y Gálvez, 2016).

Entre las modificaciones urbanas, la más reconocida es la modificación térmica, la cual altera el impacto de los espacios forestales y la vegetación en las áreas urbanas, modificando las condiciones ambientales, incluido el clima de las ciudades. La escasez de grandes áreas verdes y la limitada disponibilidad de agua reducen la capacidad de transformar la energía solar mediante la fotosíntesis o la evaporación, lo que sugiere una relación directa entre las altas temperaturas urbanas, la falta de vegetación y el exceso de pavimento y asfalto (Fuentes, 2014).

La investigación y desarrollo de la climatología urbana cobra cada vez más importancia debido a las tendencias globales de urbanización y crecimiento descontrolado de las ciudades, lo que afecta directamente la calidad del aire, la salud pública, la gestión energética y la planificación urbana, por lo que mantener el control y la gestión responsable del microclima urbano es una tarea de urbanismo y gestión ambiental (Ramírez y González, 2017).

Debido a la mala planificación urbana en ciudades densamente pobladas, algunas áreas tienen islas de calor durante el día. Se sabe que a raíz de la expansión territorial y la urbanización desmedida se ha desarrollado un microclima en la zona metropolitana de Toluca. Esto se debe a que cada región, aunque sea una ciudad separada, tiene características climáticas diferentes: algunos municipios son más

húmedos y fríos; mientras que otros son más secos y cálidos. Esta situación, combinada con una mala planificación urbana y el calentamiento global, está impulsando un fenómeno conocido como islas de calor.

En el caso de la ZMT, el aumento de temperatura se ha identificado en zonas con mucho concreto y muy poco espacio verde. En cambio, las ciudades con lagos y parques no experimentan temperaturas tan altas durante todo el año. Los materiales de construcción utilizados en las ciudades, que generalmente son oscuros, absorben más energía del sol. Con una dispersión más lenta de la radiación solar, algunas áreas de la ciudad son más propensas a crear islas de calor. Este efecto es lento, por lo que mantiene el aire caliente durante varias horas en este tipo de colonias.

### **Objetivos e Hipótesis**

Objetivo general:

Analizar las islas de calor superficiales (ICUS) en los municipios de Toluca y Zinacantepec, México, durante el año 2022, con el fin de explicar su comportamiento y distribución en relación con el uso del suelo.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las condiciones geográficas y los factores urbanos que inciden en las ICUS en los municipios de estudio.
- Determinar la temperatura superficial en los municipios de Toluca y Zinacantepec durante el año 2022, con el propósito de identificar la presencia de islas de calor urbanas superficiales.
- Identificar las ICUS en la zona de estudio para explicar su distribución espacial, temporal y la intensidad con la que se producen en el territorio.
- Relacionar las ICUS en los municipios de estudio en el año 2022 con sus elementos de la estructura urbana.

## Hipótesis

Las islas de calor urbanas superficiales en los municipios de Toluca y Zinacantepec están significativamente influenciadas por los cambios de uso de suelo, la configuración de la estructura urbana y los tipos de materiales utilizados en las edificaciones.

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL SOBRE ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES

En este capítulo se reportan conceptos fundamentales de la investigación, en primera instancia se explica el clima urbano sus causas y consecuencias, las zonas climáticas locales, el cambio y variabilidad climática, posteriormente las islas de calor urbanas, su origen y conformación, características generales de las ICU, así como los tipos de islas de calor, efectos e impactos que estas traen, los métodos de detección de islas de calor, estructura urbana, teledetección, efecto albedo y finalmente el análisis espacial.

### **1.1. Clima urbano**

El crecimiento y expansión del proceso de urbanización se asocian con un cambio de la intensidad de energía que ingresa al suelo debido a la sustitución de la cubierta vegetal natural, por lo que las estructuras urbanas, como los edificios, las aceras y el asfalto, influyen directamente en las temperaturas de la superficie artificial (Alahmad y otros, 2020), este crecimiento urbano se debe al desarrollo de la economía urbana y el consiguiente crecimiento demográfico.

El clima urbano se considera tradicionalmente un componente de la naturaleza y, por lo tanto, es retomado por las ciencias físicas, como la meteorología y la climatología. Sin embargo, cuando se consideran sus causas y consecuencias, inmediatamente se evidencia que existen diferencias significativas de temperatura, humedad, ventilación o calidad del aire en los componentes (Romero y otros, 2010).

Para Monteiro (1976) “la ciudad genera su propio clima, como resultado de la interacción de todos los factores que tienen lugar sobre la capa límite urbana y que actúan para cambiar el clima a escala local. La población percibe sus efectos más directos a través de manifestaciones vinculadas a la comodidad térmica, la calidad del aire, impactos de lluvia y otros fenómenos capaces de desorganizar la vida de la ciudad y deteriorar la calidad de vida de sus habitantes” (p. 45).

Montavez y otros (2000), consideran que el clima urbano se refiere a las condiciones climáticas de las ciudades que difieren de los entornos rurales y son el resultado del desarrollo urbano. Además de muchos cambios interrelacionados y complejos, la urbanización ha provocado cambios enormes e irreversibles en el paisaje y en el entorno circundante.

Por su parte, Santos (2018), señala que el clima urbano se define como "el clima de un espacio determinado asociado a su proceso de urbanización, que expresa las condiciones atmosféricas resultantes de la interacción de diferentes escalas climáticas y de superficie".

Un clima urbano es un clima regional modificado y sus características se toman en comparación con su entorno inmediato. Con la clasificación del clima mundial realizada por Koeppen (1948), se puede interpretar que los climas con extensiones más pequeñas que son llamados "microescalas", estos están representados por un tipo de clima denominado "microclima". Padilla (2019) reporta que este microclima en una ciudad es definido como clima urbano, construido a partir de cambios a nivel local causados principalmente por condiciones urbanas.

Se puede concluir que el clima urbano es un factor clave en los cambios climáticos locales y difiere significativamente del clima en áreas rurales. Esto se manifiesta en la presencia de islas de calor, causadas por la urbanización y la alteración de los componentes biofísicos originales. Las áreas más cálidas suelen encontrarse en zonas con alta densidad de construcciones y escasa vegetación.

El indicador más común de sobrecalentamiento urbano es el aumento de la temperatura del aire, que normalmente se registra a nivel de la calle (Barrera y otros 2022).

El estudio del clima urbano es importante para comprender cómo las condiciones climáticas pueden afectar la calidad de vida en las ciudades y cómo las decisiones de

planificación urbana pueden influir en el clima local. Además, ayuda a abordar los desafíos relacionados con el cambio climático y la resiliencia urbana al diseñar ciudades más sostenibles y resistentes a las condiciones climáticas extremas.

Los estudios sobre el clima urbano han dado lugar a investigaciones sobre el fenómeno de las islas de calor, caracterizado por un perfil climático más cálido en las zonas centrales de las grandes ciudades, en comparación con los barrios residenciales, zonas periféricas o áreas verdes como parques y bosques. En las zonas rurales, la temperatura desciende abruptamente. La concentración de materiales, la verticalización de las edificaciones y la contaminación por industrias y vehículos crean condiciones climáticas específicas, afectando la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa y la calidad del aire (Santos, 2018).

#### 1.1.1. Causas y consecuencias del clima urbano

El clima urbano es un factor crucial que influye en las variaciones de temperatura entre las áreas urbanas y rurales, evidenciado por la presencia de islas de calor en las ciudades. Las áreas más cálidas se encuentran principalmente en zonas con alta densidad de edificios sociales y escasa vegetación.

Como lo comenta Romero (2010), el clima urbano es el resultado de cambios accidentales e intencionales en los climas regionales y locales que están directamente relacionados con la construcción social del espacio y el lugar. El alcance de estos cambios depende del tamaño y escala de la ciudad; la ciudad ha desarrollado una red compleja de microclimas cambiantes debido a la ubicación y el ancho de la red de carreteras, el uso del suelo, el asfalto y los materiales de construcción, y otras elevaciones y orientaciones.

Por otro lado, los objetos sociales, las calles, las estructuras y las intenciones económicas que hay detrás de estos objetos, en conjunción y en relación con las características físicas del entorno, generan cambios climáticos específicos de las

regiones urbanizadas. La urbanización y la industrialización son factores humanos extremadamente influyentes en la alteración de los climas, provocando cambios en el medio ambiente y en la calidad de vida de las personas. Así, los procesos y las decisiones económicas y políticas modelan el entorno urbano al mismo tiempo que alteran el espacio natural (Santos, 2018).

Una de las causas del clima urbano es la energía de los edificios. La Organización de las Naciones Unidas (2023) menciona que, a nivel mundial, tanto los edificios residenciales como los comerciales consumen más de la mitad de toda la electricidad. El uso continuo de carbón, hidrocarburos y gas natural para calefacción y aire acondicionado ocasionan grandes emisiones de gases de efecto invernadero. La creciente demanda de sistemas de calefacción y refrigeración, junto con la compra de acondicionadores de aire y el mayor consumo de energía de los accesorios de iluminación y los electrodomésticos conectados, contribuye al aumento de las emisiones de carbono relacionadas con la energía de los edificios.

Igualmente, la generación de electricidad y calor a partir de combustibles fósiles provoca emisiones masivas a escala mundial. La mayor parte de la electricidad todavía se produce quemando carbón o gas, produciendo dióxido de carbono y óxido nitroso, poderosos gases de efecto invernadero que cubren la tierra y atrapan el calor del sol. Un poco más de una cuarta parte de la electricidad del mundo proviene de fuentes renovables de energía eólica y solar que, a diferencia de los combustibles fósiles, emiten poco o ningún gas o contaminantes a la atmósfera (ONU, 2023), lo que contribuye con un aumento de temperatura en áreas urbanas y rurales.

Por otra parte, el uso del transporte es otra de las causas del clima urbano ya que, la mayoría de los camiones, autos y aviones funcionan con combustibles fósiles. Además, esto convierte al transporte en uno de los sectores que más contribuye a la producción de gases de efecto invernadero, especialmente en términos de emisiones de dióxido de carbono. Dado que los productos derivados del petróleo, como la



gasolina, se queman en motores de combustión interna, los vehículos terrestres constituyen la mayor parte de las fuentes de emisión. El transporte representa aproximadamente una cuarta parte de la huella de carbono relacionada con la energía del mundo (ONU, 2023).

Con respecto a las consecuencias del clima urbano, uno de los impactos más significativos es el aumento de las temperaturas. A medida que las concentraciones de gases de efecto invernadero se incrementan, también lo hace la temperatura de la superficie del planeta. La última década, de 2011 a 2020, ha registrado el mayor calentamiento en la historia, con cada década desde 1980 siendo más cálida que la anterior. Esto ha provocado más olas de calor, un incremento en enfermedades relacionadas con el calor, dificultades para el trabajo al aire libre y un aumento en la frecuencia e intensidad de incendios forestales (ONU, 2023).

El cambio climático, una de las principales consecuencias del clima urbano, representa una grave amenaza para la salud humana. Sus efectos incluyen contaminación, enfermedades, fenómenos meteorológicos extremos, desplazamientos forzados, estrés mental y aumento del hambre y la desnutrición en áreas con escasez de alimentos. Cada año, factores ambientales provocan la muerte de 13 millones de personas (ONU, 2023). Además, el cambio climático está propagando enfermedades y debilitando los sistemas de salud frente a eventos climáticos extremos.

#### 1.1.2. Zonas climáticas locales

Las zonas climáticas locales se refieren a áreas específicas dentro de una región más amplia que poseen características climáticas particulares debido a factores geográficos, topográficos y humanos. Estos factores incluyen la altitud, la proximidad a cuerpos de agua, la vegetación y la urbanización. Por ejemplo, una zona climática local puede experimentar variaciones significativas en temperatura, humedad y precipitación en comparación con áreas circundantes. La identificación y

estudio de estas zonas son cruciales para entender cómo influyen en el microclima local, afectando aspectos como la biodiversidad, la agricultura y la calidad de vida de los residentes (Stewart y Oke, 2012).

*Factores que influyen en la conformación de zonas climáticas locales, de acuerdo con Aguado (2019)*

Topografía:

- **Altitud:** Las áreas a mayor altitud suelen ser más frías y húmedas que las áreas bajas.
- **Orientación de pendientes:** Las laderas orientadas hacia el sol (sur en el hemisferio norte y norte en el hemisferio sur) suelen ser más cálidas y secas.

Proximidad a cuerpos de agua:

- **Mares y océanos:** Actúan como moderadores de temperatura, manteniendo las áreas costeras más templadas.
- **Lagos y ríos:** Pueden aumentar la humedad local y afectar las temperaturas.

Vegetación:

- **Bosques:** Pueden crear un microclima más fresco y húmedo debido a la sombra y la transpiración.
- **Áreas despejadas:** Tienden a ser más cálidas y secas.

Urbanización:

- **Islas de calor urbanas:** Las ciudades tienden a ser más cálidas que las áreas rurales debido a la concentración de edificios, asfalto y actividades humanas que generan calor.
- **Infraestructura:** Materiales de construcción como el concreto y el asfalto almacenan y liberan calor, alterando las temperaturas locales.

## *Ejemplos de zonas climáticas locales*

### Valles y depresiones:

- Suelen ser más cálidos durante el día debido a la acumulación de calor, pero pueden enfriarse rápidamente por la noche.

### Áreas costeras:

- Tienden a tener un clima más moderado con menores fluctuaciones de temperatura diaria y estacional.

### Ciudades y áreas urbanas:

- A menudo experimentan el fenómeno de las islas de calor urbanas, con temperaturas significativamente más altas que las áreas rurales circundantes.

### Bosques y selvas:

- Estos ambientes suelen ser más frescos y húmedos debido a la densa cobertura vegetal.

## *Impacto en la vida humana y el medio ambiente*

### Agricultura:

- La comprensión de los microclimas es crucial para la agricultura, ya que permite a los agricultores seleccionar cultivos adecuados para las condiciones locales específicas.

### Biodiversidad:

- Las zonas climáticas locales pueden albergar especies únicas adaptadas a esas condiciones específicas, contribuyendo a la biodiversidad regional.

Salud humana:

- Las variaciones climáticas locales pueden influir en la salud, por ejemplo, exacerbando condiciones como el asma o aumentando la incidencia de enfermedades relacionadas con el calor.

Planificación urbana:

- El diseño de ciudades debe considerar los microclimas para mejorar la calidad de vida, por ejemplo, mediante la creación de espacios verdes que mitiguen el calor urbano.

*Estudios y monitoreo*

La identificación y el monitoreo de las zonas climáticas locales se realizan mediante diversas técnicas, incluyendo:

Estaciones meteorológicas:

- Fijas y móviles, que proporcionan datos precisos sobre temperatura, humedad, viento y precipitación.

Detección remota:

- Uso de satélites y drones para recoger datos climáticos y observar cambios a gran escala.

Modelos climáticos:




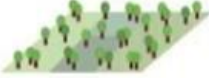













- Simulaciones computacionales que ayudan a predecir cómo pueden cambiar las condiciones climáticas locales en respuesta a diferentes factores.

Comprender las zonas climáticas locales es fundamental para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible, ya que proporciona una base científica sólida para la

adaptación proactiva a las dinámicas cambiantes del clima. Este conocimiento permite diseñar estrategias de planificación y uso de recursos más eficientes, alineadas con las particularidades climáticas de cada área. Además, facilita la implementación de políticas de mitigación que abordan de manera específica las vulnerabilidades y fortalezas de los microclimas, optimizando así la resiliencia de las comunidades y ecosistemas locales frente a los impactos del cambio climático. Al integrar estas consideraciones en la toma de decisiones, se promueve un desarrollo urbano y rural que equilibra el crecimiento económico con la conservación ambiental y el bienestar social, asegurando una calidad de vida sostenida para las generaciones presentes y futuras (Colli, 2020).

El modelo de zonas climáticas locales (ZCL) es un sistema de clasificación del paisaje que puede ser utilizado en el análisis de islas de calor urbanas superficiales. Comprende la categorización de zonas que son “regiones uniformes en cobertura del suelo, estructura, materiales y actividades humanas que se extienden entre unos cientos de metros hasta algunos kilómetros en escala horizontal” (Stewart y Oke, 2012, p. 1884). La categorización se realiza en 17 ZCL, 15 de ellas definidas por la morfología de superficie y cobertura de suelo, y 2 definidas por el uso del suelo y los materiales de construcción predominantes en cada una. El conjunto estándar está sectorizado en dos tipologías: a) construidas (ZCL 1 - 10); y b) de cobertura de suelo (ZCL A - G) (Figura 1).

Figura 1. Clasificación de las zonas climáticas locales

TIPOS DE EDIFICACIÓN	DEFINICIÓN	TIPOS DE COBERTURA	DEFINICIÓN
<b>1. Compacto en altura</b> 	Edificación densa de edificios de más de 10 pisos. Pocos árboles. Pavimento. Materiales de construcción: concreto, hierro, roca y vidrio.	<b>A. Bosque / Arbolado Denso</b> 	Densamente arbolado por especies perennes o caducifolias. Coberturas previas en su mayoría (plantas bajas). Zonas de bosques, actividad forestal o parques urbanos.
<b>2. Compacto de media altura</b> 	Edificación densa de mediana altura (3 a 9 pisos). Pocos árboles. Pavimento. Materiales de construcción: concreto, ladrillos, roca y cerámica.	<b>B. Árboles dispersos</b> 	Arbolado disperso de especies caducifolias o perennes. Coberturas previas en su mayoría (plantas bajas). Zonas de bosques, actividad forestal o parques urbanos.
<b>3. Compacto de baja altura</b> 	Edificación densa de baja altura (1 a 3 pisos). Pocos árboles. Pavimento. Materiales de construcción: concreto, ladrillos, roca y cerámica.	<b>C. Arbustos</b> 	Arbustos, matas y árboles leñosos bajos dispersos. Coberturas previas en su mayoría (suelos desnudos o arena). Zonas de matorrales o agricultura.
<b>4. Abierto en altura</b> 	Edificios de más de 10 pisos separados. Abundancia de coberturas previas (plantas bajas y algunos árboles). Materiales de construcción: concreto, hierro, roca y vidrio.	<b>D. Plantas Bajas</b> 	Paisajes dominados por cultivos, plantas bajas y/o césped. Pocos árboles. Zonas de parques urbanos o de actividad agrícola.
<b>5. Abierto de media altura</b> 	Edificios de mediana altura (3 a 9 pisos) separados. Abundancia de coberturas previas (plantas bajas y algunos árboles). Materiales de construcción: concreto, hierro, roca y vidrio.	<b>E. Rocas o pavimento</b> 	Paisajes de rocas o zonas pavimentadas. Pocos árboles. Zonas de rocosas o playas de estacionamiento.
<b>6. Abierto de baja altura</b> 	Edificios de baja altura (1 a 3 pisos) separados. Abundancia de coberturas previas (plantas bajas y algunos árboles). Materiales de construcción: madera, concreto, ladrillos, roca y cerámica.	<b>F. Suelo descubierto o arena</b> 	Áreas de cobertura con arena o suelo descubierto. Poca cobertura vegetal. Zonas de desiertos o de agricultura (luego de la cosecha).
<b>7. Construcciones bajas</b> 	Densa edificación de un piso. Pocos árboles. Tierra compactada. Materiales de construcción livianos: madera, metal corrugado y paja.	<b>G. Agua</b> 	Grandes cuerpos de agua libres como lagos o mares. O pequeñas áreas como ríos, reservorios y lagunas.
<b>8. Grandes Construcciones bajas</b> 	Grandes edificaciones bajas (1 a 3 pisos) separadas. Pocos árboles. Pavimento. Materiales de construcción: hierro, concreto, metal y roca.	<b>VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES DE LA COBERTURA</b>	
<b>9. Construcciones dispersas</b> 	Construcciones pequeñas o medianas dispersas en áreas naturales. Abundancia de las coberturas previas (plantas bajas, árboles dispersos)	<b>b. Árboles desnudos</b> 	Árboles caducifolios (invierno). Incrementan la visión del cielo. Reducen el albedo.
<b>10. Áreas Industriales</b> 	Edificios industriales de baja y media altura (chimeneas y tanques). Pocos árboles. Pavimento o tierra compactada. Materiales de construcción: metal, hierro y concreto.	<b>s. Cubierta de nieve</b> 	Más de 10 cm de nieve. Aumenta el albedo. Disminuye el ingreso de energía.
		<b>d. Suelo seco</b> 	Suelo seco. Disminuye el ingreso de energía. Aumenta el albedo. Gran ratio de Bowen.
		<b>w. Suelo húmedo</b> 	Suelo muy húmedo. Aumenta el ingreso de energía. Disminuye el albedo. Bajo ratio de Bowen.

Fuente: Stewart y Oke (2012, p.7).

El sistema de clasificación de zonas climáticas locales desarrollado por Stewart y Oke (2012) es un método para clasificar paisajes naturales y urbanos en zonas

basándose en características superficiales asociadas con el clima urbano a escala local (Rodler y Leduc, 2019), definiendo así cada área regional, teniendo en cuenta parámetros de cobertura del suelo (por ejemplo, fracción de área construida y fracción de cobertura de infiltración), parámetros morfológicos (por ejemplo, altura de edificios y árboles, rugosidad y coeficiente de visibilidad del cielo) y parámetros antropogénicos (por ejemplo, producción de calor antropogénico). De esta manera se crearon 10 zonas de construcción (ZCL 1 – 10) y 7 zonas de cobertura (ZCL A – G), cada una con la misma cobertura, estructuras, materiales y actividad humana con un alcance horizontal de cientos de metros a varios kilómetros (Stewart y Oke, 2012, citado de Rodríguez, 2020).

Las ZCL no distinguen tiempo, cultura o lugar. Son un marco estandarizado para describir las características urbanas e introducen una nueva perspectiva sobre la definición de islas de calor urbanas al utilizar la diferencia de temperatura entre las propias ZCL en lugar de la distinción tradicional urbano-rural. Por tanto, es muy importante comparar temperaturas en las ciudades y analizar el impacto de formas urbanas heterogéneas en la formación del clima local. Por supuesto, las ciudades también se pueden comparar (Rodríguez, 2020).

En los estudios que utilizaron Zonas Climáticas Locales, se tuvieron en cuenta ciertas consideraciones durante el proceso de clasificación y análisis. Los más importantes se resumen a continuación:

Aunque cada Zona tiene límites que la separan de otras, la temperatura del aire dentro de cada ZCL se mezcla e interactúa con las temperaturas en zonas adyacentes, transfiriendo calor y humedad a diversas estructuras superficiales, cobertura terrestre, suelos y actividades humanas. el aire cruza las fronteras entre territorios vecinos, se adapta a las nuevas condiciones físicas del territorio y crea transiciones térmicas. Por esta razón, se debe tener en cuenta las condiciones del

viento (predominio y velocidad) y se recomienda que cada ZCL tenga un diámetro mínimo de 400 a 1000 m (radio de 200 a 500 m) (Stewart & Oke, 2012).

La escala determina si los resultados de la clasificación son válidos o apropiados. Al tratarse de Zonas Climáticas Locales significa que existe un rango de escalas aceptables (entre micro y meso), con una resolución más alta que da como resultado fragmentos clasificados más grandes. Además, la escala debe incluir elementos localmente representativos del barrio, como la distancia entre dos edificios o el tamaño de un bloque de construcción. Si es más pequeño que esto y los píxeles capturan características más detalladas, como tejados individuales, los resultados de la clasificación serán demasiado complejos o incluso poco realistas (Rodríguez, 2020).

La ZCL tiene sus limitaciones, ya que es un sistema estandarizado que asume homogeneidad y no puede reflejar la realidad general de las ciudades, especialmente aquellas sin una planificación organizada, como es el caso de muchas ciudades alrededor del mundo, dado que el patrón espacial de la estructura urbana es muy heterogéneo (por ejemplo, una mezcla de áreas comerciales y residenciales), es posible que diferentes partes de la ciudad no alcancen el área requerida para crear una ZCL. Este problema también puede trasladarse a escala, ya que el tamaño de los píxeles que buscan la homogeneidad puede variar debido a la heterogeneidad de los elementos urbanos (Rodríguez, 2020).

La ZCL está diseñada para ser aplicable globalmente y permitir comparaciones entre diferentes estudios de clima urbano, ya que hay varias formas de medir la intensidad de las islas de calor urbanas, pero los resultados no se pueden correlacionar en la misma escala o forma entre ciudades. Sin embargo, como señala Jiménez (2016), el esquema ZCL no tiene en cuenta la influencia del terreno en el clima urbano y, dado que el terreno tiene una influencia crucial en el clima y la meteorología local, se



pueden generar errores en la representación del clima urbano bajo esta metodología para ciudades que no son planas (Rodríguez, 2020).

### 1.1.3. Cambio y variabilidad climáticos

El cambio climático inducido por el hombre afecta a todos los países del mundo. Este cambio va acompañado de un aumento de las temperaturas de una mayor variabilidad climática.

A lo largo de los años, desde la antigüedad, las fluctuaciones climáticas se han producido en diferentes escalas de tiempo. Tales fluctuaciones suelen ser causadas por cambios en el patrón de interacción de varios componentes del sistema climático y cambios en el forzamiento radiactivo (Pabón, 1998, citado de Bocanegra y otros, 2000).

Por su parte, la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define "cambio climático" como un cambio en el clima causado por la actividad humana que directa o indirectamente cambia la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad climática observada en periodos comparables. Para el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), dicho término significa un cambio identificable en el estado del clima (por ejemplo, por análisis estadístico) después de un evento de cambio en la media y la variabilidad de sus características, y que persiste durante un mucho tiempo, a menudo estimado en décadas o más (Cordero, 2012).

Los factores que afectan los cambios de temperatura media de la tierra y el cambio climático son los cambios en el desnivel del mar, los efectos de las nubes, la emisión de aerosoles a la atmósfera, aumento en las emisiones de dióxido de carbono, gas metano, hidratos de metano. Además, los cambios de reflexión terrestres y los cambios en el campo magnético exterior (Cordero, 2012). Igualmente añade otros factores como la contaminación del aire, los cambios en el hielo polar, el contenido

en vapor de agua y la cantidad de cobertura de nubes y la cantidad de energía solar que alcanza la Tierra.

Mientras que en el informe del IPCC enfatiza que las causas del cambio climático son tanto naturales como antropogénicas. Hay un continuo de impactos en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las concentraciones atmosféricas, el forzamiento radiactivo, las respuestas climáticas y los impactos en el clima. Entre 1970 y 2004, los sectores de la energía, el transporte y la industria representaron los mayores aumentos en las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo la construcción residencial y comercial, la silvicultura (incluida la deforestación) y la agricultura los mayores aumentos (Cordero, 2012).

Por otra parte, el clima cambia naturalmente a través de escalas temporales y espaciales, de acuerdo con Bocanegra y otros (2000), entre las fluctuaciones temporales, los siguientes factores se consideran los más importantes para determinar y regular los procesos atmosféricos:

*Estacional.* Esta escala representa la fluctuación en el clima de un mes a otro. Determinar el ciclo anual de los factores climáticos es un paso fundamental en la variación climática a esta escala. En latitudes medias, la secuencia de invierno, primavera, verano y otoño es común entre los habitantes de estas regiones. Por otro lado, las latitudes tropicales alternan con frecuencia entre estaciones lluviosas y secas. La planificación de las actividades, especialmente las agrícolas, depende del conocimiento de este tipo de secuencia cíclica

*Intraestacional.* Este tipo de variabilidad es poco conocida y una de las menos estudiadas en nuestro medio. Hay evidencia de que durante las estaciones hay fluctuaciones que determinan las condiciones climáticas durante decenas de días o uno o dos meses. “En la mayoría de los casos estas fluctuaciones pasan desapercibidas porque su amplitud es pequeña en comparación con la amplitud del

ciclo anual”. Durante las fluctuaciones estacionales, se destaca una señal similar a una onda, llamada 30-60 días.

*Interanual.* Las variaciones de las variables meteorológicas se producen de un año a otro correspondientes a esta escala. A menudo se encuentra que la precipitación en la temporada de lluvias en un lugar particular no siempre es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o por debajo de los niveles normales. Formulado en esta escala, la variabilidad climática puede estar relacionada con cambios en el balance de radiación global.

*Interdecadal.* En esta escala, la variabilidad climática se manifiesta a nivel de diez años. En comparación con la variación interanual, la amplitud de estas fluctuaciones es menor. Esta es una de las razones por las que la persona promedio no nota este tipo de transformación. Sin embargo, estas fluctuaciones de largo plazo afectan significativamente el desempeño de la sociedad en ciclos interdecadales y son importantes para identificar posibles tendencias de las variables climáticas.

La variabilidad climática se refiere a los cambios observados en el clima durante un período de tiempo relativamente corto. Los valores registrados en un año determinado fueron mayores o menores de lo normal. Las normas climáticas o valores normales se utilizan para definir y comparar climas y suelen ser el promedio de una serie continua de mediciones de una variable climática durante un período de al menos 30 años. La diferencia entre el valor registrado de una variable y su valor medio se denomina anomalía (Bocanegra y otros, 2000).

Bocanegra y otros (2000), mencionan que, en distintos años, los valores de las variables climáticas (temperatura, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal. Estas secuencias de fluctuaciones alrededor de los valores normales se conocen como variabilidad climática y se evalúan mediante la identificación de anomalías.

## **1.2. Isla de Calor Urbana (ICU)**

La investigación sobre este fenómeno comenzó hace unos 200 años, cuando el científico británico Luke Howard describió en 1833 una isla de calor en Londres. Ahora bien, cualquier ciudad con una población de más de 10.000 habitantes y una gran extensión de terreno pavimentado produce este tipo de anomalías térmicas. El mismo fenómeno se puede observar incluso en las pistas de los principales aeropuertos (Voogt 2008).

Según Córdova (2011), la ICU se refiere al gradiente térmico que se produce entre espacios urbanos densamente poblados, incluyendo áreas rurales o suburbanas, formando la estructura espacial concéntrica de una isla de calor urbana, posiblemente debido a la pérdida de vegetación, por materiales impermeables, como el hormigón, que alteran el equilibrio hídrico y energético, aumentando así las temperaturas en las zonas urbanas.

Por su parte, Vkyprus (2016), señala que las islas de calor urbanas son el resultado del aumento de la temperatura ambiente en áreas donde se concentran las instalaciones industriales y los residentes. Generalmente, las temperaturas en las grandes ciudades la temperatura es más alta que en las áreas circundantes durante todo el año.

La isla de calor urbana consiste en el incremento de la temperatura al interior de las ciudades respecto al medio rural. El centro de las ciudades, donde las construcciones y los edificios forman una conjunto más denso y compacto, suelen presentar las temperaturas más elevadas (Morán, 2017).

Una isla de calor es un fenómeno que ocurre cuando la temperatura en las áreas urbanas es más alta que en la periferia (Mccartney y Mehta, 2020).

Barrera y otros (2022) mencionan que el término "Isla de Calor Urbano" (UHI) describe condiciones micro climáticas en las ciudades que son más cálidas que en las áreas rurales circundantes.

A manera de resumen se puede afirmar que hay un consenso general en el concepto de islas de calor urbana que se relaciona con una alta temperatura atmosférica en comparación con la periferia o zonas rurales.

Romero (2010) menciona que hay varias razones para que se presente este fenómeno ya que las superficies de asfalto y las paredes de los edificios absorben parte del calor durante el día y lo transfieren al aire circundante durante la noche. En condiciones urbanas, los procesos naturales se distorsionan aún más debido a la baja evaporación. Por ejemplo, en el campo, la energía solar se utiliza por la mañana para evaporar el rocío, mientras que en las ciudades es absorbida directamente por los edificios. También incluye cambios en los cauces de los ríos, construcción de embalses, drenaje de humedales en las ciudades, gran cantidad de automóviles y mucho más. Todo esto aumenta el flujo ascendente de calor sensible hacia la troposfera.

#### 1.2.1. Tipos

Existen dos tipos de islas de calor urbanas: las primeras, denominadas islas de calor superficiales, son las diferencias de temperatura registradas entre diferentes materiales y superficies urbanas (como pavimentos y cubiertas de edificios) en comparación con las superficies rurales cercanas a las ciudades. La otra, denominada islas de calor atmosféricas, refleja las diferencias térmicas entre el aire de las zonas urbanas y rurales (Fernández, 2004).

Según Sarricolea y Romero (2010) y Fernández y Martilli (2012), en cualquier ciudad se pueden distinguir ambos tipos de islas de calor y cuyas principales características se recogen en el cuadro 1 y se definen a continuación:

*Isla de calor urbana atmosférica (ICU):* Refleja la diferencia en la temperatura del aire entre las ciudades y el campo, donde la capa de aire que cubre la ciudad es más cálida que el campo circundante debido a la acumulación de calor en edificios, calles, avenidas, áreas industriales, comerciales y estacionamientos.

*Isla de calor urbana superficial (ICUS):* Representa las diferencias térmicas entre superficies artificiales (pavimentos, aceras, cubiertas de edificios, etc.) y superficies naturales (vegetación, cultivos, roquedo), es decir, a mayores temperaturas de emisión que poseen las diferentes estructuras y espacios urbanos respecto a su zona periférica, mismas que son captadas a través de técnicas de percepción remota con sensores térmicos.

Cuadro 1. Características de las islas de calor urbanas superficiales y atmosféricas

<b>Características</b>	<b>Isla de calor urbana de superficie (ICUs)</b>	<b>Isla de calor urbana atmosférica (ICU)</b>
Desarrollo temporal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presente en el día como la noche</li> <li>• Más intensa en los días de verano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeña o inexistente durante el día</li> <li>• Mas intensa en las noches de invierno</li> </ul>
Condiciones para el desarrollo de la máxima intensidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor variación espaciotemporal</li> <li>• Día: 10 a 15°C</li> <li>• Noche: 5 a 10°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escasa variación espaciotemporal</li> <li>• Día: -1 a 3°C</li> <li>• Noche: 7 a 12°C</li> </ul>
Método típico para su estudio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediciones indirectas</li> <li>• Sensores remotos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mediciones directas</li> <li>• Estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles</li> </ul>
Representación gráfica típica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imagen térmica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapa de isotermas</li> <li>• Imagen térmica</li> </ul>

*Fuente: Sarricolea y Romero (2010).*

Voogt (2008) reporta que las islas de calor atmosféricas aumentan durante el día, es decir, la intensidad puede ser débil o incluso negativa en las primeras horas de la mañana debido a que la radiación aún no ha sido liberada a la atmósfera. Alcanza su punto máximo unas horas después de la puesta del sol y unas horas antes del amanecer. Por otra parte, las islas de calor superficiales se manifiestan con mucha fuerza durante el día directamente por la influencia del sol sobre la superficie de la ciudad. También se reportan por la noche, aunque la intensidad es menor que durante el día.

Por otra parte, Medina y colaboradores (s.f.) mencionan que existen tres tipos de islas de calor, que se describen de la siguiente manera:

- Isla de calor de la capa de dosel (ICCD)
- Isla de calor de la capa de perímetro (ICCP)
- Isla de calor de superficie (ICS)

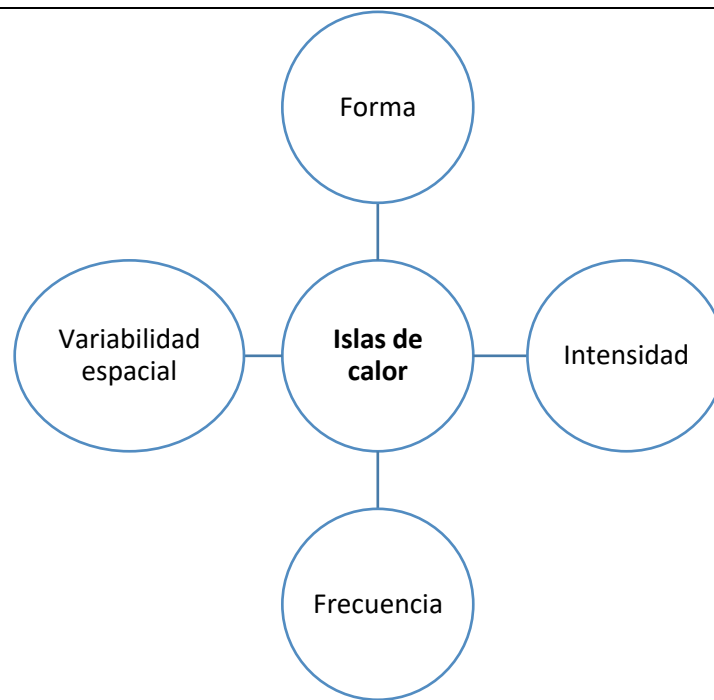
Las dos primeras están relacionadas con el calentamiento de la atmósfera urbana; este último se relaciona con el calor relativo de la superficie urbana. La capa de dosel urbana (CDU) es la capa de aire en las áreas urbanas más cercana a la superficie, que se extiende hacia arriba hasta aproximadamente la altura promedio de los edificios. Por encima de la capa de dosel se encuentra la capa perimetral de la ciudad, que puede tener un espesor de 1 km o más durante el día y reducirse a cientos de metros durante la noche. El ICCP es lo que crea una cúpula de aire más cálido que sopla la ciudad con el viento. El viento a menudo cambia la forma de la cúpula a la forma de una pluma.

Los tipos de islas de calor difieren en su forma espacial (forma), características temporales (relacionadas con el tiempo) y algunos procesos físicos subyacentes que impulsan su desarrollo. Los científicos miden la temperatura del aire en la ICCD e ICCP directamente usando termómetros, mientras que ICS usa sensores remotos montados en satélites o aviones (Voogt, 2008).

### 1.2.2. Características

Las características clave para analizar una isla de calor son la forma, frecuencia, intensidad y las variaciones tanto espaciales como temporales (López y otros, 1993; Voogt, 2008). Estos rasgos están influenciados por diversos factores que facilitan la aparición del fenómeno, lo que resulta en diferencias significativas entre los valores diurnos y nocturnos, así como a lo largo de las diferentes estaciones del año. En la Figura 2 se muestran los aspectos a considerar en el estudio de isla de calor urbana.

Figura 2. Principales características de las ICU



---

*Fuente: Elaboración propia basada en Voogt (2008).*

A continuación, se describen las características de una isla de calor urbana según Voogt (2008):

**Forma:** Puede ser concéntrica si la intensidad está en el centro y se desvanece hacia las zonas suburbanas, transversal (en forma de haz) debido al flujo de aire caliente



hacia la periferia, radial si sigue una trayectoria o es irregular si las islas se distribuyen en el espacio sin un patrón específico.

*Intensidad:* Esto se define como el tamaño de la isla y se determinará en función de la diferencia de temperatura en la ciudad en comparación con las áreas terrestres exteriores. Se informa que la temperatura nocturna promedio en la isla atmosférica está entre 1 y 3 °C, aunque algunas ciudades han registrado diferencias de más de 10 °C.

*Frecuencia:* Esto está determinado por la presencia de islas en una hora del día o estación del año, lo que permite que el fenómeno se establezca en el tiempo.

*Variabilidad espacial:* Se refiere a posibles cambios en la ubicación geográfica de la isla en el territorio. Esto estará relacionado con las características de la superficie, las condiciones del viento y las fuentes de calor en la ciudad”.

El criterio de Voogt para definir estas características se basa en una combinación de observaciones empíricas y análisis teóricos que consideran tanto los factores ambientales como los humanos que influyen en la formación y comportamiento de las islas de calor urbanas.

Para Garland (2008), las islas de calor presentan las siguientes cinco características:

1. Intensidad: La diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y rurales.
2. Extensión espacial: El área geográfica afectada por el fenómeno.
3. Variabilidad temporal: Cómo cambian las temperaturas a lo largo del día y del año.
4. Altura: La variación de la intensidad de la isla de calor a diferentes alturas.
5. Forma: La distribución espacial del calor dentro del área urbana.

El criterio de Garland para definir estas características se basa en la observación y análisis de las variaciones térmicas dentro de las áreas urbanas y su comparación con las áreas rurales circundantes. Garland destaca la importancia de entender estas características para mitigar los efectos negativos de las islas de calor urbanas.

### 1.2.3. Conformación

Oke (1982) analizó las causas que contribuyen a la ocurrencia del efecto isla de calor y destacó los puntos que reflejan cambios en el balance energético de la Tierra. Señaló que los materiales de la superficie urbana absorben más radiación solar a medida que se construyen muros y superficies verticales en las ciudades debido a más reflejos y radiación atrapada.

Por su parte, Gómez (1985) dice que la radiación solar recibida en las ciudades se reduce entre un 10-30% debido a la contaminación, pero estas pérdidas se compensan con la radiación de onda larga que emiten las superficies urbanas y las capas contaminadas, especialmente la masa de los edificios en los que se almacenan el calor solar y los libera más tarde, mientras que en las zonas rurales la inercia térmica es mucho menor.

En la ICU, el aire caliente sube y por lo tanto crea una presión atmosférica relativamente baja, mejorando la circulación local de aire tomado de áreas más frías, desplazando la masa de aire contaminado a otras áreas adyacentes debido a la cantidad de energía radiante de la superficie, previenen los procesos de advección y turbulencia, ya que facilitan el intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera superficial (Sarricolea y Romero, 2010).

Garland (2008) postula que las islas de calor se desarrollan en entornos urbanos y suburbanos debido a que una gran cantidad de materiales de construcción convencionales exhiben una mayor capacidad para absorber y retener el calor solar en comparación con los materiales naturales presentes en áreas rurales menos desarrolladas. Este fenómeno de calentamiento urbano puede atribuirse a dos

razones fundamentales. En primer lugar, la mayoría de los materiales utilizados en la construcción urbana poseen características impermeables, lo que impide la disponibilidad de humedad necesaria para disipar el calor solar de manera eficiente.

En segundo lugar, la utilización de materiales oscuros combinados con diseños arquitectónicos y pavimentaciones configuradas en forma de cañones urbanos tiende a captar y retener una mayor cantidad de energía solar. Las temperaturas de las superficies oscuras y secas, cuando están expuestas directamente a la radiación solar, pueden alcanzar hasta 88°C (190°F) durante el transcurso del día. En contraste, las superficies que presentan vegetación y suelos húmedos, bajo las mismas condiciones, apenas alcanzan temperaturas de aproximadamente 18°C (70°F). Además, el calor antropogénico, generado por actividades humanas, junto con la disminución de la velocidad del viento y la contaminación atmosférica en áreas urbanizadas, también desempeñan un papel significativo en la formación de islas de calor urbanas (Gartland, 2008).

Voogt (2008) subraya que una multitud de factores cruciales inciden en el desarrollo, manifestación, persistencia e intensidad de las islas de calor urbanas. Estos factores son diversos y complejos, y no se limitan a una sola causa o efecto, sino que son el resultado de una interacción constante entre componentes naturales y humanos que influyen en las condiciones atmosféricas y térmicas del entorno urbano. Entre los factores geográficos más relevantes se encuentran la latitud, la altitud, la proximidad a cuerpos de agua, y las características topográficas del terreno, todos los cuales determinan la manera en que se disipa o retiene el calor en una zona determinada.

Por otro lado, las actividades antropogénicas, tales como el uso de materiales de construcción de alta capacidad térmica, como el asfalto y el concreto, la disminución de áreas verdes, el aumento del tráfico vehicular, y la emisión de calor residual de los edificios y fábricas, también juegan un papel determinante en la intensificación de este fenómeno. Las ciudades modernas, con su densa infraestructura, actúan

como "captadores de calor", lo que contribuye a la creación de microclimas urbanos más cálidos que sus alrededores rurales o suburbanos (Voogt, 2008).

Cuadro 2. Factores que influyen en el desarrollo de las ICU

<b>Tipo</b>	<b>Factor</b>	<b>Descripción</b>
Físico-geográfico	Localización	La topografía de la zona, la latitud y la longitud impactan en las condiciones de la atmósfera debido a que se relacionan directamente con elementos del clima.
	Clima	El viento y las nubes influyen en la formación de islas de calor. A menor viento y nubosidad mayor intensidad de isla de calor. A medida que los vientos y la nubosidad aumentan, mezclan el aire y reducen la intensidad.
	Hora del día y estación astronómica	La estación influye en el ángulo de inclinación con que lleguen los rayos solares y la hora del día en la cantidad de radiación recibida por la superficie, lo que impacta directamente en la intensidad de la isla.
	Características de las zonas rurales	Donde las ciudades están rodeadas por superficies rurales húmedas se reducen las magnitudes de la isla debido a que el enfriamiento se da más lento en estas superficies, especialmente en climas cálidos y húmedos.
Antrópico	Geometría urbana	La forma de la ciudad puede facilitar la captura de radiación y su múltiple reflexión en los edificios, debido a la existencia de cañones urbanos que poseen un factor de visión de cielo bajo, reduciendo la emisión de onda larga durante la noche.
	Rugosidad de la ciudad	Provoca modificaciones en la velocidad del viento permitiendo o mitigando la isla de calor. La rugosidad es inversamente proporcional a la velocidad y depende en gran parte de lo compacta o dispersa que sea la ciudad.
	Materiales de construcción	Generalmente se utilizan materiales con un albedo bajo y una mayor inercia térmica, es decir, que poseen la característica de almacenar por mayor tiempo la energía calorífica reflejarla lentamente al espacio. Además de ser superficies impermeables, permitiendo la existencia de una superficie más seca y con menor evaporación lo que se traduce en desecación de la atmósfera y calentamiento del aire.
	Función de la ciudad	Impacta en la emisión de contaminantes a la atmósfera urbana, el calor por uso de energía y el uso de agua en irrigación. Ciudades con función comercial o industrial impactan más en la intensidad de la isla.
	Fuentes de emisión de calor	El calor generado por las actividades humanas, principalmente la combustión de combustibles fósiles por uso de automotores y aparatos domésticos como aires acondicionados influye en el calentamiento.

*Fuente: Elaboración propia, con base en Voogt (2008).*

Las carreteras asfaltadas, las edificaciones y el trazado de la red vial, alteran el equilibrio radiactivo entre el suelo y el aire, reduciendo la evaporación, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la velocidad del viento, y aumentando la turbulencia, lo que provoca cambios ambientales (Fernández, 2012).

La formación de "islas de calor" también está relacionada con las características especiales de la geometría de la superficie terrestre en las zonas urbanas. Los edificios de gran altura tienen grandes superficies que reflejan y absorben la radiación solar, aumentando la intensidad de calefacción en las zonas urbanas. Este fenómeno se denomina "efecto cañón urbano". Otra característica de la contribución del edificio a la formación de una "isla de calor" es que bloquea el viento en la ciudad, lo que resulta en una reducción de la intensidad del enfriamiento por convección. A medida que se desarrollan los centros de urbanización, los cambios en la región se vuelven mayores y la temperatura superficial promedio en la región también aumenta (Fedorkova y otros, 2012).

Tejedor y otros (2016) señalan que el surgimiento de las islas de calor está asociado con la urbanización, lo cual provoca cambios radicales y a menudo irreversibles en la cobertura y el uso del suelo. Estos cambios interrumpen el flujo de energía entre la atmósfera y las superficies, alterando así el clima local.

La intensificación de estas islas de calor urbanas está relacionada con las propiedades térmicas de los materiales impermeables, que son características de la urbanización y afectan el consumo de energía y la salud de los habitantes de la ciudad.

Por su parte, Barrera y otros (2022), señala que las ICU se forman debido a la configuración física de las ciudades (incluida su topografía, morfología espacial y densidad de edificación), los materiales utilizados para la construcción de edificios, aceras y carreteras, el flujo de aire a través de la red de calles y la capacidad humana productora de calor. actividades como el transporte y la industria.

Mientras que Gartland (2008), enumeró en el cuadro 3 las características urbanas que contribuyen a la formación de ICU. Estas características pueden agruparse en cinco causas principales de la formación de ICU:

1. Aumento del calor antropogénico;
2. Evaporación reducida;
3. Mayor almacenamiento de calor;
4. Aumento de la radiación neta;
5. Convección reducida.

Cuadro 3. Características urbanas y suburbanas importantes para la formación de ICU y su efecto en el balance energético de la superficie terrestre.

<b>Característica que contribuye a la formación de ICU</b>	<b>Efecto en el balance energético</b>
Falta de vegetación	Reducción de la evaporación
Uso generalizado de superficies impermeables	Reducción de la evaporación
Mayor difusividad térmica de los materiales urbanos	Mayor almacenamiento de calor
Baja reflectancia solar de los materiales urbanos	Aumento de la radiación neta
Geometrías urbanas que atrapan el calor	Aumento de la radiación neta
Geometrías urbanas que ralentizan la velocidad del viento	Convección reducida
Aumento de los niveles de contaminación atmosférica	Aumento de la radiación neta
Mayor consumo de energía	Aumento del calor antropogénico

*Fuente: Gartland (2008).*

#### 1.2.4. Impactos

Las islas de calor urbanas (ICU) pueden tener una gama de impactos tanto positivos como negativos en diversas ciudades a nivel global, especialmente pronunciados durante los meses estivales, cuando sus efectos adversos sobre el medio ambiente y la calidad de vida se tornan más evidentes. La manifestación de las ICU implica varios efectos secundarios que afectan a la ciudad y a sus habitantes, principalmente debido al incremento de la temperatura ambiente urbana. Según Godoy (2013), la relevancia de estos estudios reside en la identificación y mitigación de los efectos perjudiciales que las ICU tienen sobre la salud y el entorno a corto, mediano y largo plazo. En el cuadro 4 se detalla una categorización exhaustiva de las consecuencias asociadas a las ICU, segmentadas por región climática y estación del año, lo cual proporciona una visión integral de cómo estas anomalías térmicas urbanas pueden influir en distintos contextos y épocas, exacerbando problemas de salud pública, aumentando el consumo energético, deteriorando la calidad del aire y agravando el estrés térmico en la población urbana.

Cuadro 4. Impacto de las islas de calor urbanas, clasificada por región climática

Impacto	Región Climática	
	Fría	Caliente
Confort humano	Positivo (invierno) Negativo (verano)	Negativo (todas las estaciones)
Uso de energía	Positivo (invierno) Negativo (verano)	Negativo
Contaminación del aire	Negativo	Negativo
Uso del agua	Negativo	Negativo
Actividad biológica	Positivo	Pero probablemente
Hielo y nieve	Positivo	No aplica

*Fuente: Oke (1997), citado de Voogt (2000).*

En el cuadro 4 se puede observar que las consecuencias negativas son: aumento del consumo de energía, aumento de las emisiones de contaminantes y gases de efecto

invernadero, daño del confort térmico y de la salud humana, así como degradación de la calidad del agua (EPA, 2013).

En verano, cuando las temperaturas suben por el efecto isla de calor urbana, el consumo energético de la ciudad aumenta ya que se utilizan más refrigerantes para mantener la temperatura correcta en las instalaciones urbanas. Los estudios muestran que el consumo de electricidad aumenta entre un 1.5 y un 2 % por cada 0.6 °C de aumento de la temperatura (Akbari 2005, citado por EPA, 2013).

Como se mencionó anteriormente, las ICU aumentan la demanda de consumo de electricidad en verano. Las empresas que suministran electricidad dependen de las plantas de combustibles fósiles. Para satisfacer la demanda de combustibles fósiles, las empresas contaminan el aire emitiendo contaminantes como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM, CO y gases de efecto invernadero (EPA, 2013).

Las islas de calor pueden causar discomfort general, dificultad para respirar, fatiga, deshidratación e incluso la muerte. Las islas de calor aumentarían los daños causados por las olas de calor ocurridos en Europa. Las poblaciones más susceptibles a este daño, como los niños y los ancianos, son más vulnerables a los daños en la salud por olas de calor (EPA, 2013).

Por ejemplo, en los Estados Unidos, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades estimaron que la exposición al calor causó más de 8000 muertes prematuras entre 1979 y 2003 (Center for Disease Control and Prevention, 2006, citado por EPA, 2013).

Finalmente, Gartland (2008) dice que deberíamos preocuparnos por las islas de calor, debido a sus impactos negativos que afectan a tanta gente de muchas maneras. Las islas de calor no sólo causan una pequeña molestia adicional. Sus temperaturas más altas, la falta de sombra y su papel en el aumento de la contaminación del aire tienen graves efectos sobre la mortalidad y las enfermedades humanas. Desperdician



dinero al aumentar la necesidad de uso de energía, de mantenimiento de edificios e infraestructuras, de gestión de las escorrentías de aguas pluviales y de eliminación de residuos. Además, las técnicas de construcción áridas que fomentan las islas de calor tienden a ser poco atractivas, poco atractivas y saludables para la flora y la fauna urbana.

#### 1.2.5. Métodos de detección

La identificación de islas de calor urbanas es un indicador importante para evaluar la intensidad y el impacto de la urbanización en un área. Existen cinco métodos básicos para la identificación de islas de calor urbanas: estación fija, sensor vertical, transversales móviles, balance de energía y detección remota (Godínez y otros, 2018). A continuación, se describe cada una:

##### a) Estación Fija

Comparación de datos climáticos entre estaciones urbanas, suburbanas y rurales bajo la influencia de sistemas meteorológicos de mesoescala, fenómenos que abarcan extensiones territoriales de 2 a 20 km y duran varias horas (Sarricolea y Romero, 2010).

Los datos de las estaciones fijas se utilizan de tres formas:

- 1) Comparación de estaciones meteorológicas.
- 2) Examinar datos de múltiples ubicaciones para efectos de área bidimensional (Méndez y otros, 2011).
- 3) Examinar grandes conjuntos de datos históricos para evaluar las tendencias regionales de islas de calor a lo largo del tiempo (Méndez y otros, 2011).

##### b) Sensor vertical

Dicho método incluye la instalación de equipos de observación en torres de radio, el lanzamiento de globos meteorológicos instrumentados o el vuelo de helicópteros a diversas altitudes.

Dado que la superficie de la tierra afecta los 10 km superiores de la atmósfera (la troposfera), la mayoría de estos efectos se limitan a una región menos profunda de 1 a 1,4 km llamada capa límite, donde el calor y la fricción de la superficie genera calor en el aire que lo eleva hacia la atmósfera y la capa límite (Godínez, 2018).

#### c) Transversales móviles

Este método se considera una forma económica de estudiar islas de calor en áreas urbanas, suburbanas y rurales. Se mide cruzando un área a lo largo de una pista o ruta predeterminada, deteniéndose y tomando lecturas (usando una serie de instrumentos meteorológicos) en lugares representativos en cualquier momento del día, en condiciones climáticas tranquilas y despejadas para medir la extensión máxima de la intensidad de la isla de calor. La mayoría de estos recorridos suelen tardar menos de una hora en completarse, aunque las temperaturas registradas a menudo deben ajustarse utilizando datos de una o más estaciones fijas (Steffens et al., 2001, citado de Godínez y otros, 2018).

#### d) Balance de energía

Sánchez y Barradas (2001) mencionan que uno de los mecanismos más afectados por el sistema urbano-atmósfera es el balance energético, ya que la energía disponible para el balance radiactivo superficie-atmósfera, o radiación neta en un lugar determinado, es el calor, que es principalmente calor disipado que es usado en el calentamiento del aire (flujo de calor sensible) y calor utilizado para evaporar el agua (flujo de calor latente). Desafortunadamente este último es el que presenta el cambio más drástico, debido a que las áreas húmedas son reducidas en el área urbana. Al disminuir el flujo de calor latente, se incrementa el flujo de calor

sensible, lo que por consecuencia genera mayor calentamiento del aire superficial y con ello la temperatura del sistema urbano (Godínez y otros, 2018).

#### e) Detección remota

Gracias al desarrollo de la tecnología satelital, las observaciones de calor mediante sensores remotos han permitido analizar y monitorear las islas de calor urbanas. Las imágenes de satélite de la temperatura de la superficie incluyen los efectos de la radiación de la superficie y las propiedades termodinámicas, incluida la humedad, la emisividad, el albedo, la entrada de energía, los efectos atmosféricos y el transporte turbulento de la superficie (Mirzaei & Haghghat, 2010). Por lo tanto, la teledetección es una herramienta para analizar y monitorear la ocurrencia, intensidad y desarrollo de las islas de calor urbanas (Romero y Sarricolea, 2006).

Por otra parte, Gartland (2008) dice que las estaciones fijas y las travesías móviles se utilizan generalmente para monitorear temperatura del aire alrededor de una ciudad. La teledetección se puede utilizar para encontrar temperaturas y otras características de superficies, por ejemplo, tejados, aceras, vegetación y suelo desnudo, midiendo la energía reflejada y emitida por ellos. Se utilizan equipos especializados en aviones o satélites para tomar fotografías de la energía visible e invisible que irradian las ciudades y sus alrededores.

Los vuelos en aviones especializados se pueden realizar a cualquier hora del día, por lo que pueden ser más útiles para capturar los patrones diarios de comportamiento de las islas de calor. Pero estos vuelos son costosos de realizar y a menudo necesitan un permiso especial para volar a altitudes más bajas de lo que normalmente se permite.

La ventaja de utilizar la teledetección es su poder para visualizar temperaturas en grandes áreas. Sin embargo, la teledetección muestra sólo una vista panorámica de las temperaturas urbanas, dejando de lado las temperaturas de las paredes y la

vegetación y las temperaturas debajo de los árboles. Estas superficies verticales y sombreadas son tan importantes para la isla de calor urbana como las superficies vistas desde arriba. Se han realizado algunos trabajos en Vancouver, Columbia Británica, para agregar esta información vertical a los datos obtenidos mediante sensores remotos y obtener una verdadera temperatura tridimensional o "completa" de la superficie (Voogt y Oke, 1997).

La instrumentación de detección remota generalmente toma mediciones en cinco longitudes de onda de energía diferentes. Estas mediciones se pueden usar para determinar qué tan calientes o frías están las superficies, y para mostrar cómo se ve la superficie y qué tan reflectante es. La física detrás de estas mediciones de energía se explica en detalle a continuación, para aquellos con mentalidad técnica.

Finalmente, Hicham y otros (2020) dentro de la revisión de literatura sobre islas de calor urbanas, señalan que se han analizado varias técnicas y enfoques de medición. Cada tipo de isla de calor urbana corresponde a un método de observación que pueden agruparse en tres categorías principales: a) las mediciones in situ, b) los métodos de observación por teledetección y c) el enfoque de modelización.

El análisis in situ se basa en datos meteorológicos registrados desde torres fijas o estaciones meteorológicas automáticas, instaladas a 2 m del suelo, distribuidas en diferentes regiones de zonas urbanas y rurales. La técnica in situ incluye también las mediciones móviles que requieren algunas precauciones para garantizar la homogeneidad de los datos. De hecho, es de suma importancia proteger el instrumento del calor del tubo de escape del vehículo y equiparlo con un sensor correctamente ventilado. Además, los datos recogidos a través del automóvil durante la travesía, eligiendo los puntos inicial y final como un punto común (Hicham y otros, 2020).

El segundo método, el análisis por teledetección, se basa en datos adquiridos mediante sensores de satélite. En la literatura también se han discutido otras técnicas que permiten recuperar la isla de calor urbana basándose en este segundo método, como el uso de datos recogidos a través de globos aerostáticos o de sensores de temperatura montados en aeronaves que vuelan a través de un área urbana a una altura específica de la superficie. En cuanto al último enfoque, consiste en proceder por modelización informática.

### **1.3. Estructura urbana**

La estructura urbana refiere tanto a todos los componentes físicos como al funcionamiento de todos ellos en la organización de la ciudad. Según Rivera (2016) la estructura urbana es la forma en que se usa la tierra para diseñar partes de un asentamiento urbano (generalmente una ciudad). Las casas, las tiendas, las calles, las aceras, las fábricas, las oficinas, los parques y los espacios abiertos necesitan cierto tamaño y forma, por lo que es importante una buena planificación urbana. Los tipos de carreteras, vías férreas y pequeños cuerpos de agua afectan el uso del suelo y la ubicación de los edificios.

Benavides (2006), define a la estructura urbana, como aquella que es la organización o soporte que somete a un tipo de organización a la ciudad. Organiza las partes que constituyen un todo. Es la interrelación entre las partes y el todo, entre todas las alternativas.

Por su parte Zárate (2012) menciona sobre la diferenciación interna que tienen las ciudades y una de estas diferencias, es el mosaico urbano, si bien, los interiores de las ciudades están constituidos por paisajes y usos del suelo predominantes, a veces claramente definidos y distintos desde perspectivas funcionales y sociales, y forman un verdadero mosaico y forman las denominadas estructuras urbanas, tales como centros, áreas industriales, áreas residenciales, etcétera.

Existen tres modelos básicos de la primera fase de concepción de la estructura urbana interna. El primero tiene que ver con el “Modelo de estructura urbana concéntrica”, que está compuesto por un centro de actividad o CBD (*Central Business District*) que se superpone al núcleo funcional, la zona de transición, las zonas residenciales de rentas medias y altas y, zonas suburbanas. El segundo, “Modelo de estructura urbana sectorial” argumenta que los factores que influyen las preferencias de localización de las rentas altas son el deseo de cercanía del CBD y zonas de servicios, prestigio de lugares de residencia, interés por lugares accesibles y preferencia de zonas con mejores condiciones medioambientales organizados por las vías principales. El tercer “Modelo de estructura urbana polinuclear” identifica que los usos del suelo se ubican en torno a núcleos de crecimiento cuyo origen son exigencias concretas de localización y la necesidad de recursos económicos para ocupar los espacios privilegiados y centrales (Zárate, 2012).

Los modelos de estructura urbana interna monocéntrico tienen su origen en la Escuela Sociológica de Chicago de principios del siglo XX, todos ellos ya tienen transiciones y cambios territoriales, recientemente se han propuesto otros modelos policéntricos más complejo en regiones urbanas con la creación de un sistema basado en funciones diferenciado los funcionamientos.

Por otro lado, la estructura urbana de las ciudades también refiere a la ubicación de la población y el funcionamiento en el espacio urbano, lo cual ha estado en constante transformación. En primer lugar, las ciudades se han estado expandiendo física y funcionalmente, con personas y actividades económicas extendiéndose desde los principales centros existentes (Veneri, 2015), ello cambia la escala a un fenómeno 'regional' donde las ciudades ya no se caracterizan únicamente por asentamientos de alta densidad, ahora incluyen territorios circundantes de baja densidad y funcionalmente conectados. En segundo lugar, los gradientes de densidad urbana han disminuido en promedio a lo largo de las décadas, lo que significa que la

ampliación física ha ido acompañada de una redistribución de la población dentro del espacio urbano (Veneri, 2015).

La estructura urbana, en la escala interna como regional, se relaciona con el fenómeno de islas de calor, ya que estas describen las zonas edificadas que presentan temperaturas promedio más altas que el campo abierto que las rodea. Una isla de calor urbana se origina debido a una serie de procesos físicos relacionados con los materiales presentes en la superficie de las ciudades, tales como cemento, hormigón, asfalto, etcétera. Sumado a ello, las ciudades, como resultado de sus configuraciones geométricas, generan calor, humedad y contaminantes producto de la actividad humana. Todo esto altera el intercambio de energía y humedad entre la superficie de las ciudades y la atmósfera. Estos factores hacen que las temperaturas del aire en las ciudades sean de varios grados por encima de las temperaturas del aire en áreas rurales circundantes (Flores, 2020).

Las edificaciones de gran altura y la existencia de calles estrechas reducen el flujo del viento, calentando el aire que queda atrapado en ellas e intensificando el efecto de altas temperaturas. “La presencia de edificios altos localizados en proximidad promueve la multiplicación de la radiación, especialmente si los materiales de construcción contribuyen a ello”. En el año 2015 el científico Brian Vant-Hull publicó un mapa de distribución del calor en Manhattan revelando que en el centro de la ciudad se producía un efecto de “caja de luz” donde la luz del sol, reflejada en grandes edificios de vidrio, producía que esas áreas fueran significativamente más cálidas que las vecinas (Benavides, 2006).

El tamaño de la ciudad es otro de los factores que influyen en la formación de las islas, por el número de habitantes. Oke (1982), establece que “la diferencia térmica entre la temperatura del interior de una ciudad y la temperatura de una zona rural próxima,  $T_{u-r}$ , está relacionada con la población de dicha ciudad ( $P$ ) de forma logarítmica.”

$$T_{u-r} = 3,06 \text{ Log } P - 6,79$$

El efecto cañón, también se relaciona con la estructura urbana, ya que los sectores existentes entre los edificios son conocidos como cañón urbano. Estas áreas tienen grandes superficies verticales y la radiación del sol tiene una excelente reflexión y absorción, lo que hace que el área de la ciudad sea más eficiente para absorber la luz solar que en las zonas rurales. Las diferentes geometrías de las ciudades permiten una mejor absorción de la radiación durante los períodos de ángulos cenitales solares más altos, como el amanecer y el atardecer. Esto se debe a que el efecto cañón reduce el valor global del albedo urbano independientemente del albedo individual de cada material superficial (Streutker, 2003).

Además, la presencia de cañones urbanos reduce la eficiencia de las áreas urbanas para liberar ondas largas y almacenar calor en la atmósfera y el espacio, ya que varias superficies reabsorben la radiación de onda larga emitida (Streutker, 2003).

Los cambios tanto en la estructura interna como regional urbana, en la densidad, en los tipos de materiales en la edificación, en el trazado y ancho de calles, como la carga de las funciones y concentración de actividades, los flujos de personas, entre otros aspectos, están relacionados con el clima y las islas de calor.

#### **1.4. Percepción remota**

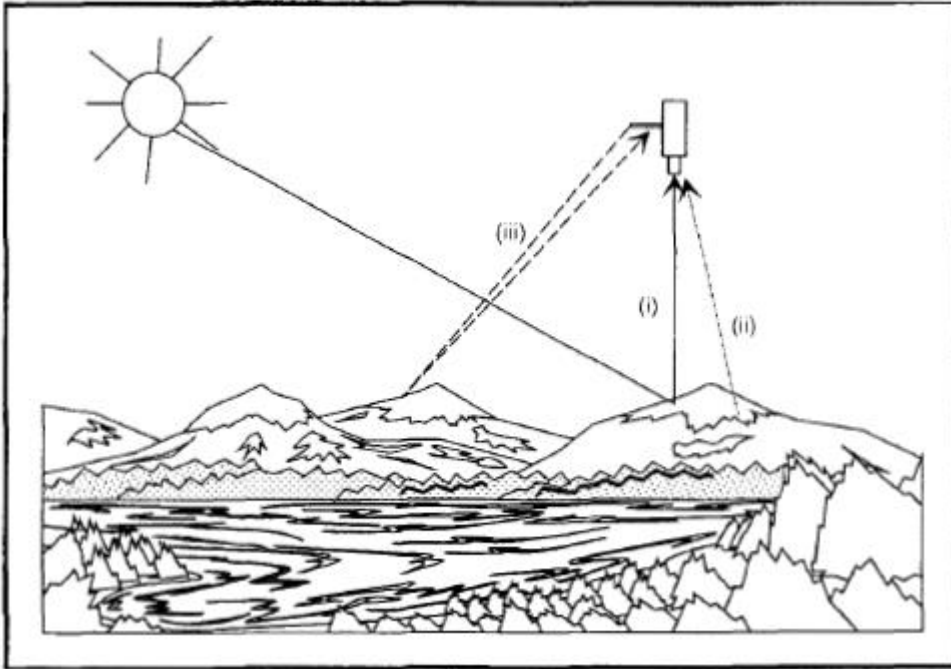
La percepción remota de acuerdo por Jensen (2014), la compara con las matemáticas como una herramienta o técnica, ya que el empleo de sensores sofisticados para medir la cantidad de energía electromagnética que sale de un objeto o zona geográfica a distancia y, a continuación, extraer información valiosa de los datos mediante algoritmos basados en la matemática y la estadística es una actividad científica.



Por otra parte, la percepción remota se define como una técnica que permite la adquisición de información a largas distancias de objetos ubicados en la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, debe existir algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. Nuestros sentidos perciben un objeto solo cuando pueden decodificar la información que les envía. Por ejemplo, podemos ver un árbol porque nuestros ojos reciben y transmiten energía luminosa de él. Esta señal tampoco es causada por el árbol, sino por una fuente de energía externa que brilla sobre él. Por lo tanto, de ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad (Chuvienco, 2002).

Este sencillo ejemplo ilustra los tres componentes fundamentales de cualquier sistema de percepción remota: el sensor (en este caso, nuestros ojos), el objeto observado (el árbol) y el flujo energético que establece la conexión entre ambos. En el contexto de la visión humana, este flujo energético proviene del objeto mediante la reflexión de la luz solar. Sin embargo, este flujo también puede originarse de la energía emitida por el propio objeto o incluso ser generado por el sensor mismo (Chuvienco, 2002). Estas tres modalidades - reflexión, emisión y emisión-reflexión - constituyen los mecanismos básicos a través de los cuales un sensor remoto puede adquirir información. La reflexión implica que la energía es reflejada por el objeto hacia el sensor; la emisión se refiere a la energía emitida directamente por el objeto y captada por el sensor; y la emisión-reflexión involucra tanto la emisión de energía por el sensor que luego es reflejada por el objeto y capturada nuevamente por el sensor (Figura 3).

Figura 3. Formas de teledetección



*Fuente: Chuvieco (2002).*

El primero de ellos es la forma más importante de la percepción remota, ya que proviene directamente de la principal fuente de energía de la tierra, el sol. El sol ilumina la superficie terrestre y refleja esta energía dependiendo del tipo de cubierta presente en ella. Este flujo reflejado es detectado por el sensor, que lo reenvía a la estación receptora. Entre la superficie y el sensor se encuentra la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. Asimismo, la observación remota puede basarse en energía emitida desde el propio techo, o energía que podemos enviar desde un sensor que es capaz de generar su propio flujo de energía y luego recoger su reflejo en la superficie terrestre (Chuvieco, 2002).

En todos estos casos, el flujo de energía entre la cubierta terrestre y el sensor forma una forma de radiación electromagnética. Como bien se sabe, la energía se transfiere de un lugar a otro mediante tres procesos: convección, conducción y radiación.

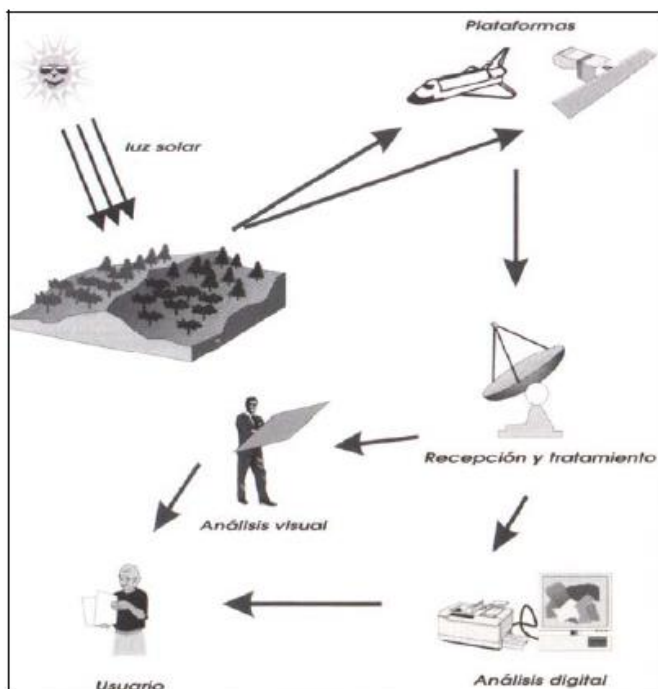
Por su parte, Lira (1987) señala que la percepción remota la componen los siguientes aspectos: a) la fuente de iluminación, formada en este caso por el Sol que emite luz

o radiación solar; b) el paisaje, configurado por todos los objetos presentes en el territorio explorado por el hombre, como pueden ser los ríos, colinas, geología, vegetación; c) la escena, o sea el paisaje donde se enfoca nuestro interés, pudiendo ser la superficie de una roca o un valle y d) el sensor remoto, con el que se captura la luz proveniente de la escena y que, en este caso, permite obtener una representación visual del paisaje; e) la plataforma, corresponde al lugar donde se coloca el sensor remoto para obtener una visión de conjunto de la escena; f) el sistema de procesamiento integrado por el dispositivo para procesar cualitativa o cuantitativamente los datos proporcionados por el sensor remoto acerca de la escena, y g) el apoyo del trabajo de campo, imprescindible en este tipo de estudio.

### *Componentes de un sistema de Teledetección*

El fenómeno de la teledetección se materializa gracias a la compleja interacción entre la energía electromagnética y la cobertura terrestre. Este proceso depende en gran medida de la respuesta reflectante diversa que presentan las superficies terrestres, la cual es modulada tanto por factores externos, como las condiciones ambientales, así como por las propiedades intrínsecas fisicoquímicas de los materiales observados. Estas propiedades incluyen aspectos como la composición química, la textura superficial, y la estructura molecular, que influyen en la manera en que la energía electromagnética es absorbida, reflejada y emitida por las diferentes coberturas del suelo durante la captura de imágenes (Figura 4). La variabilidad en el comportamiento reflectante es esencial para distinguir entre diferentes tipos de superficies y para realizar un análisis detallado y preciso del entorno terrestre mediante técnicas de teledetección. Esta capacidad de diferenciar y caracterizar las distintas coberturas terrestres subraya la importancia de entender los principios fundamentales de la interacción entre la energía electromagnética y los materiales terrestres en el contexto de la teledetección (Chuvienco, 2002).

Figura 4. Componentes de un sistema de Teledetección



*Fuente: Chuvieco (2002).*

Los manuales describen el sistema de teledetección como un conjunto de componentes clave que nos permiten acercarnos al conocimiento de esta tecnología. El primero de estos componentes es el sol, fuente de radiación electromagnética. La energía producida por esta fuente de energía se refleja en varios estratos de la Tierra y es recolectada por sensores óptico-electrónicos a bordo de la nave espacial después de atravesar la atmósfera (Pérez y Muñoz, 2006).

Esta información se envía a la Tierra como una señal digital en forma de matriz de números. El procesamiento inicial de la imagen se realiza en el sistema receptor, durante el cual se corrigen algunos errores de naturaleza geométrica o radiométrica antes de la entrega al usuario (Chuvieco, 2002).

Finalmente, Chuvieco menciona que las imágenes en formato analógico o digital son analizadas por el usuario. Estos realizan procesos de procesamiento visual o digital,

después de lo cual se adquieren nuevos datos. Estos datos toman la forma de mapas temáticos o tablas estadísticas que reflejan el comportamiento de variables espaciales específicas.

### *Superficies reflectantes*

La superficie de nuestro planeta se clasifica globalmente en tres grandes tipos de cubiertas: superficies con agua, superficies con vegetación y suelos. Cada una de esas cubiertas encierra múltiples situaciones individuales diferentes. Considerando las distinciones entre tipos de suelos, de especies vegetales, o en las características que pueden presentar las masas de agua, así como en las circunstancias ambientales a las que pueden verse asociadas las cubiertas terrestres, nos daremos cuenta de la enorme variabilidad de estas (Pérez y Muñoz, 2006).

El comportamiento espectral de cada cubierta, es decir, cómo refleja la energía a diferentes longitudes de onda, no es único ni uniforme, sino que varía mucho en función de los siguientes factores:

- Físicos: en relación con la temperatura, humedad o textura.
- Químicos: variaciones de composición, contenido en materia orgánica, etc.
- Ambientales: pendiente, orientación, estación del año, hora de la toma, etc.

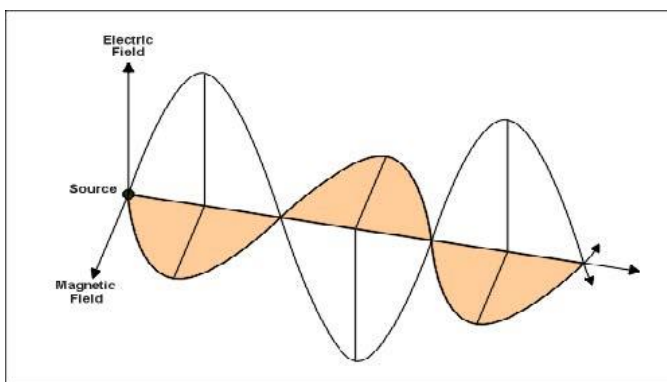
La complejidad de estos comportamientos por un lado provoca dificultad en la interpretación de la imagen, pero, por otro lado, y esto es lo realmente importante, enriquece la información obtenida introduciendo más matices. Distintas disciplinas lo utilizarán para desarrollar estudios e investigaciones donde la teledetección emerge como una herramienta de particular importancia.

### *Principios físicos*

La observación remota es posible debido a la interacción del flujo de energía con la superficie terrestre. Este flujo se llama radiación electromagnética y se explica por dos teorías físicas.

La primera es la teoría ondulatoria. Para ella, la radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio en propagación en el que actúan dos campos perpendiculares: el magnético y el eléctrico (Figura 5).

Figura 5. Propagación de la energía electromagnética



*Fuente: Pérez y Muñoz (2006).*

Esta teoría se explica sobre la base de dos conceptos fundamentales que son la longitud de onda y la frecuencia.

La fórmula en la que se basan estas teorías es la siguiente:

$$c = \lambda * F$$

Donde  $c$  es la velocidad de propagación de la luz (una constante), siendo  $\lambda$  y  $F$  la longitud de onda y la frecuencia respectivamente. De esta fórmula se deduce que longitudes de onda pequeñas tendrán altas frecuencias y viceversa.

La teoría cuántica, por otro lado, explica el fenómeno de la radiación electromagnética en base a sus propiedades energéticas, siendo la fórmula siguiente:

$$Q = h * F$$

Donde Q es la cantidad de energía transportada por una onda, h es una constante (la constante de Planck) y F es la frecuencia.

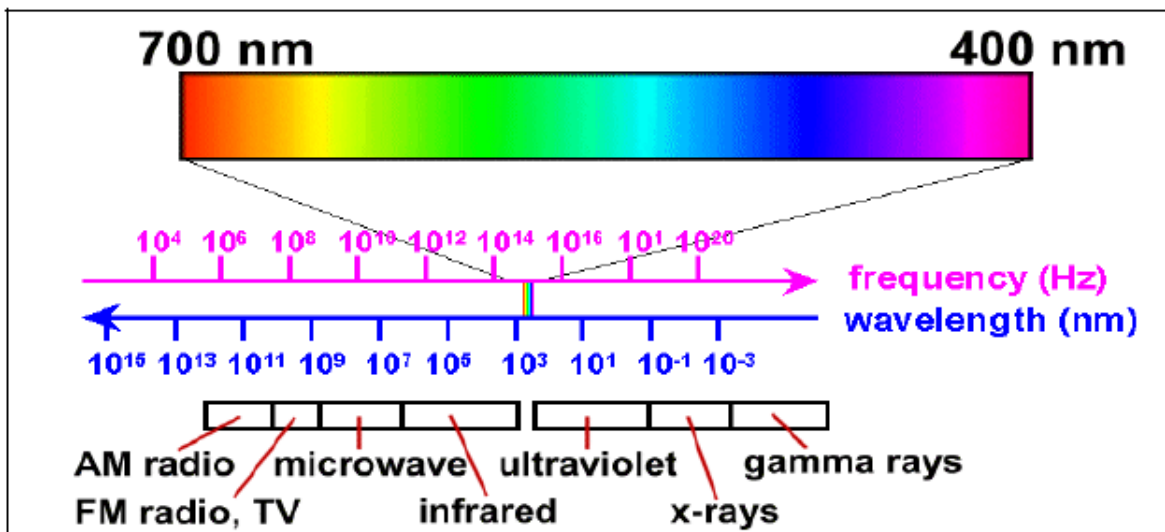
Despejando F en la fórmula precedente y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión:

$$Q = h \left( \frac{c}{\lambda} \right)$$

Analizando esta fórmula, se puede deducir que cuando se trata de longitudes de onda más largas, estas radiaciones se vuelven más difíciles de detectar porque su contenido energético disminuye.

Pérez y Muñoz (2006) mencionan que, en la etapa actual de desarrollo tecnológico, los sensores espaciales utilizan un rango de longitud de onda reducido desde el espectro visible de 0,4 a 0,7 micras hasta el rango de microondas (ondas mayores a 1 milímetro), pasando por el punto medio del rango espectral infrarrojo (cerca, medio y térmico, figura 6).

Figura 6. El espectro electromagnético



Fuente: Pérez y Muñoz (2006).

Por un lado, la recogida de información de la Tierra desde las plataformas orbitales está limitada por la acción de determinados compuestos como el anhídrido carbónico, el ozono y el vapor de agua. Estos compuestos tienen un efecto absorbente, bloqueando el camino de las ondas en determinadas zonas de la tierra del espectro.

### *Formación de la imagen multiespectral*

Las imágenes se adquieren a bordo de los satélites utilizando una serie de fotodetectores que convierten las mediciones de radiación del suelo en mediciones numéricas denominadas niveles digitales. Por tanto, el valor del nivel digital correspondiente a un píxel es proporcional a la intensidad de la radiación emitida por el suelo. Para ello se utiliza un dispositivo convertidor de analógico a digital (Pérez y Muñoz, 2006).

Este proceso de imagen digital se repite banda por banda, dando como resultado una matriz tridimensional en la que los valores de nivel digital para cada píxel se organizan en filas, columnas y bandas. Así nació el concepto de imágenes multiespectrales.

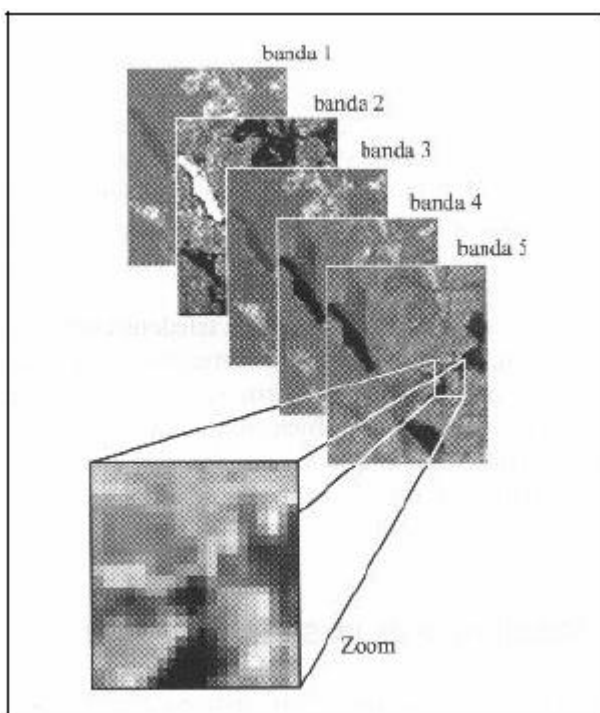
El número de bandas espectrales en un sensor remoto varía considerablemente dependiendo de su diseño y finalidad. Por ejemplo, el satélite SPOT opera con 4 bandas, LANDSAT con 7 y NOAA con 5. Sin embargo, existen sensores hiperespectrales que superan las 200 bandas, ofreciendo una capacidad de análisis mucho más detallada. Esta característica distintiva de los sensores hiperespectrales permite una mayor precisión en la identificación y clasificación de objetos y materiales en la superficie terrestre.

El número de bandas es una característica distintiva y fundamental de algunos sensores, ya que determina la capacidad del sensor para capturar información detallada sobre la superficie terrestre. Algunos sensores avanzados pueden superar



las 200 bandas, proporcionando una resolución espectral extremadamente alta. En estos casos, hablamos de sensores hiperspectrales, que son capaces de discriminar entre diferentes materiales y condiciones ambientales con gran precisión. Los sensores hiperspectrales, al captar una cantidad tan grande de bandas, pueden identificar y analizar la composición y características de la superficie terrestre a nivel molecular, lo que es invaluable en aplicaciones como la detección de minerales, el análisis de la calidad del agua y la agricultura de precisión (Figura 7).

Figura 7. Formación de la imagen multispectral



*Fuente: Pinilla (s.f.).*

### **1.5. Reflectancia**

Gaviria (2020), menciona que el albedo se define como la capacidad que tiene una superficie con un determinado material para reflejar la radiación solar que incide sobre él; medido en una escala de 0 a 1, por ejemplo 0,1 significa 10% de reflectancia solar y 90% de absorción (colores oscuros), mientras que una superficie

con un albedo de 0,9 reflejará el 90% de la radiación solar, de la cual el 10% será absorbido (color claro).

El comportamiento térmico de los materiales de construcción está determinado principalmente por sus propiedades térmicas y ópticas; los factores más importantes son la emisión térmica de la radiación de onda larga y el albedo de la radiación solar o de onda corta.

El autor nos menciona que, por lo tanto, los materiales para la construcción y las estructuras urbanas juegan un papel importante en el balance térmico de la ciudad, absorbiendo la radiación solar y luego transportando el calor acumulado a través de procesos de convección – radiación hacia a la atmosfera. Diversos estudios han demostrado que las propiedades térmicas de estas superficies urbanas y envolventes de edificios modifican el microclima en el que se ubican, aumentando las temperaturas del aire y de radiación media y provocando cambios en la eficiencia térmica y energética.

Una de las estrategias actualmente estudiadas con el fin de mitigar el efecto de isla de calor urbana, es la utilización de materiales fríos o de alto albedo en cubiertas, fachadas y pavimentos, aprovechando su alta capacidad de reflectancia, comparado con los materiales convencionales que absorben gran parte de la radiación solar incidente. De este modo, ayudan a reducir la temperatura del ambiente y de las superficies urbanas. Además, estos materiales también se caracterizan por una alta emisividad infrarroja, que les permite disipar el calor almacenado hacia el cielo durante la noche (US Environmental Protection Agency, 2020).

El uso de materiales de alta reflectancia parece tener beneficios directos e indirectos, a escala local reduce la temperatura de las superficies, lo que llevaría a reducir el consumo energético y la demanda eléctrica por refrigeración con aire acondicionado en verano, además de un aumento en confort térmico de la edificación. En la escala

urbana, estos materiales contribuyen a reducir la temperatura del aire mediante el fenómeno de transferencia de calor y como beneficio indirecto en relación con esto, disminuye la necesidad de sistemas mecánicos de enfriamiento, mejora el confort del entorno y dificulta la formación del smog.

Por otra parte, este efecto tiene cierta influencia sobre las temperaturas globales. El albedo es un efecto que se produce cuando los rayos del sol inciden en una superficie y esos rayos rebotan en el espacio. Como sabemos, no toda la radiación solar que incide en nuestro planeta permanece o es absorbida por la tierra. Parte de esta radiación solar se refleja de regreso a la atmósfera debido a la presencia de nubes, otra permanece en la atmósfera debido a los gases de efecto invernadero y el resto escapa a la superficie (US Environmental Protection Agency, 2020).

Pues bien, dependiendo del color de la superficie sobre la que inciden los rayos del sol, se reflejarán más o se absorberán más. Para los colores oscuros, la tasa de absorción de la luz solar es mayor. El color negro es capaz de absorber la mayor cantidad de calor. Por el contrario, los colores más claros son capaces de reflejar más radiación solar. En este caso, el objetivo es el que tiene mayor tasa de absorción. Por esta razón, los pueblos solían tener sólo casas blancas. Esta es una forma de aislar tu hogar de las altas temperaturas del verano absorbiendo menos calor (US Environmental Protection Agency, 2020).

Después de todo, el conjunto de todas las superficies del planeta y sus coeficientes de absorción y reflexión de los rayos solares constituyen el albedo de la Tierra. Dependiendo del color predominante o de los diferentes tipos de superficie de nuestro planeta, absorberemos más o menos radiación solar entrante.

Cabe mencionar que no es sólo la superficie de la Tierra la que tiene una cualidad reflectante. Las nubes también reflejan la luz del sol, contribuyendo al efecto

refrescante del albedo. Al mismo tiempo también contribuyen al calentamiento, porque están compuestos de vapor de agua condensado, que retiene el calor.

La US Environmental Protection Agency, (2020) también menciona que si las nubes complican las cosas, también lo hacen las estaciones. Cada año, el albedo alcanza su punto máximo dos veces. El primer pico se produce cuando el hielo marino de la Antártida está en su máximo invernal. El segundo pico, que es más grande, se produce cuando hay una capa de nieve en gran parte del hemisferio norte.

El albedo también cambia debido a la interacción humana. Los bosques tienen un albedo menor que la capa superficial del suelo; La deforestación aumenta el albedo. La quema de madera y combustibles fósiles añade carbono negro a la atmósfera. Algo de carbono negro se deposita en la superficie del hielo, lo que reduce el albedo.

## **1.6. Análisis espacial**

Buzai (1999) afirma que el análisis espacial incluye un conjunto de conceptos y procedimientos para el estudio de las estructuras y relaciones territoriales a partir de la ubicación de las unidades geográficas y las características de las variables seleccionadas para el estudio.

Destaca varias estructuras y formas de organización espacial que se repiten y se resumen como modelos que pueden analizar los procesos por los cuales estas estructuras emergen en términos de conceptos básicos como distancia, interacciones espaciales, conexiones espaciales, polarización, etc., entre otros, utilizando geoestadísticas agrupadas en estadísticas espaciales y métodos morfológicos matemáticos que analizan directamente la información geocodificada (Buzai, 1999).

De manera similar, Goodchild y Haining (2005) definen el análisis espacial como la representación de un conjunto de métodos y modelos que utilizan explícitamente la referencia espacial para cada instancia de datos. El análisis espacial requiere hacer

suposiciones o sacar inferencias sobre datos que describen relaciones espaciales o interacciones entre instancias. El resultado de cualquier análisis no será el mismo que un reordenamiento de la distribución espacial de los valores o una reconfiguración de la estructura espacial.

Teniendo en cuenta el contexto espacial, cabe señalar que para determinar las ICU, es necesario la utilización de herramientas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG). Un SIG es una herramienta analítica que proporciona la capacidad de identificar las relaciones espaciales de los fenómenos que se investigan. Estos sistemas de información geográfica utilizan softwares especiales (ArcGIS, ERDAS, TerrSet, etc.) que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y mostrar de manera efectiva cualquier tipo de información geográfica de referencia relacionada con un área y conectar mapas a bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de datos en mapas para representar y correlacionar cualquier tipo de fenómeno geográfico, desde mapas de carreteras hasta parcelas agrícolas o sistemas de identificación de densidad de población (Servicio Geológico Mexicano, 2020).

Por otra parte, la teledetección es una técnica de análisis espacial que nos permite obtener imágenes de la superficie terrestre a partir de sensores instalados en plataformas espaciales o utilizando métodos más habituales como la fotografía aérea o la termografía. De todas estas, la teledetección satelital tiene muchas aplicaciones debido a sus ventajas sobre otros métodos tradicionales de observación como la fotografía aérea y los estudios de campo (Chávez, 1996).

La tecnología de detección remota satelital recopila información de la superficie terrestre mediante la detección de energía radiante con sensores electromagnéticos de banda ancha a bordo de los satélites. Ejemplos: LANDSAT TM; LANDSAT

ETM+; AVHRR; MODIS; ASTER y GOES. Cada uno de estos satélites ofrece diferentes productos digitales y detecta energía radiante en longitudes de onda específicas del espectro electromagnético (Chávez, 1996).

Este tipo de tecnología de detección remota satelital permite el análisis de patrones de reflectividad, índice de vegetación y temperatura superficial terrestre (TST) a través del análisis del flujo de energía radiante a partir de imágenes proporcionadas por las plataformas LANDSAT TM y LANDSAT ETM. Actualmente, la plataforma LANDSAT publica una gran cantidad de imágenes satelitales de uso gratuito, lo que hace atractivo el uso de estas plataformas.

El proceso de obtención de reflectancia, índice de vegetación y TST no es trivial y requiere una serie de pasos y modificaciones. En pocas palabras, el proceso comienza con la conversión de una imagen de energía radiante recibida de un satélite en una imagen de radiancia. Esta radiación debe convertirse en una imagen de reflectancia, que a su vez debe convertirse en una imagen de índice de vegetación y emisividad. Finalmente, la obtención del TST requiere aplicar la ley de Plank que utiliza las imágenes de radiancia y emitancia para obtener la TST.

### **1.7. Conclusión parcial**

El primer capítulo contiene un marco teórico de referencia, que nos permite comprender la forma en que se origina el fenómeno de islas de calor y las posibles fuentes que posibilitan su aparición. Se describen las categorías de la superficie artificial y su base teórica.

Por otra parte, para la comprensión de las islas de calor se hizo una revisión teórica del clima urbano. Este, como expresión de la modificación del clima regional, entendiendo los elementos que permiten su aparición y el equilibrio que deben guardar dichos elementos, para después dar paso a la explicación de su principal indicador que son las islas de calor. El soporte teórico del fenómeno islas de calor

consideró las causas de su aparición, tipos y comportamiento tanto espacial como temporal. Posteriormente se abordan las características del proceso de urbanización y su impacto en el incremento de superficie artificial para satisfacer los requerimientos de la población. Esto permitió comprender cómo los procesos antrópicos influyen en el desequilibrio del clima generando condiciones de variabilidad climática a escala local en un espacio en particular.

El análisis espacial es un campo que estudia las estructuras y relaciones territoriales utilizando la ubicación y características de variables geográficas. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota permiten analizar patrones de reflectividad, índice de vegetación y temperatura superficial terrestre.

La percepción remota es una herramienta o técnica similar a las matemáticas. El uso de sensores sofisticados para medir la cantidad de energía electromagnética que sale de un objeto o área geográfica a distancia y, a continuación, extraer información valiosa de los datos mediante algoritmos basados en matemáticas y estadísticas es una actividad científica (Jensen, 2014).

El análisis espacial requiere hacer suposiciones e inferencias sobre los datos que describen las relaciones e interacciones espaciales. La definición de la presencia espacial de las entidades estudiadas es fundamental, ya que influye en las técnicas y conclusiones posibles. La reflectancia de las superficies urbanas y de los edificios afecta el microclima local, influyendo en la temperatura del aire y la eficiencia energética. Utilizar materiales de alta reflectancia puede ayudar a mitigar el efecto de isla de calor urbana.

La reflectancia es una propiedad importante de las superficies que determina cuánta radiación solar incidente es reflejada o absorbida. Los materiales con alta reflectancia (albedo) reflejan más radiación, mientras que los materiales oscuros

absorben más calor. A escala global, el albedo de la Tierra, determinado por el color y tipo de superficie, influye en la cantidad de radiación solar reflejada y absorbida, afectando el clima del planeta.

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) se articula mediante la combinación de factores ambientales y antrópicos que influyen en su formación, persistencia e intensidad. Las ICUs son áreas urbanas que presentan temperaturas más elevadas en comparación con las zonas rurales circundantes debido a la urbanización, que implica cambios en la cobertura y uso del suelo, afectando el flujo de energía entre la atmósfera y las superficies urbanas, alterando así el clima local.

Para la identificación y caracterización de las ICUs, se emplean varias técnicas de medición, entre las cuales se destacan tres categorías principales: mediciones in situ, métodos de observación por teledetección y el enfoque de modelización.

1. Mediciones in situ: Se basan en datos meteorológicos registrados desde torres fijas o estaciones meteorológicas automáticas instaladas a 2 metros del suelo, distribuidas en diferentes regiones urbanas y rurales. Incluyen también mediciones móviles que requieren precauciones para asegurar la homogeneidad de los datos.
2. Teledetección: Utiliza datos adquiridos mediante sensores de satélite para visualizar temperaturas en grandes áreas. Sin embargo, la teledetección proporciona una vista panorámica de las temperaturas urbanas, omitiendo las temperaturas de paredes, vegetación y áreas bajo los árboles, que también son importantes para la formación de las ICUs. Para una visualización más completa, se integran datos de diferentes superficies verticales y sombreadas mediante la combinación de imágenes satelitales y sensores remotos.
3. Enfoque de modelización: Involucra el uso de modelos computacionales para simular y predecir la formación y comportamiento de las ICUs, basándose en datos ambientales y urbanos específicos de la región estudiada.



Mientras tanto, la estructura urbana se refiere a la organización y funcionamiento de los componentes físicos de la ciudad, como viviendas, comercios, calles, parques, etc. Existen diferentes modelos de estructura urbana, como el modelo concéntrico, sectorial y polinuclear, que describen la diferenciación interna de las ciudades.

## CAPÍTULO 2. MARCO DE REFERENCIA DE ISLAS DE CALOR URBANAS

Desde hace más de 200 años se ha reconocido el fenómeno de las islas de calor en las ciudades. Todas las ciudades experimentan este efecto en cierta medida, pero es más intenso en aquellas situadas en regiones densamente pobladas y con climas húmedos (Araya, 2021).

Los primeros estudios sobre las islas de calor superficiales se remontan a la década de 1830, cuando Luke Howard observó diferencias significativas en la temperatura entre áreas urbanas y rurales en Londres (Howard, 1833). Sin embargo, fue a partir de la segunda mitad del siglo XX cuando el interés académico en este fenómeno se intensificó, coincidiendo con el acelerado crecimiento urbano y la preocupación por los efectos del cambio climático (Arnfield, 2003).

Por lo anterior, en este capítulo se reportan casos de estudio relacionados con las islas de calor urbanas, a nivel internacional, nacional y estatal. Se trata de investigaciones, donde se emplean diversos procedimientos, enfoques, métodos y técnicas.

### **2.1. Estudios de casos a nivel internacional**

En este apartado se presentan seis casos de estudio a nivel internacional relacionados con el tema del presente trabajo de investigación.

a) Caso Londres, Inglaterra. La Asociación Internacional para el Clima Urbano (en sus siglas en inglés IAUC) ha publicado el libro de Luke Howard “el clima de Londres”. A pesar de que “el clima de Londres” se preocupa en gran medida por el tiempo y el clima en general visto desde el punto de vista de Londres, su análisis de los registros de temperatura le permitió detectar, describir y analizar el fenómeno de la isla de calor urbano muchas décadas antes que otros (Mills, 2008).

Howard (1833), analizó el fenómeno de islas de calor atmosféricas, basándose en registros de temperatura recopilados en tres sitios diferentes fuera de Londres (Plaistow, Tottenham y Stratford) y un sitio (Royal Society) dentro de Londres. El efecto urbano se examina como la diferencia de temperatura entre sus sitios 'urbano' y 'rural'. "Desafortunadamente, sus exposiciones variaron y estaban lejos del estándar: en Plaistow, 1809, un pueblo a 6,4 km al este de Londres, el termómetro colgaba debajo de un arbusto de laurel, y en Tottenham, donde se tomaron lecturas entre 1813 y 1816, el termómetro era de 3 m. sobre el suelo en la pared norte de una casa. Se desconoce la exposición del instrumento de la Royal Society (Mills, 2008).

Aunque Howard nunca tomó medidas simultáneas en diferentes sitios de Londres y sus alrededores, dedujo correctamente que se trataba de un fenómeno urbano y que, muy probablemente, su efecto se atenuó en los suburbios. Cuando la información espacial detallada estuvo disponible un siglo más tarde y se cartografió, el efecto de la temperatura urbana se reveló como una "piscina" de aire más cálido que ocupa el área edificada. Generalmente, se ha encontrado que la magnitud de esta 'isla' de calor urbano aumenta hacia el núcleo del asentamiento, donde la densidad de construcción es mayor. Donde quedan características 'naturales' (por ejemplo, parques y ríos), aparecen como bolsas de aire más frío dentro de este patrón general.

Howard está describiendo el efecto de la 'capa de dosel' urbana sobre la temperatura del aire. La capa de dosel se puede definir como el aire que se encuentra debajo del nivel del techo. La capa exterior del dosel adquiere sus propiedades a través de la interacción con las superficies adyacentes (muros del edificio y la superficie de la calle) y a través de los intercambios de aire con los espacios interiores (a través de las aberturas y huecos del edificio) y exteriores (entre las calles y con la atmósfera suprayacente) (Mills, 2008).

En resumen, Howard identifica cuatro causas de las diferencias observadas en la temperatura del aire:

1. Fuentes antropogénicas de calor que provocan un calentamiento atmosférico, especialmente en invierno.
2. La geometría de las superficies urbanas que 'atrapa' la radiación y obstruye la 'radiación libre hacia el cielo'.
3. El efecto de la 'aspereza' urbana al impedir el paso de 'los ligeros vientos del verano'.
4. La disponibilidad de humedad para la evaporación en el país.

Mientras que la primera causa se invoca para explicar el exceso de calor de Londres en el invierno, las tres últimas se utilizan para explicar el hecho de que "Londres no pierde del todo su superioridad de temperatura por la extinción de los incendios en primavera". La investigación ha demostrado que la ICU es más fuerte durante la noche bajo cielos tranquilos y despejados. En estas condiciones, los términos que requieren turbulencia son mínimos y no hay radiación solar disponible.

Esto implica que, cuando el efecto de la temperatura urbana es mayor, es principalmente un producto del enfriamiento impulsado por la pérdida de radiación de onda larga hacia el cielo que se compensa con la extracción de calor del almacenamiento. En áreas urbanas, las superficies del dosel (muros de edificios y superficies de calles) tienen una 'vista' limitada del cielo y, en consecuencia, se reduce el enfriamiento de onda larga durante la noche. Además, los materiales que componen el tejido urbano son impermeables y densos. Dichos materiales se caracterizan por una alta conductividad térmica y capacidades caloríficas, lo que permite almacenar la energía obtenida durante el día para retirarla durante la noche. En comparación, las superficies rurales (como los pastos) tienen una vista del cielo casi sin obstáculos y las propiedades térmicas del suelo subyacente varían mucho con el contenido de humedad (Mills, 2008).

b) Caso Buenos Aires, Argentina. Camilloni (1995), realizó un modelo para estimar la intensidad de las islas de calor atmosféricas, en donde menciona que las

diferencias de temperatura entre ciudades se deben probablemente no sólo en contrastes de la morfología urbana y en la liberación de calor de fuentes antropogénicas, sino también a diferencias en los tipos climáticos de cada región.

Desde un punto de vista estacional, algunas ciudades tienen una ICU más fuerte en invierno que en verano, mientras que en otras ocurre lo contrario. El mayor contraste en invierno a menudo se explica por la gran liberación de calor interior en ciudades más frías, mientras que la ICU más pronunciada en verano se debe a la liberación solar que reciben los edificios urbanos en ciudades más cálidas (Camilloni, 1995).

Camilloni (1995), explica que, desde mediados de la década de 1960, la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y rurales no solo ha aumentado, sino que se muestra un ligero decrecimiento. Dado que la población del área metropolitana ha aumentado significativamente en los últimos 30 años, la explicación del comportamiento de la intensidad de la ICU debe buscarse en los cambios en las condiciones meteorológicas o morfológicas de la ciudad.

Se analizaron cuatro factores para investigar las posibles causas de los cambios en la tendencia: cambios en el carácter geográfico de las ciudades, los impactos de la contaminación del aire, los efectos del calentamiento regional y los cambios en la circulación regional.

Entre estas posibles razones, la morfología de la ciudad no ha cambiado significativamente, especialmente en la zona costera, que es la zona de mayor frecuencia anual, ubicada barlovento de la estación Observatorio Central de la ciudad de Buenos Aires. La contaminación del aire tampoco parece ser un factor determinante de la intensidad de la ICU (Camilloni, 1995).

c) Caso Valparaíso, Chile. Sarricolea y Romero (2010), realizaron un “análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso. Ellos estudiaron las características geográficas y

urbanas que determinan la distribución diaria de la temperatura superficial en el área metropolitana, lo que crea un clima topográfico interno que afecta la temperatura de la ciudad.

El método consiste en obtener la temperatura superficial a partir de imágenes diurnas Landsat TM de febrero y agosto de 2007 con correcciones geométricas y radiométricas. Mediante el software ArcMap 9.2 se combinaron las variables explicativas consideradas para la posterior aplicación de un modelo de regresión múltiple. Las variables consideradas son: topografía, exposición de taludes, distancia al mar y fuentes de humedad, humedad del suelo, brillo del suelo, NDVI y densidad de población.

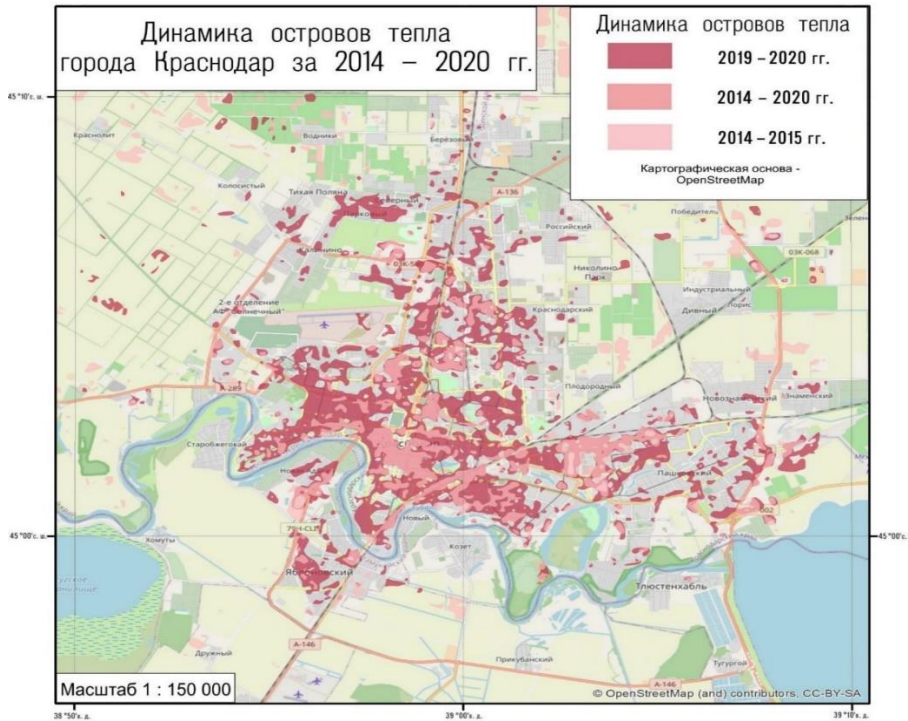
Al concluir el estudio, señalaron que las temperaturas superficiales diurnas en el área metropolitana de Valparaíso en verano e invierno dependen de la proximidad del océano y de la influencia de las brisas marinas, ya que las temperaturas de verano disminuyen y las de invierno aumentan. Esto es exactamente lo contrario de lo que sucede en pueblos del valle como Villa Alemana y Quilpué. Las islas de calor urbanas se asocian con policentricidad en las áreas más densamente pobladas, donde las islas de calor superficiales alcanzan una intensidad máxima de 17,4 °C en verano y solo 8,8 °C en invierno.

Los factores que mejor explican las temperaturas estivales son la humedad del suelo y su reflectividad, la cercanía al mar y los espacios verdes, con islas de calor urbanas en Villa Alemana y Quilpué, mientras que las zonas frescas son Viña del Mar y los cerros porteños. En cambio, durante el invierno, los factores que mejor explican este fenómeno son la reflexión del suelo, la pendiente y la densidad poblacional, donde las ICUS se concentran en el centro de Valparaíso, Concón y zonas al norte de Viña del Mar. Al final, Villa Alemana y Quilpué fueron menos cálidas.

d) Caso Krasnodar, Rusia. Sergeevna (2020) llevó a cabo un estudio exhaustivo utilizando datos de imágenes satelitales para la detección y evaluación de las islas de calor urbanas en diversas ciudades de Rusia a lo largo de distintos períodos. En este análisis, se emplearon avanzadas técnicas de teledetección para mapear y monitorear las fluctuaciones térmicas en áreas urbanizadas. Al examinar el mapa de la dinámica de las islas de calor en la ciudad de Krasnodar (Figura 8), se observa claramente que una porción significativa del territorio urbano se encuentra bajo una influencia térmica anormalmente alta en comparación con las áreas rurales circundantes. Esta disparidad térmica se manifiesta de manera consistente a través del tiempo, indicando una persistente acumulación de calor en el entorno urbano.

La investigación de Sergeevna revela que esta anomalía térmica se debe a una combinación de factores, incluyendo la densidad de la infraestructura urbana, la falta de vegetación, y la presencia de superficies construidas que retienen y emiten calor de manera más eficiente que las áreas naturales. El análisis espacial detallado muestra que las zonas con mayor densidad de edificios y menor cobertura vegetal son particularmente susceptibles a desarrollar temperaturas extremas, contribuyendo significativamente a la formación y exacerbación de las islas de calor urbanas.

Figura 8. Mapa de la dinámica de la isla de calor de Krasnodar, Rusia 2014 – 2020



*Fuente: Sergeevna, (2020).*

También hay un aumento notable de islas de calor en el período 2019-2020, en comparación con 2014-2015. Considerando el período 2014-2015 con más detalle, se puede observar que las islas de calor se ubican principalmente en la parte central de la ciudad, así como a lo largo de las líneas ferroviarias y en áreas con emprendimientos industriales en operación. La central térmica "Krasnodar", ubicada en el este de la ciudad, tiene una gran influencia; al descargar agua en el Viejo Kuban, contribuye a la formación de islas de calor, especialmente en invierno. Vale la pena señalar, que también se localizan anomalías térmicas sobre algunas zonas agrícolas al norte de la ciudad debido al fuerte calentamiento de las tierras de cultivo. En 2019-2020 se nota un aumento de las zonas con temperaturas elevadas, ya se registran islas de calor en muchas urbanizaciones que no cuentan con zonas verdes. La influencia de la vegetación en la formación de anomalías térmicas se puede evaluar utilizando el índice de vegetación NDVI.



En general, el mapa permite evaluar la dependencia de la formación de islas de calor en el territorio de Krasnodar. El centro de la ciudad es más susceptible a la contaminación térmica debido a los edificios densos y la alta transferencia de calor de los edificios, porque debido a su ubicación geográfica y características climáticas del sur y una pequeña cantidad de áreas verdes, la ciudad recibe una gran cantidad de calor diariamente y no tener tiempo para reflejarlo.

e) Caso Mendoza, Argentina. El propósito de esta investigación es aplicar el modelo de Zonas Climáticas Locales (LCZ) en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) por el método WUDAPT y analizar críticamente su factibilidad en función de las características de la ciudad que son significativamente diferentes entre sí en comparación con el modelo de las ciudades de Europa, Asia y América del Norte donde se construyen, desarrollan y utilizan modelos. En la hipótesis se plantea que la zonificación de las estructuras urbanas que componen el AMM, aprobadas de acuerdo con sus condiciones de microclima, es el primer paso para posibilitar estudios de factibilidad en profundidad para implementar estrategias de mitigación de las diferentes islas de calor (Florencia et al., 2020).

El artículo propone, en primer lugar, construir una base de datos morfológica que permita describir adecuadamente las características del espacio urbano en invierno, para así minimizar el tamaño de la forestación, determinando la LCZ sobre la base de la comparación de la geometría urbana y contrastando la respuesta térmica en invierno, para ajustar la definición de las zonas. Esto proporciona la primera definición de la LCZ, que fue revisada y ajustada en verano para destacar entre los parámetros que definen los aspectos más destacados en el WUDAPT, el método ponderado estadísticamente más alto en la reacción endotérmica (Florencia et al., 2020).

De acuerdo con la clasificación LCZ de la AMM Argentina, se identificaron 11 categorías mediante el método WUDAPT, de las cuales 6 correspondieron a tipos de

edificación y 5 a áreas de cobertura. El tipo de edificación, la zona dominante es “LCZ-6 Abierto de baja altura”, lo que demuestra el excelente desarrollo de la zona central con expansión urbana. Le siguió la LCZ-8 “Grandes Edificios Bajos”, ubicada principalmente en las zonas sur y este de la mancha urbana, donde los usos son variados (industria, almacenes, barrios cerrados). En tercer lugar, se encuentra el LCZ-3 categoría “Compacto de Baja Altura”, ubicado en la zona centro de Mendoza, centro administrativo, financiero y comercial de la provincia. Este tipo también se ha observado en la capital provincial y sus alrededores. Finalmente, los porcentajes más bajos corresponden a LCZ-9 “Construcción Descentralizada”, LCZ-5 “Altura Media Abierta” y LCZ-2 “Altura Media Compacta” (Florencia et al., 2020).

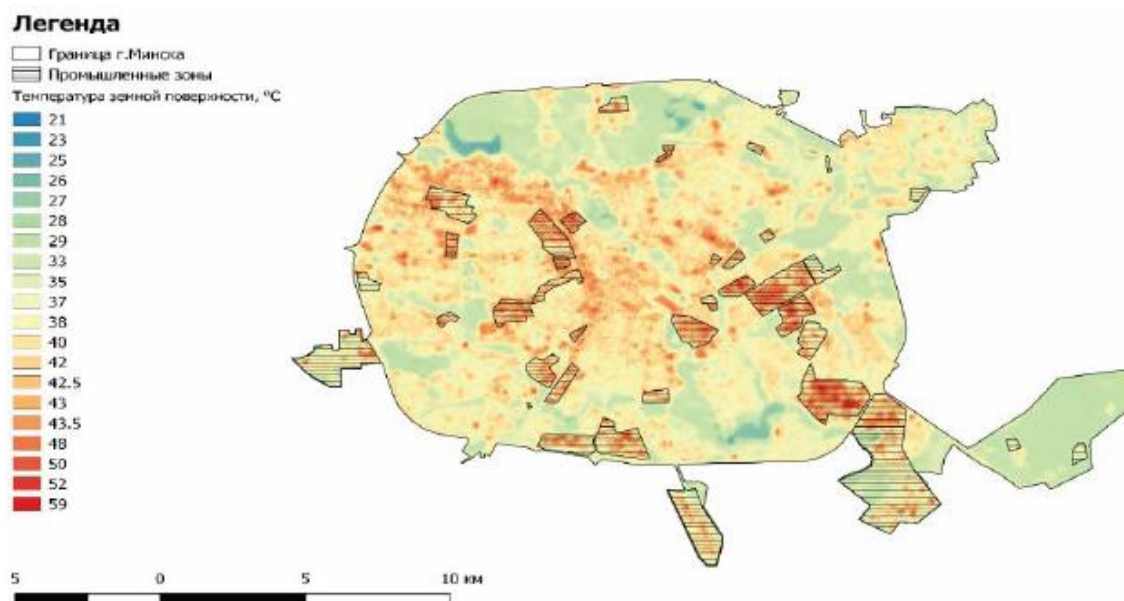
La correlación de imágenes satelitales, imágenes de calles y zonificación desarrollada revela que la morfología y los patrones de uso del suelo difieren de las áreas definidas por el método WUDAPT. La LCZ determinada parece tener un comportamiento térmico uniforme; a priori se observa que las temperaturas superficiales tienen una concordancia espacial con las clases definidas, es decir, tienen una respuesta térmica similar en la zona. Sin embargo, se planea una mayor validación térmica comparando las mediciones de imágenes infrarrojas térmicas satelitales y terrestres y analizando más a fondo el comportamiento de las variables del microclima.

f) Caso Minsk, Bielorrusia. Schlender y otros (2021), En su artículo denominado “Estudio de la contaminación térmica en Minsk en verano e invierno, según datos del satélite Landsat 8” muestran la distribución del campo de temperatura en la ciudad de Minsk, así como la influencia de la isla de calor urbana en la contaminación térmica de la ciudad según los datos del satélite Landsat - 8. Las áreas de mayor contaminación térmica en la ciudad fueron identificadas, en particular, en áreas con áreas industriales y verdes. También se llevó a cabo un análisis del campo de temperatura en Minsk en relación con el desarrollo urbano, el

número de pisos. Se llega a una conclusión sobre el impacto cualitativo y cuantitativo de la isla de calor urbana en varios distritos de Minsk.

En la Figura 9 se muestra la distribución de las temperaturas de la superficie del suelo (LST) y la ubicación de las zonas industriales en Minsk el 11 de junio de 2020. Se puede ver que la mayoría de las grandes anomalías de temperatura positiva coinciden con la ubicación de las zonas industriales. Las mayores anomalías se observan en los territorios de las plantas MAZ y MZKT. Esto se debe principalmente a la gran superficie asfaltada, así como a la falta de cobertura vegetal. Debido al bajo albedo de la superficie pavimentada, se absorbe una gran cantidad de radiación solar entrante, lo que genera temperaturas que alcanzan los 59°C, que es 2 veces la temperatura promedio de la ciudad.

Figura 9. Mapa de las temperaturas de la superficie terrestre (LST) y la ubicación de las zonas industriales de Minsk el 11 de junio de 2020



Fuente: Schlender y otros, (2021).

Entre otras cosas, las zonas industriales emiten emisiones químicas que contaminan la capa superficial de la atmósfera y crean efectos de invernadero en el área local. Además, en verano, los barrios residenciales de gran altura tienen temperaturas superficiales elevadas (Krasny Bor, Masyukovshchina, Kamennaya Gorka, Tsentr, Osmolovka, Vesnyanka, etc.), lo que se asocia con una alta proporción del área de concreto y asfalto. En promedio, la temperatura de la superficie terrestre el 11 de junio de 2020 osciló entre 35 y 42°C. Las temperaturas más bajas (21-23°C) coinciden con la ubicación de embalses, objetos hidrográficos y áreas de parque. Esto se debe a la buena reflectividad del agua y su propiedad única de capacidad calorífica.

A continuación, el cuadro 5 muestra los seis casos de estudios de islas de calor urbanas, organizados cronológicamente.

Cuadro 5. Casos de estudio internacionales

<b>Autor y Título</b>	<b>Objetivo</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>Métodos</b>	<b>Resultados</b>
Howard (1833) El clima de Londres, Inglaterra	Analizar los registros de temperatura (T.) para describir y analizar el fenómeno de la isla de calor urbana.	Temperatura, Presión, viento, precipitación.	Registro de T. recopilados en 3 sitios diferentes fuera de Londres, con termómetros para realizar las mediciones de temperatura.	Análisis relativamente complejo. Identificó, cuatro causas de las diferencias observadas en la temperatura del aire.
Camilloni (1995) Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas. Ciudad: Buenos Aires Argentina	Desarrollar un modelo que permita estimar la intensidad media anual de la isla urbana de calor a partir de promedios anuales de temperatura.	Latitud, altura, topografía, temperatura	Modelo de estimación de T rural y, por consiguiente, la intensidad de la isla urbana de calor, de forma que T rural será estimada como la temperatura que tendría el área sobre la que está emplazada la ciudad, si ella no estuviera.	Desde mediados de la década del 60, la diferencia de temperatura urbana-rural no sólo no aumentó, sino que muestra un suave decrecimiento.
Sarricolea y Romero (2010) Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso, Chile.	Investigar los rasgos geográficos y urbanos que determinan la distribución de las temperaturas superficiales diurnas en el Área Metropolitana de Valparaíso, que presenta topoclimas en el interior que afectan la temperatura de la ciudad.	Cercanía al mar, altitud, exposición de laderas, humedad del suelo, presencia de áreas verdes, reflectividad del suelo y densidad constructiva.	El método, aplica modelos de regresión múltiple por pasos sucesivos, con base en imágenes térmicas proporcionadas por el satélite Landsat®.	La isla de calor urbano se asocia al poli-centrismo de las zonas más densamente construidas, en dónde la máxima intensidad de la isla de calor superficial se alcanza en verano llegando a 17,4°C mientras que en invierno tan solo a 8,8°C.
Sergeevna (2020). Aplicación de datos de imagen de satélite para detección y	Identificar islas de calor urbanas según datos de teledetección.	Zonas industriales, vías férreas, vialidades.	Se utilizó el método de información sobre la superficie terrestre mediante el registro de la radiación	Las islas de calor en Krasnodar, la mayor parte de las áreas de la ciudad cae en la zona de temperatura anormalmente

evaluación de islas de calor en territorios urbanizados.  Ciudad: Krasnodar, Rusia.			electromagnética procedente de ella, reflejada o intrínseca.	alta en comparación con los territorios circundantes.
Florencia et al., (2020).  Aplicación del método WUDAPT en la ciudad de Mendoza-Argentina para definir zonas climáticas locales.	Aplicar el modelo de Zonas Climáticas Locales en el Área Metropolitana de Mendoza utilizando el método WUDAPT y realizar un análisis crítico de su factibilidad de implementación en función de las características de la ciudad.	Zonas climáticas locales, clima urbano, zonificación, morfología urbana.	Aplicación del método WUDAPT en Mendoza. El proceso de definición de zonas con WUDAPT se realiza a partir de los pasos especificados por la metodología (Bechtel, et al., 2015) que se encuentran detallados en su sitio web.	En la contrastación térmica de las zonas, se observa que la temperatura superficial posee correlación espacial con las clases definidas mediante el Método WUDAPT, es decir que las zonas poseen respuesta térmica semejante.
Shlender (2021).  Estudio de la contaminación térmica en Minsk, Bielorrusia, durante las temporadas de verano e invierno según datos del satélite Landsat 8.	Muestra la distribución del campo de temperatura en Minsk, y la influencia de la isla de calor urbana en la contaminación térmica de la ciudad según el satélite Landsat-8.	Áreas industriales y verdes, temperatura superficial, contaminación térmica, geo ecología urbana.	Con datos sobre la distribución de la temperatura de la superficie terrestre con base en imágenes satelitales Landsat-8, procesadas mediante el módulo experimental Landsat Surface Temperature (LST) en Quantum Geographic Information System ver.2 (QGIS).	En verano aumenta la influencia de las zonas industriales de Minsk, donde la temperatura de la superficie puede ser 2 veces mayor que la temperatura de otras partes de la ciudad.

*Fuente: Elaboración propia con base a los casos de estudios de islas de calor.*

## 2.2. Estudios de casos a nivel nacional

a) Caso Ciudad de México, México. En el caso de esta ciudad, uno de los principales autores que abordó este fenómeno fue Erick Jáuregui (1973). El mostró una diferencia de temperatura promedio de 2°C con respecto a los alrededores de la ciudad. El mismo autor destaca que las islas de calor urbanas son más intensas durante la estación seca (diciembre a marzo) debido a la inversión de calor. Además, para ver la distribución de las islas de calor urbanas, realizó rutas móviles de octubre a febrero en noches claras y tranquilas, con buenos resultados entre las 4:15 y las 6:15 a.m. Al mismo tiempo, notó que la isla de calor urbana tiene una forma concéntrica y está ligeramente sesgada hacia el suroeste. Finalmente, Jáuregui (1997) confirma las observaciones descritas anteriormente, señalando que esta isla tropical de calor urbano alcanza los 5°C al amanecer.

El autor también agregó que en la Ciudad de México se desarrolló una isla de calor urbana, aumentando su valor debido al enorme crecimiento poblacional y la expansión espacial de la ciudad.

Asimismo, Jáuregui menciona que la Ciudad de México alcanza una intensidad de isla de calor urbana de 8°C antes del amanecer durante la estación seca, pero en condiciones de calma y cielos perfectamente despejados. Como complemento, Cui y De Foy (2012) utilizaron otro método para analizar la temperatura superficial en la Ciudad de México utilizando imágenes de satélite Terra MODIS para localizar islas calientes y frías. Además, estos autores finalmente observaron que las islas de calor urbanas están más relacionadas con la estabilidad atmosférica que la vegetación urbana durante la noche, cuando la intensidad de calor de la isla alcanza los 10 °C.

b) Caso Tampico, Tamaulipas. Fuentes y otros (2014), en su investigación de islas de calor, realizaron dos rutas, una en sentido vertical y otra en sentido horizontal, a lo largo de las vías principales de la ciudad, creando cruces o intersecciones donde se registran los valores, repiten la ruta y registran diariamente en el mismo nodo antes de comparar información térmica de diferentes fechas de registro. Al final de cada secuencia de seguimiento, los datos del sensor se monitorean y exportan a una hoja de cálculo de Excel® utilizando Hobo-ware y una estación base óptica U-4 con interfaz de procesamiento HOBO®, donde se mide la temperatura en °C para visualizar los valores térmicos de la temperatura de los trayectos marcados en rojo.

Por medio del mapa de la ciudad instalado en el software de diseño AutoCAD®, se colocaron los datos con puntos de encuentro o intersecciones de acuerdo con la hora y ubicación real, cuando se combinan los valores obtenidos de una misma temperatura, se obtienen los isotermas que definen la isla de calor urbana de Tampico, según intensidad calorífica y distribución espacial. En este relevamiento se encontró que los meses más importantes fueron enero y agosto, y las estaciones más

importantes y adecuadas para el estudio fueron el verano y el invierno, respectivamente, por ser representativas desde el punto de vista climático.

Se ha propuesto que las islas de calor se comportan con cambios de tamaño mínimos tanto en verano como en invierno, y los perfiles térmicos asociados se derivaron del comportamiento promedio mensual de las temperaturas registradas, arrojando valores térmicos máximos y mínimos para cada estación o nodo. Las variables térmicas fueron las variables directas que afectaron el microclima en cada zona urbana (Figura 10).

Figura 10. Plano de la ciudad de Tampico, incluyendo los recorridos que se marcan en color rojo



---

*Fuente: Fuentes, (2007).*

c) Caso Guadalajara, Jalisco. Parada (2015), realizó un análisis en el área metropolitana de Guadalajara (AMG), dicho análisis contempla variables climáticas,

usos de suelo, estadísticas de población, morbilidad, cobertura vegetal y la construcción de las islas de calor para la zona de estudio.

En cuanto a la distribución espacial de las islas de calor en la zona de estudio las temperaturas máximas para el periodo 1996-2009 con base en el estudio de Parada (2012), es posible identificar zonas donde la temperatura es más alta, en este caso Tlaquepaque donde el centro de la isla de calor es de 29.2 grados centígrados, las regiones con las temperaturas más bajas son Vallarta, Atemajac de 27.4°C y 27.2°C (Parada, 2015).

El epicentro de la isla de calor con la temperatura mínima se ubica en la región central, seguido de las subzonas, debido a que, en la distribución de temperatura máxima, la temperatura más baja se encuentra en las regiones de Atemajac y Las Águilas, la presencia de mayor cantidad de áreas verdes, son un efecto refrescante, por lo que las temperaturas son más bajas que en otras zonas de AMG, que están más urbanizadas.

El mayor impacto del efecto isla de calor en Tlaquepaque y Centro se explica por las mayores edificaciones y superficies pavimentadas, la falta de espacios verdes y la urbanización muy acelerada en estas zonas.

Lo anterior coincide con lo encontrado en un estudio de Noro y Lazzarin (2015), quienes notaron un efecto de isla de calor muy fuerte, donde las calles se caracterizan por una relación promedio entre la altura promedio de los edificios a lo largo de la calle y el ancho promedio de la calle, sin superficies permeables (Parada, 2015).

d) Caso Hermosillo, Sonora. El estudio se enfoca en Hermosillo, Sonora, la ciudad más poblada de México con un clima árido seco. El objetivo principal es entender cómo la vegetación influye en la temperatura de la superficie del suelo (LST) y cómo se distribuye espacialmente esta temperatura.



López y otros (2021), utilizaron imágenes de satélite (Landsat 8 y Sentinel 2A) y datos de Google Earth para estimar la cobertura vegetal y la LST (Land Surface Temperature) en diferentes áreas de la ciudad. Los resultados mostraron que la cobertura vegetal promedio en las manzanas urbanas es del 12%, con un 38% de ellas teniendo una cobertura vegetal menor o igual al 10%.

El modelo utilizado para estimar la LST encontró que las temperaturas promedio por manzana oscilan entre 37°C y 45°C, siendo el porcentaje de cobertura vegetal la variable explicativa principal. Se concluyó que aumentar la cobertura vegetal en un 10% podría disminuir la LST en 1.1°C.

La distribución espacial de la LST en Hermosillo no sigue el patrón típico de islas de calor urbanas, donde el centro es más cálido. En cambio, se observó un mosaico de zonas cálidas y frías, lo que sugiere que los humanos están modificando el clima a pequeña escala, creando oasis urbanos diurnos en áreas con mayor vegetación.

El estudio destaca la importancia de la vegetación en la mitigación del calor urbano y sugiere que aumentar la cobertura vegetal, especialmente en parques, podría ayudar a crear oasis urbanos y mejorar el confort térmico en Hermosillo. Además, enfatiza la necesidad de considerar la distribución espacial de la vegetación para lograr una distribución equitativa de los beneficios ambientales que ésta proporciona.

Este análisis ofrece información valiosa para los responsables de la formulación de políticas públicas y los investigadores interesados en la gestión sostenible de los ecosistemas urbanos, especialmente en ciudades áridas como Hermosillo.

e) Caso Ciudad de México, México. Barrera y otros (2022), realizaron una investigación que tiene por título “La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México”, el objetivo de este trabajo es el de identificar las zonas que son más vulnerables ante el fenómeno de la

ICU a partir de su localización y su relación con los elementos que conforman el tejido urbano de la ciudad. Los autores mencionan que los resultados puedan ser considerados para la integración de la política pública y planeación de la Ciudad de México.

Para identificar y analizar las islas de calor superficiales urbanas en la Ciudad de México, se desarrolló una metodología que consta de cuatro fases: adquisición y procesamiento de información de teledetección; generación y análisis de información de estructura urbana; desarrollo de correlaciones bivariadas a partir de índices de correlación de Pearson; y análisis de resultados (Barrera y otros,2022).

El análisis de la expresión de las islas de calor urbanas según la estructura funcional de la Ciudad de México ayudó a identificar relaciones socioeconómicas, usos, cobertura, ubicación, etc. De mayor debilidad por su relación espacial con las regiones con las temperaturas más altas durante el día y la noche en esta región.

De esta forma, se determinó que las zonas con mayor concentración de islas de calor urbanas se manifiestan con temperaturas superficiales nocturnas de hasta 22 °C, lo que corresponde a gran parte del centro norte de la ciudad (Alcaldías Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez), son las más consolidadas, las más densamente pobladas, las más activas económicamente y tienen la mayor población expuesta al calor extremo, es decir, personas entre 60 y 65 años. En cambio, las temperaturas más bajas se encuentran en las zonas menos densamente pobladas de la ciudad por ser irregulares y dispersas con grandes áreas intermedias de cobertura natural, además de estar ubicadas a mayor altura y a mayor distancia del centro de la ciudad (Barrera y otros, 2022).

Finalmente, en el cuadro 6 se presentan cuatro estudios relacionados con las islas de calor en México.

Cuadro 6. Casos de estudio nacionales

<b>Autor y Título</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Variables</b>	<b>Métodos</b>	<b>Resultados</b>
Jáuregui (1973).  Islas de calor en Ciudad de México.	Identificar y demostrar la presencia de islas de calor.	Temperaturas medias, intensidad, vegetación urbana.	Procesamiento de datos de estaciones meteorológicas y recorridos móviles, para después procesarlos con un software especializado y así realizar el análisis de islas de calor, que en este caso fueron atmosféricas.	Se mostraron las diferencias de temperatura que existieron en la ciudad. Jáuregui (1997, 2000) menciona que durante la estación seca la ciudad de México alcanza los 8°C de intensidad de la isla de calor urbano, antes del amanecer.
Fuentes (2014).  Isla de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat.	Análisis de islas de calor atmosféricas.	Temperatura, intensidad, precipitación, densidad de población.	Se utilizaron datos de un censo, registrados en el programa Excel, utilizando Hobo-ware y una estación base óptica U-4 con interfaz de procesamiento HOBO®, donde se mide la temperatura para visualizar valores térmicos de los trayectos marcados.	Las islas de calor, tanto en verano como en invierno se comportan con una mínima variabilidad. Se obtuvieron perfiles térmicos que son relevantes según su comportamiento medio mensual de temperaturas registradas.
Parada (2015).  Adaptación a los efectos de la Isla del calor en la salud de la población del Área Metropolitana de Guadalajara.	Se realizó un análisis de islas de calor superficiales y atmosféricas en el área metropolitana de Guadalajara (AMG), dicho análisis contempla variables climáticas.	Cambio de uso de suelo, densidad de población, vegetación, temperatura.	Procesamiento de datos de estaciones meteorológicas y la información se procesó con el software ArcGIS. Con el mapa de uso de suelo, la clasificación se relaciona con la temperatura superficial.	La tendencia de la temperatura indica que van en incremento tanto las noches cálidas como las temperaturas mínimas. Podría estar relacionado con el descontrol e incremento de la urbanización, falta de áreas verdes y los cambios de uso de suelo.
López y otros (2021).  Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora	El objetivo general de la investigación es conocer la influencia de la vegetación en la temperatura de la superficie del suelo (LST).	Porcentaje de cobertura vegetal total promedio (%CVTP) y Temperatura superficial del suelo (LST).	Los métodos de esta investigación incluyen datos de Landsat 8, cálculo de la LST, estimación de la cobertura vegetal a partir del NDVI y un modelo estadístico multivariado.	La distribución de la LST no sigue el patrón típico de islas de calor urbanas, sino que muestra un mosaico de zonas cálidas y frías. Esto sugiere que los humanos están modificando el clima a pequeña escala, creando oasis urbanos en áreas con mayor vegetación.
Barrera y otros (2022).  La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México.	Identificar las zonas más vulnerables ante el fenómeno de la Isla de Calor Urbano a partir de la localización y la relación con diversos elementos que conforman la estructura urbana de la ciudad.	Temperatura superficial, estructura urbana, índice de vegetación, cobertura y uso de suelo.	Con el 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 en uno de los meses más cálidos del año 2018.	El análisis identificó las zonas más vulnerables ante dicho fenómeno y su asociación con las características de estructura urbana de la misma.

*Fuente: Elaboración propia con base a los casos de estudios de islas de calor.*

### **2.3. Estudios de casos a nivel estatal**

a) Caso Toluca, Estado de México. Morales y otros (2007) realizaron una investigación que tiene por título “Isla de calor en Toluca, México” donde mencionan que el clima en la ciudad de Toluca y en el mundo ha experimentado

transformaciones significativas debido al aumento de la población y la expansión urbana. Este proceso ha generado disparidades atmosféricas notables entre las zonas urbanas y rurales, marcando un fenómeno conocido como "isla de calor". La progresiva urbanización, junto con la disminución de la cobertura vegetal en favor de la infraestructura edificada, el incremento en la demanda de energía para calefacción en edificaciones y la presencia de contaminantes atmosféricos, ha contribuido a intensificar estas variaciones climáticas.

Para abordar esta problemática, los investigadores han desarrollado una metodología innovadora. Su objetivo es identificar y delinear los sectores urbanos con temperaturas más elevadas, influenciadas directamente por la presencia y características de la infraestructura urbana. Esta metodología se basa en la recopilación detallada de datos de temperaturas registrados en días representativos tanto de invierno como de verano, abarcando tanto períodos diurnos como nocturnos. Estos datos se obtienen de manera precisa a partir de las estaciones de monitoreo ambiental pertenecientes a la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA).

La representación cartográfica de la distribución de la "isla de calor" en la región de estudio arroja una perspectiva visualmente esclarecedora sobre las áreas más afectadas por este fenómeno, permitiendo una mejor comprensión de su alcance y características. Además de esta cartografía, se realiza un análisis detallado de diversas variables atmosféricas adicionales. Estas incluyen la humedad relativa, la cantidad de precipitación y la velocidad del viento. La observación de su comportamiento anómalo en el contexto urbano aporta una comprensión más profunda de la influencia de la urbanización en el entorno climático.

Este estudio no solo profundiza en la compleja interacción entre el crecimiento urbano y los factores climáticos, sino que también subraya la importancia de abordar estos desafíos para promover un desarrollo sostenible en las áreas urbanas. La comprensión de cómo los elementos urbanos afectan el clima local es crucial para

una planificación efectiva y para garantizar una alta calidad de vida en un entorno en constante cambio. Asimismo, proporciona una comprensión más profunda de cómo la interacción entre el crecimiento urbano y los factores climáticos está moldeando el entorno en Toluca.

b) Caso Toluca, Estado de México. Torres (2020), realizó un estudio que tiene por título “Estrategias de mitigación de islas de calor urbanas en Toluca” este estudio pormenorizado se enfoca en la identificación y evaluación exhaustiva de las estrategias de mitigación de las islas de calor urbanas en Toluca, concentrándose específicamente en analizar los efectos en la estación Pino Suárez del tren Interurbano Ciudad de México-Toluca. La presente investigación representa un análisis minucioso y completo de las estrategias diseñadas para contrarrestar los impactos generados por las islas de calor urbanas en el entorno de Toluca.

El autor de este estudio, José Luis Torres Quintana, emprende una exploración detallada que involucra la identificación y comparación de datos de campo procedentes de múltiples localizaciones. El enfoque central es examinar los efectos de la isla de calor urbano (UHI) y su relación con diferentes escalas temporales. Dentro del ámbito de estudio, se destaca la estación Pino Suárez del tren Interurbano Ciudad de México-Toluca, la cual se convierte en un punto de análisis crucial para entender cómo operan las islas de calor en este contexto particular.

El análisis abarca una evaluación rigurosa de los efectos de la isla de calor urbano a lo largo de diferentes intervalos de tiempo, proporcionando una perspectiva más completa y detallada de su comportamiento. El concepto de albedo se aborda con profundidad, ya que desempeña un papel vital en la reflectividad de las superficies urbanas y, en consecuencia, en la modulación de la temperatura local.

En resumen, este análisis exhaustivo contribuye de manera significativa al entendimiento de cómo las particularidades urbanas influyen en el microclima local. Además, sienta las bases para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación de

los efectos de la isla de calor urbano, enfocándose específicamente en el contexto de Toluca y su estación Pino Suárez del tren Interurbano.

c) Caso Zona Metropolitana de Toluca, Estado de México. Esta investigación tiene por título “Clima urbano y justicia climática: una propuesta metodológica de estudio desde el análisis espacial” cabe mencionar que no está enfocada principalmente en las islas de calor, pero se consideró por la importancia de algunas variables que también se realizaron para este trabajo de tesis como lo es el clima urbano y así como algunos factores que serán mencionados a continuación, desde una perspectiva del análisis espacial. Rivera (2016), menciona que la justicia climática emerge como un enfoque esencial para comprender las complejas interacciones entre el cambio climático y los entornos urbanos, destacando la influencia de los factores urbanos en la configuración del clima y la calidad de vida.

En el contexto actual, la justicia climática se alza como un paradigma fundamental que examina en profundidad cómo las ciudades interactúan con el cambio climático. Elementos urbanos clave, como la densidad habitacional, infraestructura vial, áreas verdes y espacios abiertos, ejercen una influencia trascendental en la dinámica climática de las ciudades.

El enfoque de la investigación se centra específicamente en la Zona Metropolitana de Toluca, empleando un análisis espacial para trazar conexiones entre la variabilidad climática y las condiciones de vida. A través de esta propuesta metodológica, se busca determinar el nivel de justicia climática en la metrópoli y cómo esta se relaciona con los patrones climáticos y las experiencias cotidianas de sus habitantes.

En resumen, este análisis profundo del clima urbano y la justicia climática ofrece una base sólida para la formulación de políticas urbanas resilientes y equitativas, abordando los desafíos climáticos desde una perspectiva integral y comprometida. Las conclusiones extraídas de este estudio enriquecedor sobre el clima urbano y la

justicia climática son fundamentales para la comprensión de la relación entre las ciudades y las islas de calor. Los resultados y observaciones presentados permiten identificar patrones clave y perspectivas valiosas para abordar de manera eficiente y equitativa los desafíos climáticos en contextos urbanos.

#### **2.4. Conclusión parcial**

En este capítulo, se presentaron diferentes técnicas empleadas para la identificación de islas de calor urbanas. Existen mediciones directas e indirectas para el análisis de ICUS, las cuales se desarrollan a través de diferentes metodologías, con mediciones de temperatura del aire (islas de calor atmosféricas) como la recolección de registros de temperatura a partir de estaciones meteorológicas manuales o automatizadas de la red meteorológica existente, con la finalidad de obtener información general de las características del clima, a escala del conjunto de la ciudad y su periferia. De igual manera, los recorridos o transectos térmicos, realizados con instrumentos de medida no convencionales instalados sobre vehículos, estos permiten obtener información sobre un gran número de puntos y trazar mapas y perfiles bastante detallados.

En estudios internacionales, algunos trabajos analizan las islas de calor a partir de la temperatura atmosférica, utilizando para ello registros de estaciones móviles con la realización de transectos térmicos o de estaciones meteorológicas fijas (Sarricolea y Romero, 2010). En ellos, los objetivos principales se basan en verificar la existencia de islas de calor, indagar la forma, distribución y la intensidad de dichas islas.

Por otra parte, las mediciones de la temperatura superficial (islas de calor superficiales), se trabaja con la región denominada infrarrojo térmico del espectro electromagnético a través de la técnica de percepción remota. Los sensores situados en satélites captan la temperatura radiante de las superficies urbanas, lo que permite cubrir una mayor área para un análisis de la distribución espacial de la misma.

Se tienen trabajos que abordan el análisis de las islas de calor a partir del cálculo de temperatura superficial, utilizando sensores infrarrojos (Sarricolea y otros, 2014). El

análisis se enfoca no solo en determinar la distribución, intensidad y causas de la existencia de islas de calor, también es importante mencionar que se han hecho contribuciones al tema, entre las que destacan procesos de mitigación a través de la gestión del albedo, correlación con factores socioeconómicos y características urbanas.

También se han realizado trabajos que combinan las metodologías de temperatura atmosférica y superficial, realizando análisis estadísticos entre ellas, con la finalidad de contrastar resultados y detectar las islas de calor (Coseo y Larsen, 2014).

El capítulo 2 integra resultados empíricos y técnicas metodológicas con el marco teórico, demostrando cómo la teoría de las islas de calor urbanas se puede aplicar y validar en diferentes contextos. Los estudios de caso ilustran la diversidad de enfoques y métodos utilizados para identificar y caracterizar las ICU, proporcionando una visión integral del fenómeno y sus implicaciones.



## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA MEDIR ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES

El presente capítulo presenta la metodología empleada para la identificación de islas de calor, así como los materiales y fuentes de información consultadas. Se detalla el procesamiento que se realizara para obtener la intensidad de la isla de calor superficial y las categorías de superficie artificial (uso de suelo) en la zona de estudio.

La presente investigación es de tipo cuantitativa, de acuerdo con la naturaleza de la información procesada, debido a que las variables que se trabajaran se insertaran en mediciones determinadas por escalas de intervalos. El sustento teórico tiene como base la teoría del clima urbano, las islas de calor y la estructura urbana. Cabe mencionar, que en este trabajo se aborda la estructura urbana desde su ámbito funcional y no morfológico. El análisis de las variables se realizará a partir del método correlacional, porque explica la relación entre las variables elegidas.

Para identificar y analizar la isla de calor urbana superficial de la zona de estudio, se desarrolló una metodología que consta de las siguientes cinco etapas: extracción y procesamiento de información de percepción remota; generación y análisis de información de cambio de uso de suelo; análisis espacial e intensidad de las islas de calor; análisis de resultados y conclusiones.

### **3.1. Descripción de la zona de estudio**

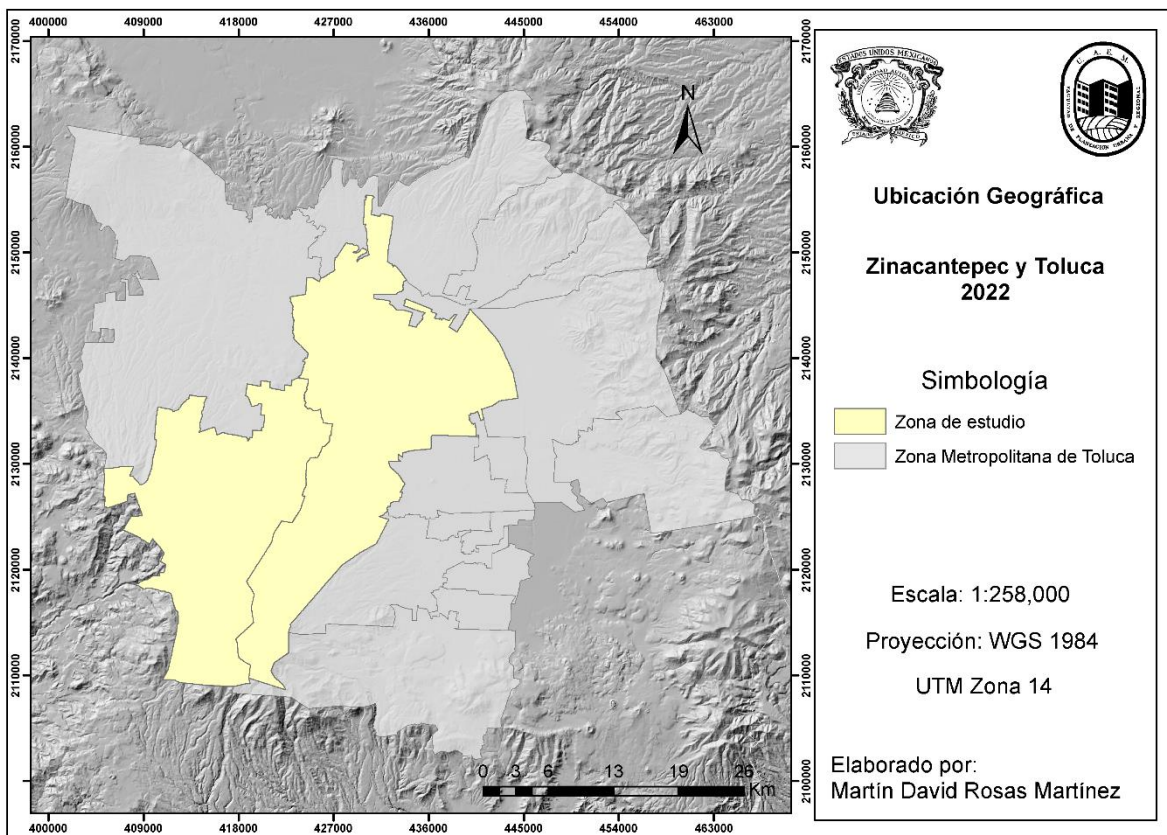
La Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) se sitúa en la región central del país, dentro del Estado de México, abarcando las coordenadas geográficas comprendidas entre 19°34'58"N, 99°31'49"W y 19°04'29"N, 99°50'47"W. Esta área metropolitana se encuentra a una altitud que varía entre los 2,600 y los 3,000 metros sobre el nivel del mar. Según los datos proporcionados por el Sistema Estatal de Información Metropolitana (SEIM), la ZMT posee una extensión territorial de 2,410.5 km<sup>2</sup> y está

conformada por un conglomerado de 16 municipios, los cuales son: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec (SEIM, 2022).

En lo que respecta a las condiciones socioeconómicas, en el año 2010, la metrópoli de Toluca contaba con una población total de 1,936,126 habitantes, presentando una tasa de crecimiento media anual del 2.2% y una densidad poblacional de 813.6 habitantes por kilómetro cuadrado (SEDESOL et al., 2012). Durante la década de los años 80, la Zona Metropolitana de Toluca experimentó una transformación significativa al evolucionar de una economía predominantemente rural a una economía caracterizada por la industrialización y el desarrollo del sector servicios. Este cambio se consolidó inicialmente gracias al corredor industrial Toluca-Lerma y, posteriormente, la economía de la región se diversificó hacia el sector terciario, logrando una expansión considerable hacia los municipios periféricos (GEM y COESPO, 2012).

En el contexto de la Zona Metropolitana de Toluca, se seleccionaron los municipios de Toluca y Zinacantepec (Figura 11) como objetos de estudio, en los cuales se han observado significativos cambios en el uso del suelo. Estos cambios han sido propiciados por la instalación de corredores industriales, la construcción de fraccionamientos y conjuntos habitacionales. Como consecuencia, ambos municipios han experimentado un notable crecimiento tanto en superficie urbana como en población y en la diversificación de actividades económicas. La expansión del espacio construido para usos urbanos ha resultado en la transformación del suelo natural en superficies artificiales, evidenciando un proceso de urbanización acelerada que altera considerablemente el paisaje y la funcionalidad del ecosistema original.

Figura 11. Ubicación geográfica de la zona metropolitana de Toluca y zona de estudio



*Fuente: Elaboración propia.*

Los municipios de Toluca y Zinacantepec presentan gran densidad poblacional y acelerado cambio de uso de suelo. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (2010) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población total del municipio de Toluca fue de 819,561 mientras que en el año 2020 la población aumento a 910,608 habitantes, el municipio contaba con un total de 199,815 viviendas habitadas en el año 2010 de las cuales 199,789 eran de tipo particular y 26 de vivienda colectiva y para el año 2020 estas pasaron a un total de 239,805 viviendas habitadas, las de tipo de vivienda particular contaban con 239,734 y vivienda colectiva con 71.

Por su parte, la población total de municipio de Zinacantepec en el año 2010 fue de 167,759 habitantes, mientras que en el año 2020 registró 203,872 habitantes, el municipio contaba con un total de 37,665 viviendas habitadas en el año 2010 con 37,660 viviendas de tipo particular y 5 viviendas de tipo colectivas, en el año 2020 las viviendas habitadas pasaron a un total de 48,816 de las cuales 48,807 eran viviendas particulares y 9 viviendas de tipo colectivas.

### 3.2 Materiales y método

Para llevar a cabo la investigación de islas de calor superficial es necesario la revisión de material bibliográfico y cartográfico que permita construir el marco teórico conceptual y referencial. Las fuentes bibliográficas se obtendrán de bases de datos electrónicos.

Las fases del trabajo de investigación se muestran en el cuadro 7 y se detallan con mayor profundidad posteriormente.

Cuadro 7. Diseño de la investigación

<b>Fase de investigación</b>	<b>Técnica de investigación</b>	<b>Instrumento de investigación</b>	<b>Fuente</b>
<b>1.</b> Obtención, procesamiento y análisis de imágenes de satélite.	Derivación de temperatura en el software para tratamiento digital de imágenes ArcGIS 10.8.2	Imágenes de satélite LANDSAT 8 (Bandas térmicas 10 y 11).	Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).
<b>2.</b> Elaboración de cartografía temática de islas de calor.	Interpolación y reclasificación de datos de temperatura.	Datos de temperatura superficial ArcGIS 10.8.2	Imagen térmica de temperatura superficial.
<b>3.</b> Elaboración de cartografía de superficie artificial.	Georreferenciación y digitalización.	Sistema de información geográfica ArcGIS 10.8.2	IGCEM Mapas de ocupación del territorio.
<b>4.</b> Relación de variables y factores de estudio.	Análisis espacial y regresión lineal.	ArcGIS 10.8.2 IBM SPSS Statistic 22	Cartografía y gráficas elaboradas.
<b>5.</b> Conclusiones	Análisis	Investigación realizada	Propia

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2.1. Datos para condiciones atmosféricas

Se analizará el fenómeno de isla de calor en los municipios de estudio en las cuatro estaciones del año. Según García-Cueto et al. (2007), los meses estacionales más representativos en el hemisferio norte son: enero (invierno), marzo (primavera), junio (verano) y octubre (otoño).

Cabe mencionar que la aparición del efecto isla de calor en esta región requiere de ciertas condiciones. Para que alcancen su máxima intensidad, las condiciones atmosféricas requieren de un período anticiclónico con aire en calma y cielo despejado, que proporcionen un mayor aislamiento en la superficie (López y otros, 1993).

Para cumplir con las características de cielos despejados, se deben seleccionar imágenes satelitales con aproximadamente un 3% de nubosidad en toda la escena y 0% en el área de estudio, para resultados más precisos.

Por lo tanto, para determinar la fecha del análisis se tomaron en cuenta las condiciones atmosféricas anticiclónicas y los meses representativos del año. Así, se determinó las fechas de dicha investigación (Cuadro 8).

Cuadro 8. Fechas de estudio con condiciones anticiclónicas

<b>Estación</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
Invierno	Enero	29
Primavera	Marzo	26
Verano	Junio	30
Otoño	Octubre	12

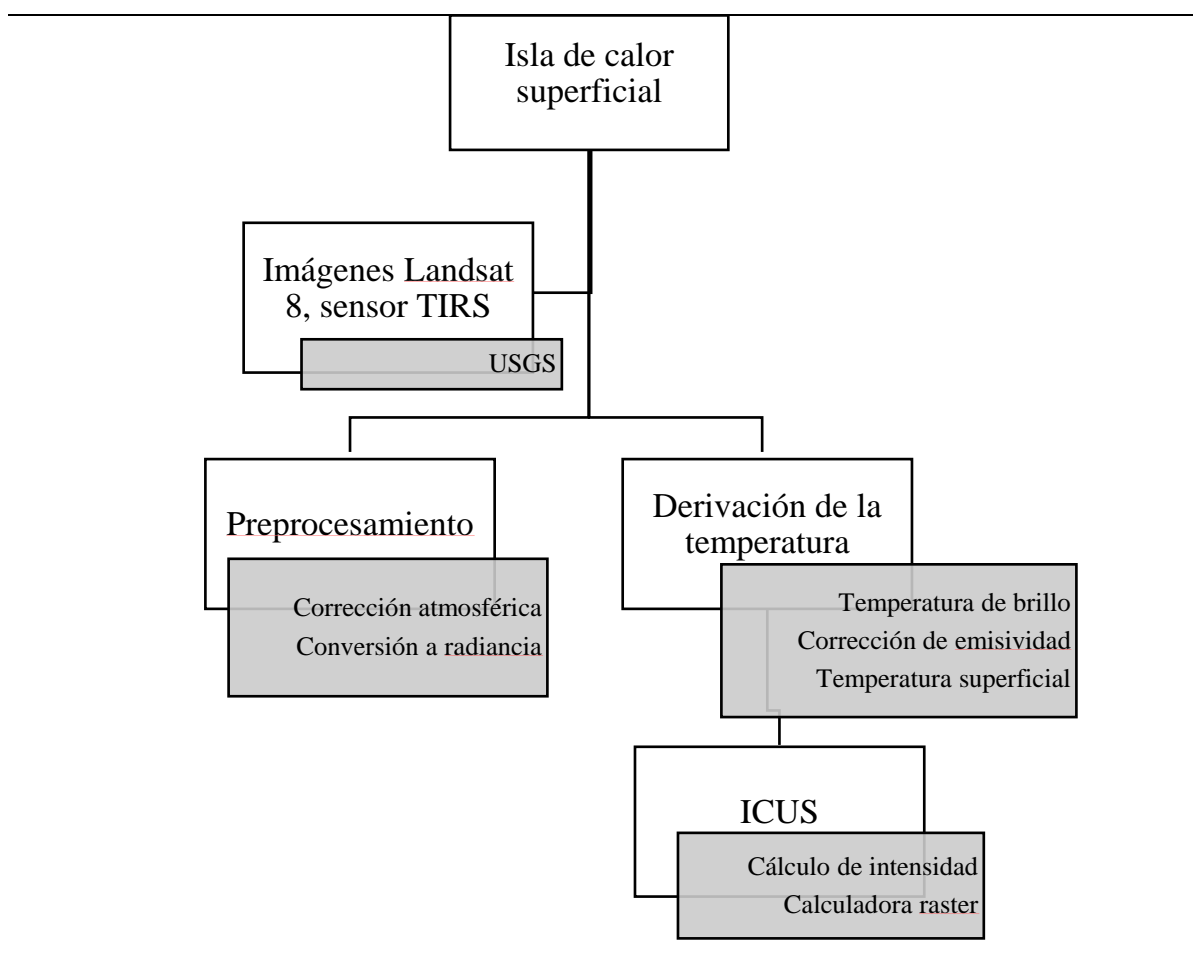
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.2. Datos y procesos para temperatura superficial

Para identificar la isla de calor urbana superficial, se requiere derivar la temperatura de superficie, la cual se obtiene de 4 escenas del satélite Landsat 8 (*path 26, row 47*), de las fechas elegidas para cada estación del año. Las imágenes satelitales pertenecen al nivel 1T, es decir, tiene correcciones geométricas y radiométricas resultando una imagen digital ortorectificada (USGS, 2015). Para la derivación de la temperatura se utilizarán las bandas del infrarrojo térmico entre 10 y 12  $\mu\text{m}$  (banda 10 y 11) y se procesarán en el software ArcGIS 10.8.2.

La figura 12 muestra las etapas de integración de los métodos requeridos para el procesamiento de imágenes satelitales y la adquisición de ICUS.

Figura 12. Procedimiento para el análisis de la isla de calor superficial (ICUS)



*Fuente: Rivera, 2016.*

Los procedimientos de estimación de temperatura se basan en la medición de la radiación electromagnética emitida por la superficie del cuerpo en función de su temperatura. Dado que la radiación en la atmósfera superior detectada por el sensor es la suma de la radiación de la superficie del suelo y la radiación de la atmósfera, por tanto, se debe realizar un preprocesamiento para corregir la influencia de la atmósfera en la imagen del satélite, por el método de valores mínimos del histograma propuesto por Chávez (1996).

Para la derivación de la temperatura superficial (Chuvienco 2002, citado de Rivera 2016) indica el procedimiento a seguir:

a) Es necesario codificar los niveles digitales (ND) a radiancia, para encontrar la relación entre el flujo emitido y el recibido por el sensor. USGS (2015) informa que para Landsat 8, las bandas de los sensores OLI y TIRS se pueden convertir a radiancia espectral TOA utilizando los factores reescalados de radiancia incluidos en el metadato de la imagen utilizando la fórmula 1.

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad [1]$$

Donde:

$L_{\lambda}$  es la radiancia espectral TOA (Watts/ (m<sup>2</sup> \* srad \* μm)).

$M_L$  es el factor reescalado de la banda específica del metadato (radiance\_mult = 3.3420e-04).

$A_L$  es el factor reescalado de la banda específica del metadato (radiance\_add = 0.10000) y

$Q_{cal}$  son los valores de los píxeles de productos estándar cuantificados y calibrados (DN) (quantize\_cal\_max =65535) (quantize\_cal\_min = 1).

b) El siguiente paso es determinar la temperatura de brillo (temperatura radiante) que es la temperatura estimada en función de la radiancia a partir de la inversión de la ecuación de la Ley de Planck (Tempfli y otros, 2009) [2].

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad [2]$$

Donde:

$T$  es la temperatura de brillo At-satélite (K)

$L_\lambda$  es la radiación espectral TOA (Watts/ (m<sup>2</sup> \* srad \* μm))

$K_1$  es la constante de conversión térmica de la banda específica (B10 = 774.89, B11 = 480.89 Wm<sup>-2</sup>sr<sup>-1</sup> μm<sup>-1</sup>) y

$K_2$  es la constante de conversión térmica de la banda específica (B10 = 1321.08, B11 = 1201.14 K).

c) Es importante mencionar que la temperatura radiante no considera la emisividad de la superficie ni la influencia de la atmósfera por lo que se requiere realizar dicha corrección. Las dos bandas térmicas de Landsat 8 permiten, por primera vez, la corrección atmosférica utilizando técnicas split- window (Roy *et al.*, 2014).

Para el presente trabajo se utilizó el método NEM propuesto por Gillespie (1985), el cual calcula la temperatura para cada píxel y banda, utilizando un valor inicial de emisividad, con la finalidad de obtener la temperatura de superficie estimada y nuevos valores de emisividad; se desarrolla a través de la ecuación 3 (Jiménez-Muñoz, *et al.*, 2003).

$$B_i(T_s) = \frac{L_i^{sup} - (1 - \epsilon_{inicial})L_i^{atm\downarrow}}{\epsilon_{inicial}} \quad [3]$$

Donde:

$B_i$  es la función de Planck de radiación que emite un cuerpo negro en la banda térmica a considerar

$T_s$  es la temperatura superficial,

$L_i^{sup}$  corresponde a la emisión de radiancia de la superficie de la banda térmica considerada,

$\epsilon_{inicial}$  es el valor inicial de emisividad (0.96) y



$L_i^{atm\downarrow}$  indica la radiancia atmosférica descendente.

A partir de los resultados es posible obtener los valores de la temperatura de superficie de cada banda térmica tomando el valor máximo para  $T_s$  [4].

$$T_s = \max(T_{s,i}) \quad [4]$$

La temperatura de la superficie se encuentra en °K por lo que se transformará a °C restando 273.15. A partir de la imagen térmica y utilizando ArcGIS, se extrajo el valor del píxel del punto correspondiente.

Para obtener la intensidad de la isla de calor superficial, se elige el valor de la estación rural usada para el cálculo de intensidad de la ICU. Con la herramienta de calculadora ráster, se restó dicho valor a toda la imagen, resultando los valores de intensidad de la ICUS.

Finalmente, cabe mencionar que los valores de intensidad de la isla de calor se clasificaron de acuerdo con Fernández (1995) en:

- Débil: Diferencia de temperatura entre la zona urbana y la zona rural circundante de 1°C a 3°C.
- Moderada: Diferencia de temperatura entre 3°C y 5°C.
- Fuerte: Diferencia de temperatura entre 5°C y 7°C.
- Muy fuerte: Diferencia de temperatura superior a 7°C.

Los valores por debajo de cero se clasifican como islas de calor negativas.

### 3.2.3. Datos para superficie artificial (uso de suelo urbano)

Para delimitar el mapa de cambio de uso de suelo en la zona de estudio se utilizarán los polígonos de áreas geostatísticas básicas (AGEBS) desarrollados por el INEGI en el 2022, y como base se usarán las nomenclaturas de cobertura del suelo

(CORINE Land Cover) que fueron consistentes con la información proporcionada por el Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGECEM) a través de su producto cartográfico. Asimismo, se utiliza la información de uso de suelo proporcionada por ESRI (Environmental Systems Research Institute) del año 2022.

La información temática descrita se encuentra en formato PDF y RASTER, por lo que se requieren procedimientos de georreferenciación y digitalización para su posterior análisis. Por lo tanto, las descripciones de las categorías utilizadas se reportan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Descripción de las categorías utilizadas en la superficie artificial

<b>Superficie artificial</b>	
CORINE Land Cover	Adaptación con base en el IGECEM
Área urbana.	Área habitacional.
Áreas comerciales, industriales y de transportes.	Comercial, industrial, aeropuerto (equipamiento).
Áreas verdes artificiales, no agrícolas.	Instalaciones deportivas y recreativas, camellones y plazas con áreas verdes.

*Fuente: Elaboración propia, basado en Rivera (2016).*

Luego se realiza el análisis en el software ArcGIS 10.8.2 utilizando una base cartográfica de categorías de superficies artificiales y un mapa temático de islas de calor para identificar relaciones entre ambas variables. Se utilizarán perfiles, métodos de superposición y estadísticas zonales como métodos de análisis espacial.

Para identificar las relaciones estadísticas entre variables, se asigna un peso cualitativo a cada categoría de superficie artificial con base en el grado de antropización del suelo (Cuadro 10).

Cuadro 10. Clasificación de la superficie artificial por intensidad de antropización

<b>Categoría</b>	<b>Intensidad de antropización</b>
Agrícola	1
Equipamiento	2
Habitacional	3
Comercial	4
Industrial	5

*Fuente: Elaboración propia, basado en Rivera (2016).*

### **3.3. Conclusión parcial**

En este capítulo se describieron los materiales y la metodología utilizada para identificar islas de calor superficiales. Con la ayuda de los datos de percepción remota de la Tierra, en particular, la filmación en el rango infrarrojo térmico es posible evaluar la estructura espacial interna de las islas de calor urbanas y rastrear la dinámica en el tiempo y el espacio de las anomalías térmicas locales.

Como se mencionó anteriormente se desarrolló una metodología que consta de las siguientes cinco etapas: la primera es la extracción y procesamiento de información de percepción remota, donde se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución Landsat. Para el municipio de Toluca y Zinacantepec se descargó una escena de imágenes de satélite Landsat 8 mediante la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), esto permitirá que las bandas térmicas de Landsat 8 se utilicen para estimar o calcular la temperatura de la superficie terrestre. Solo es necesario aplicar un conjunto de ecuaciones a la calculadora de imágenes ráster de los sistemas de información geográfica. En la segunda etapa que es la generación y análisis de información de uso de suelo, se generó la cartografía general térmica por Área Geoestadística Básica (AGEB) y el mapa general del uso del suelo en el año 2022. En la tercera etapa del análisis espacial e intensidad de las islas de calor, se realizará la interpretación del cálculo de las temperaturas superficiales y como están

siendo sus intensidades, finalmente en la etapa 4 y 5 se detalla el análisis de resultados y conclusiones.

El estudio utilizó imágenes de satélite o datos de teledetección. Son la fuente más importante de información operativa sobre el medio ambiente natural, se utilizan para estudiar la superficie terrestre, crear y mantener mapas temáticos actualizados y para otros fines. Los métodos de teledetección se basan en la obtención de información sobre la superficie terrestre mediante el registro de la radiación electromagnética procedente de ella, reflejada o autogenerada. La posibilidad de identificar diversos objetos y estudiar sus propiedades mediante métodos remotos se debe a que la absorción, dispersión, reflexión y emisión de energía electromagnética en diferentes zonas del espectro son específicas de cada tipo de superficie terrestre y de los objetos ubicados en ella. El análisis de las características espectrales de los objetos, los rasgos estructurales y texturales de las imágenes nos permite obtener información para su posterior decodificación e interpretación.

Para resolver los problemas de detección y evaluación de islas de calor, se necesitaban imágenes de satélite con la resolución y cobertura adecuadas. Las imágenes del sistema satelital Landsat 8 resultaron ser el material más adecuado.

El programa Landsat, liderado por Estados Unidos, es uno de los más exitosos en el mercado mundial de teledetección, con siete satélites lanzados como parte del programa desde 1972. El programa realiza estudios multispectrales, repetidos periódicamente y a largo plazo, utilizando dispositivos de escaneo (radiómetros) para resolver problemas de recursos naturales, ambientales, de monitoreo y cartográficos. El programa lo implementan las tres organizaciones gubernamentales más importantes de los EE. UU.: NASA, NOAA y USGS (Korolev, 1999, citado de Kazakov, 2020).

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo tiene como objetivo presentar los resultados, cómo se comportan las islas de calor superficiales en los municipios de estudio, sobre todo la presencia de zonas que concentran mayores temperaturas, por ejemplo, aquellas zonas de los municipios de estudio donde hay más concentración del tejido urbano construido y/o dónde hay materiales más absorbentes a la radiación solar, como lo son los distintos usos de suelo.

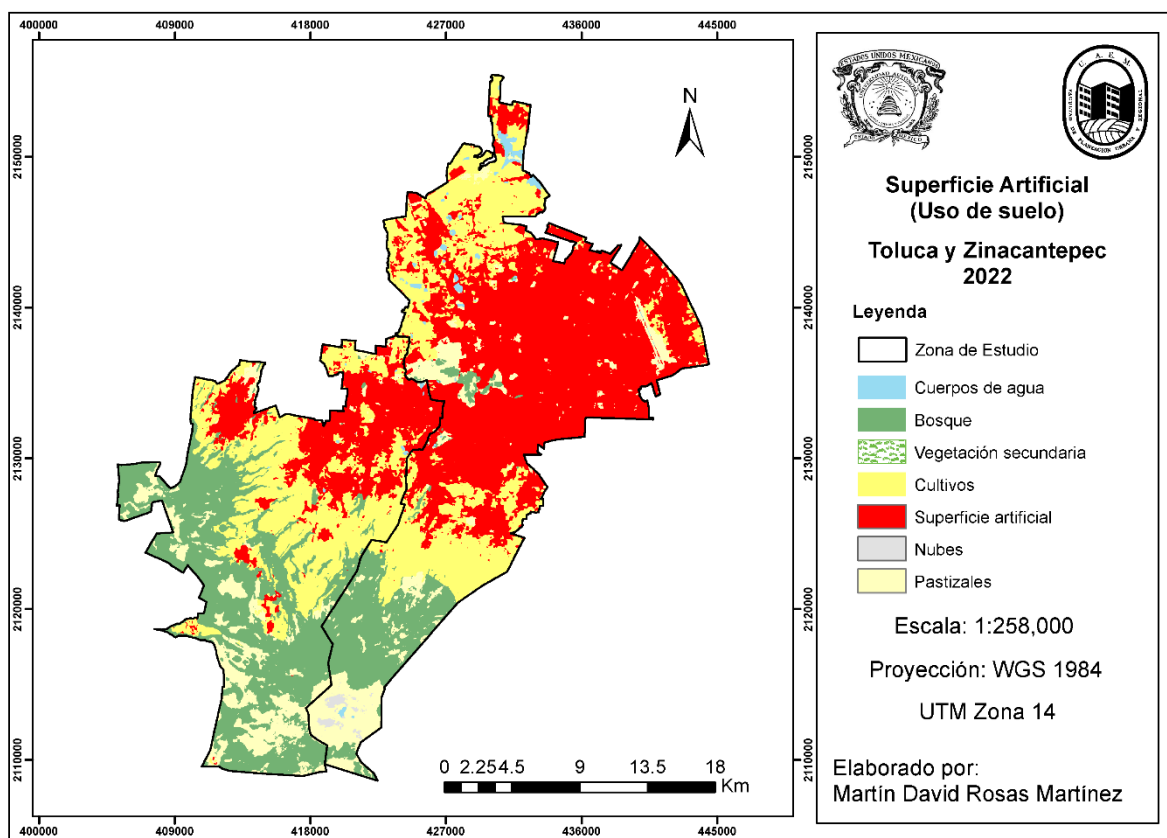
El capítulo consta de las siguientes cuatro etapas: 4.1. Superficie artificial (uso de suelo), al tener la base cartográfica de las categorías de la superficie artificial y los mapas temáticos de las islas de calor, se realizó el análisis en el Sistema de Información Geográfica (ArcGis 10.8.2) para identificar la relación existente entre ambas variables. Los procesos de análisis espacial empleados fueron perfiles, procedimientos overlay y estadísticas zonales; 4.2. Temperatura superficial por estaciones, fue posible obtener las temperaturas superficiales terrestres en los municipios de estudio del año 2022 las cuales se representan en mapas, cabe señalar que las temperaturas descritas en la simbología son temperaturas propias del corte de los municipios de estudio y no de toda la imagen ráster, ya que se puso en conjunto toda la imagen del mosaico de la temperatura superficial terrestre para no distorsionar la representación visual de las temperaturas en el mapa; 4.3. Análisis de correlación, aquí se presentan los mapas temáticos de islas de calor, para identificar e interpretar su posible comportamiento o distribución de dichas islas con los factores ya mencionados con anterioridad; 4.4. Análisis de resultados, con otros hallazgos, para realizar una comparación entre los resultados obtenidos y la de otras investigaciones, para establecer relaciones entre dos o más fenómenos o conjuntos de elementos, que en este caso serían las islas de calor, para obtener razones válidas en la explicación de diferencias o semejanzas.

#### 4.1. Superficie artificial (uso de suelo urbano)

Respecto al mapa elaborado a partir de la digitalización de la información generada por ESRI (Environmental Systems Research Institute), para las categorías del uso de suelo de la superficie artificial, se determinó a partir del cálculo en el software ArcMap 10.8, el área que ocupaba cada categoría. Los resultados muestran que la mayor parte del territorio en los municipios de estudio es ocupada por la superficie artificial con más del 80% del área.

Al realizar la representación espacial (Figura 13) se detectó que dentro de los polígonos del área urbana existían áreas destinadas a la actividad agrícola ocupando el 9.36% del territorio y también uso forestal con un porcentaje muy bajo del territorio (0.80%).

Figura 13. Superficie artificial de 2022



*Fuente: Elaboración propia, basada en el Marco Geoestadístico (INEGI, 2022).*

#### **4.2. Temperatura superficial por estaciones**

La temperatura superficial se comporta de manera diferente durante las estaciones, durante el día y la noche, debido a los cambios en las condiciones atmosféricas, la inclinación del sol y los procesos térmicos producidos por los diferentes tipos de superficie en los dos municipios metropolitanos de Toluca y Zinacantepec.

Al analizar los mapas de la temperatura superficial en los municipios de Toluca y Zinacantepec, en el año de 2022 durante las 4 estaciones del año, los mapas muestran un patrón consistente en la distribución de las islas de calor en la zona de estudio. Las islas de calor se concentran principalmente en las zonas urbanas de Toluca y Zinacantepec, siendo más intensas en el centro de ambas ciudades. También se extienden hacia el sur. Además, se observan algunas islas de calor aisladas en áreas rurales, posiblemente relacionadas con actividades industriales o agrícolas.

Localización y distribución de las islas de calor:

Centro de Toluca y Zinacantepec: Las islas de calor más intensas se encuentran en el centro de Toluca, extendiéndose hacia el sur y este. En Zinacantepec, las islas de calor se concentran en el centro de la ciudad y se extienden hacia el sur.

Sur de Toluca y Metepec: Islas de calor de menor intensidad se observan en el sur de Toluca y en Metepec, abarcando principalmente zonas urbanas.

Áreas rurales: Se identifican algunas islas de calor aisladas en áreas rurales al norte y al sur de la zona de estudio, posiblemente asociadas a actividades industriales o agrícolas.

Los criterios para clasificar los datos de las temperaturas superficiales en los municipios de estudio se basan en los rangos de temperatura promedio registrados

durante las cuatro estaciones del año: primavera, verano, otoño e invierno. Los rangos de temperatura se dividen en tres categorías: extrema alta, media y extrema baja. Estos criterios permiten analizar las variaciones de temperatura a lo largo de las estaciones del año, facilitando la identificación de tendencias, patrones estacionales y posibles anomalías que pueden impactar en el entorno urbano.

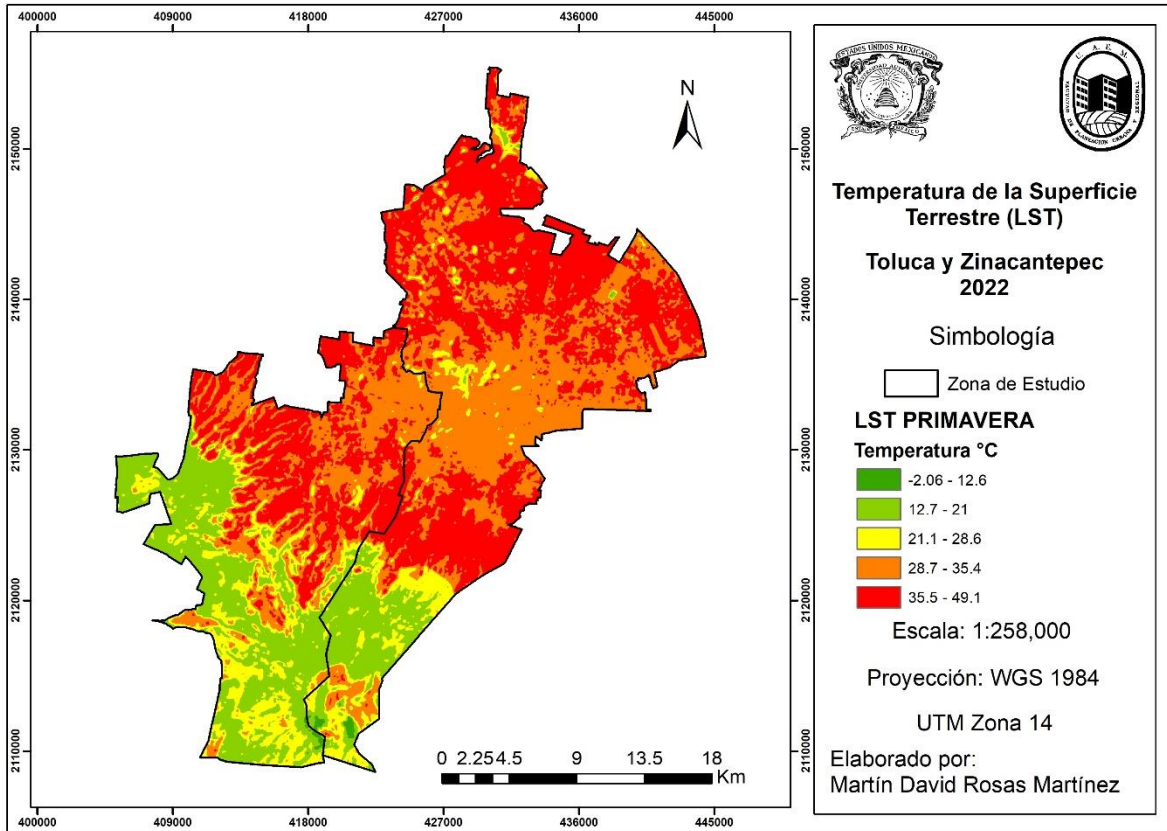
#### 4.2.1. Temperatura de la superficie en primavera (26 de marzo)

Durante la primavera, el comportamiento de la temperatura superficial (Figura 14) revela que la temperatura máxima registrada alcanza los 49°C, mientras que las temperaturas mínimas rondan los -2°C, concentrándose estas principalmente en la región sur de ambos municipios. En las áreas urbanas, se observan extensas superficies con temperaturas superiores a los 30°C. No obstante, existen zonas específicas dentro de los dos municipios metropolitanos donde se presentan condiciones similares de alta temperatura. Entre estas destacan el aeropuerto, situado al noreste de la ciudad; diversas áreas industriales localizadas entre Paseo Tollocan y el aeropuerto; y los parques industriales ubicados en dirección a la carretera Toluca-Naucaupan. Estas áreas concentran las temperaturas superficiales más elevadas, lo que sugiere una notable influencia de la urbanización y la actividad industrial en la modulación térmica de la región.

El análisis de la distribución espacial de las temperaturas superficiales en los municipios de Toluca y Zinacantepec durante la primavera también pone de manifiesto la influencia significativa de la cobertura del suelo y las características topográficas locales. Las áreas con alta densidad de edificaciones y pavimentación, típicas de las zonas urbanas e industriales, muestran una capacidad aumentada para absorber y retener el calor solar, resultando en temperaturas más elevadas.

Figura 14. Temperatura de la superficie en primavera 2022 (26 de marzo)





*Fuente: Elaboración propia.*

Si bien el crecimiento de las áreas urbanas es un factor importante en la creación de las islas de calor urbanas, por el aumento de temperaturas. Se puede observar que, en el oeste, norte y el centro del municipio de Zinacantepec se presentaron las temperaturas más altas, esto debido a que en esas zonas se encuentran ubicados fraccionamientos y conjuntos urbanos, edificios, viviendas, calles de concreto y estructuras metálicas, las cuales retienen una mayor temperatura durante la temporada de canícula, mientras que las partes cercanas a cerros y laderas, localizadas al sur de Zinacantepec, registraron temperaturas más bajas.

Este aumento de temperatura probablemente se relaciona con los tipos de material como el concreto, asfalto y estructuras metálicas empleados en la construcción de este tipo de infraestructuras, las cuales suelen tener mayor radiación solar, que a su vez se ve reflejada en aumento de la temperatura superficial.

Es por ello, que en la figura 14 se observan algunas áreas específicas donde se tienen mayores temperaturas en comparación con las periferias, específicamente el sur de los municipios, donde hay mayor presencia de vegetación y por ende se tienen temperaturas más bajas.

Por otra parte, Rivera (2016), menciona que los horarios con mayor afluencia vehicular también generan el aumento de la temperatura superficial, ya que los coches negros expuestos en pleno sol absorben mucho más calor que si fueran coches blancos y como resultado, dentro del vehículo las temperaturas pueden superar los 30°C.

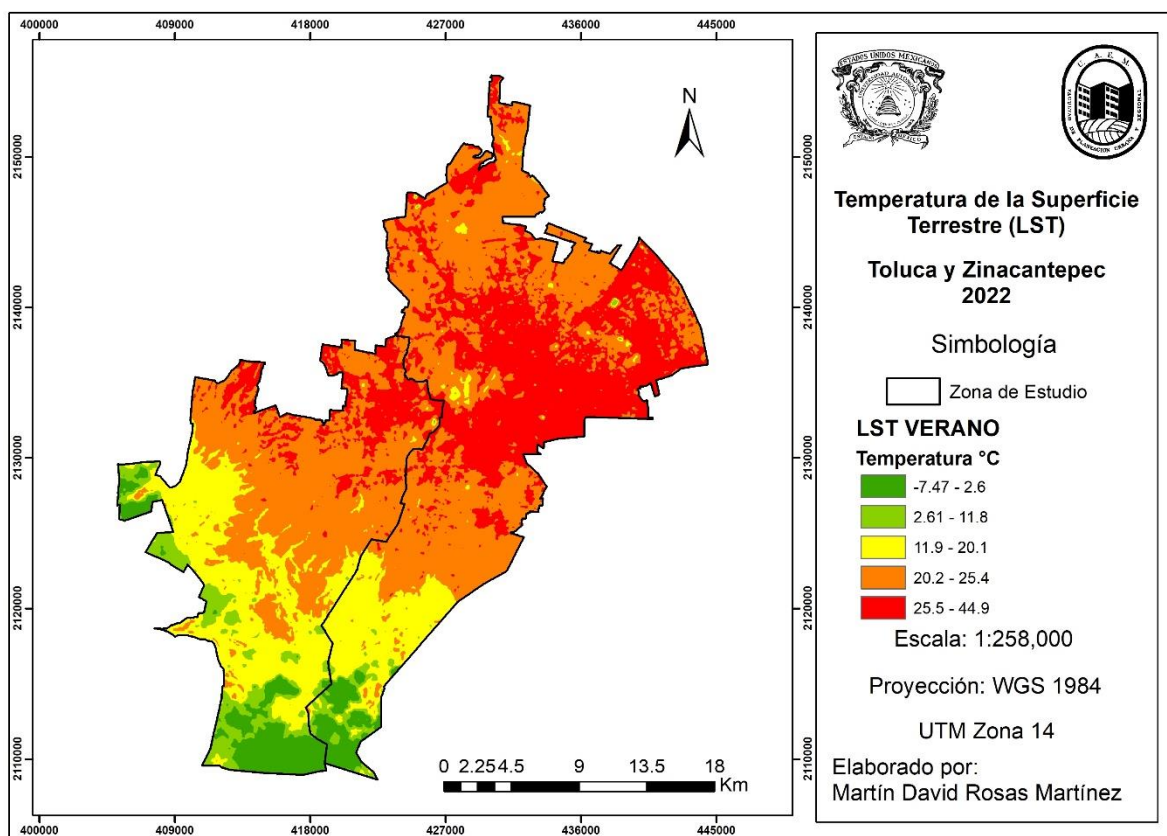
El tejido urbano es otro de los factores del efecto albedo que está relacionado con la isla de calor. Los edificios, las calles, el asfalto, y el cemento tienen más capacidad de absorber la radiación solar, con ello, retienen más calor y hacen subir la temperatura, por ello es por lo que en primavera los municipios de Toluca y Zinacantepec presentaron temperaturas de hasta 49°C.

#### 4.2.2. Temperatura de la superficie en verano (30 de junio)

Durante el verano el comportamiento de la isla de calor superficial se concentra principalmente en la zona central de la ciudad de Toluca, en el norte y este, cabe mencionar que en algunas imágenes se ve nubosidad incluyendo esta estación ya que algunas imágenes corresponden a un día y las otras a otro, por la forma de capturar las imágenes el sensor, lo mismo aplica para el caso de la obtención de las temperaturas. Mientras tanto, en el municipio de Zinacantepec, se pueden observar las temperaturas más altas en el este y norte. Las temperaturas más altas alcanzan los 44°C de intensidad principalmente hacia el noreste de la metrópoli en la zona del aeropuerto, a partir de ahí la temperatura se va desvaneciendo en toda la zona sur de ambos municipios, hasta alcanzar temperaturas por debajo de los 25°C, llegando así a las intensidades más bajas de -7°C, ubicadas en donde predomina más la zona boscosa y el Nevado de Toluca (Figura 15).

En la Figura 15, se puede observar que las intensidades superiores a 28°C en el caso del municipio de Toluca siguen un patrón radial delimitado por las principales avenidas que componen a la metrópoli, se define a través de la vialidad Paseo Tollocan hasta la carretera Toluca-México, al norte por el Paseo Matlazinca, siguiendo en dirección a la carretera Toluca-Atlacomulco, al este abarca la zona industrial hasta el aeropuerto. Al sur, el patrón se extiende por la carretera Toluca-Tenango. Las áreas rurales muestran intensidades de 15 a 2°C.

Figura 15. Temperatura de la superficie en verano 2022 (30 de junio)



*Fuente: Elaboración propia.*

En verano se puede observar que hubo un aumento de temperatura, con una diferencia de 8 a 14°C, esta diferencia de temperaturas puede ser ocasionado por el solsticio de verano, en donde la tierra se ubica al extremo del eje mayor, ahora en el

punto más cercano al sol. En este caso la distancia con el otro extremo es igual. En resumen, el inicio de las estaciones del año está marcado únicamente por la posición de la tierra con relación al sol, aunque la mayoría de las personas asocian el inicio de la estación con cambios en el clima, factores como la latitud, la altitud, la ubicación con relación al mar, las corrientes oceánicas y las tormentas con sus trayectorias son los que generan el tipo de clima y sus temporadas climáticas en una localidad.

La cartografía de la temperatura superficial de verano a simple vista muestra una gran diferencia de temperatura entre los municipios de Zinacantepec y Toluca, pero sobre todo indica que durante las olas de calor el calentamiento urbano es aún más evidente. En todo momento el interior urbano es más cálido y se mantiene más seco, mientras la periferia se conserva más fresca y húmeda, en particular el espacio arbolado y próximo al Nevado de Toluca, cuya temperatura varía entre los  $-7^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$ . En la figura 15, también se puede observar que el municipio de Zinacantepec tiene temperaturas más bajas que el municipio de Toluca, concentrando solamente algunas de las temperaturas más altas que varían de los  $27^{\circ}$ - $30^{\circ}\text{C}$  en el noreste donde hay mayor densidad de población a diferencia de las áreas verdes, presentando así islas de calor más intensas. Las temperaturas más altas se alcanzan donde la superficie construida (impermeable) es mayor que las áreas verdes existentes (permeables).

En este contexto, la evolución diacrónica del promedio y el máximo de las temperaturas de la superficie del suelo carece de una linealidad creciente conforme a la densificación urbana que fue validada solo en el caso de las temperaturas mínimas que son asociadas generalmente con la vegetación urbana.

Asimismo, las condiciones de variabilidad de las temperaturas superficiales son múltiples para considerar puntualmente a la densificación urbana como un factor incidente por sí solo en la definición del patrón de temperaturas de los municipios.

Esto parece extender el campo de la exploración a otros contenidos y significados incluidos en los paisajes urbanos.

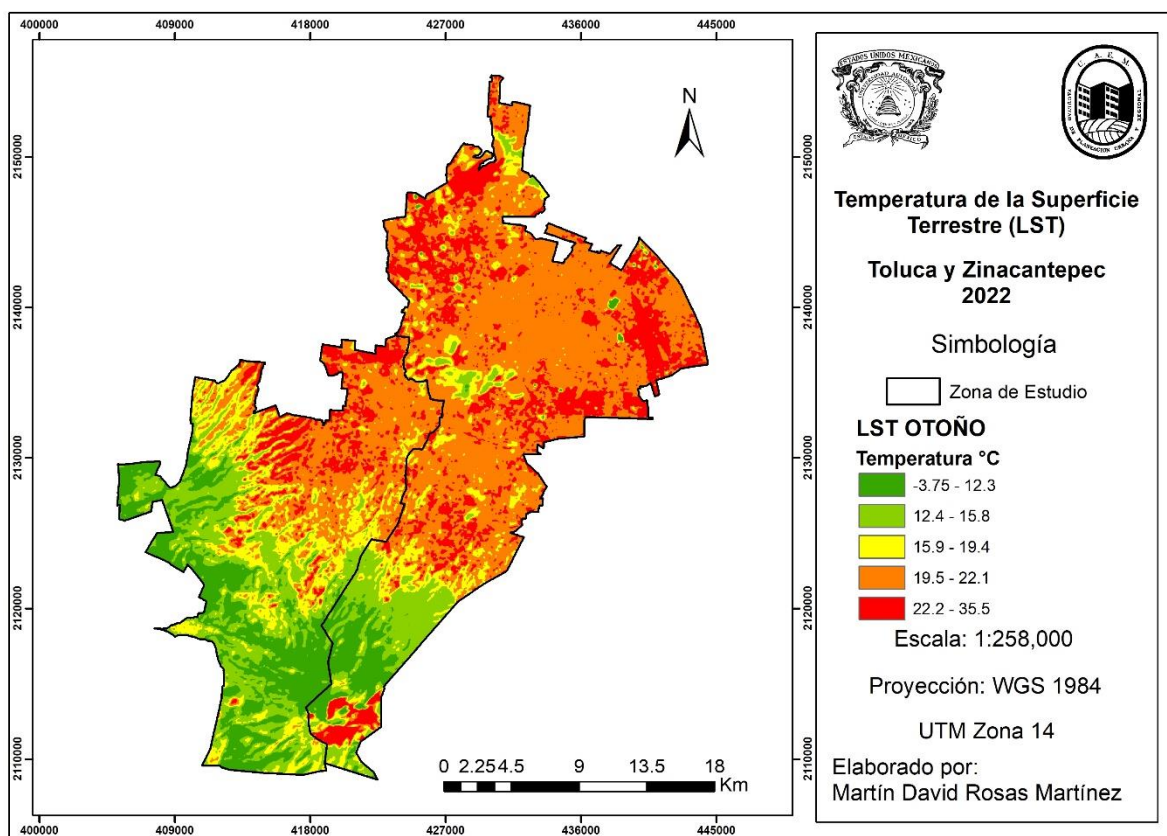
#### 4.2.3. Temperatura de la superficie en otoño (12 de octubre)

En cuanto al patrón de comportamiento de la temperatura superficial, puede observarse en la figura 16 que la temperatura máxima registrada alcanza los 35°C, ubicándose en la zona norte del municipio. En contraste, la zona sur presenta una temperatura mínima de -3.7°C, lo cual se atribuye a la mayor presencia de áreas verdes que contribuyen al enfriamiento local mediante procesos de evapotranspiración y sombra natural.

En la zona centro y norte del límite municipal de Toluca, así como en la zona norte del municipio de Zinacantepec, se observa una notable variabilidad de temperaturas elevadas. Esta situación se deriva de la extensa mancha urbana que incluye unidades económicas, unidades habitacionales y zonas industriales. Las temperaturas en estas áreas oscilan entre los 18°C y los 22°C, un rango que puede explicarse por la alta densidad de edificaciones y superficies pavimentadas. Los materiales constitutivos de estas zonas urbanas, como el concreto y el asfalto, tienen una baja capacidad de reflexión de la radiación solar (albedo), lo que resulta en una mayor absorción de la luz y, consecuentemente, en el aumento de la temperatura superficial.

Este patrón térmico resalta la influencia de la urbanización en la modulación de las temperaturas locales. Las áreas industriales y residenciales con poca vegetación y alta densidad de infraestructura exhiben una mayor capacidad para almacenar y reemitir el calor acumulado durante el día, exacerbando el fenómeno de las islas de calor urbanas. Este efecto es particularmente pronunciado en las regiones con una alta concentración de actividades económicas e industriales, donde los materiales de construcción y las superficies impermeables contribuyen significativamente al aumento de la temperatura ambiental.

Figura 16. Temperatura de la superficie en otoño 2022 (12 de octubre)



*Fuente: Elaboración propia.*

Por el contrario, las áreas con temperaturas que radican entre  $-3^{\circ}$  a  $18^{\circ}\text{C}$ , se encuentran en áreas donde hay rodales forestales en algunos centros de la población urbana, pero en especial en las zonas rurales y dichas temperaturas tienen una mayor cobertura en las zonas forestales ubicadas al sur de los municipios de estudio, donde se encuentra el Nevado de Toluca que cuenta con una amplia zona forestal y al estar en estación de otoño, se registran temperaturas mayormente bajas con respecto a las demás estaciones.

En otoño, se genera una isla de calor superficial de negativa a débil. Las temperaturas más bajas se ubican en áreas rurales con intensidad de  $4^{\circ}$  a  $9^{\circ}\text{C}$  (Tollocan, Juárez y Carranza), aunque también se identifican zonas urbanas con el

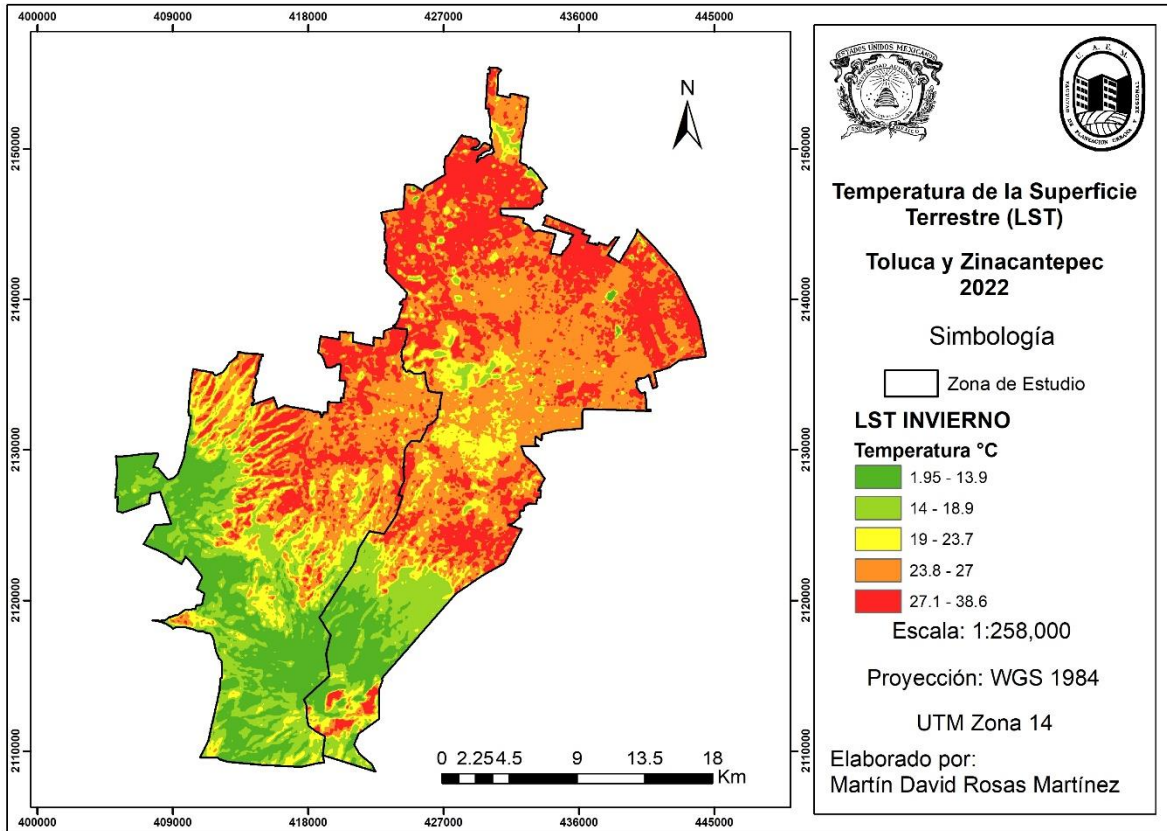
mismo comportamiento, como el área de Ciudad Universitaria (CU) y el Parque Metropolitano Bicentenario.

Asimismo, se produce una isla de calor dentro del municipio de Toluca con intensidades de 25° a 29°C, mientras que en Zinacantepec las intensidades van desde los 23° a 25°C en el noroeste de ambos municipios. También se puede observar que una zona con altas temperaturas de 30°C se ubica a lo largo del corredor industrial Toluca-Lerma delimitado por la vialidad Paseo Tollocan; a diferencia de la isla de calor, en la zona del aeropuerto, esta presenta intensidades por arriba de los 24°C, así como áreas a lo largo de la carretera Toluca-Tenango. El entorno rural muestra valores negativos, a excepción de las zonas donde se encuentran fraccionamientos habitacionales, en la que existen intensidades entre 26°C.

#### 4.2.4. Temperatura de la superficie en invierno (29 de enero)

Finalmente, en la época invernal para la temperatura superficial, el comportamiento es casi similar a las demás estaciones, las mayores intensidades se ubican en los alrededores de la ciudad alcanzando de los 27 a 34°C, cabe mencionar que a comparación de otra estación, invierno genero un comportamiento distinto con temperaturas altas de hasta 38°C (solo en ciertas áreas) y las temperaturas más bajas de hasta 1°C. Dentro de la zona urbana se genera valores negativos entre el área conformada por las estaciones Oxtotitlán, Centro y Ceboruco y sobre la vialidad de Paseo Matlazincas; las zonas correspondientes a San Cristóbal, Metepec y San Mateo Atenco, se produce una isla de calor de 21 a 29°C. Se identifican algunos espacios dentro del área urbana con intensidades de 30°C y mayores a 34°C, entre las que más destacan están el aeropuerto y sus alrededores y la zona industrial a lo largo de Paseo Tollocan (Figura 17).

Figura 17. Temperatura de la superficie en invierno 2022 (29 de enero)



*Fuente: Elaboración propia.*

Cabe recordar que a pesar de que invierno es una de las estaciones más frías, el análisis se realizó de la temperatura superficial y no de la temperatura ambiente, por ello se obtuvieron temperaturas muy distintas a las demás estaciones del año. Se puede visualizar en la figura 15 específicamente en el Nevado de Toluca, que se presentan temperaturas altas, esto posiblemente se deba a que en dicha zona se presentan muchas rocas y estas tienden a tener mucha reflectividad.

Por otra parte, algo que pudo haber ocasionado estas altas temperaturas son los edificios altos, estos provocan también que la radiación solar permanezca en el suelo (efecto cañón). La sustitución de superficies naturales por otras de tipo impermeable o a prueba de agua se traduce en una menor agua disponible para la evaporación. Asimismo, las grandes zonas verdes (parques, jardines o espacios naturales alrededor de las ciudades) o zonas azules (ríos o lagos) intervienen en procesos



naturales de termorregulación. Por tanto, la falta de estos elementos o las malas condiciones de estos hace que el efecto isla de calor se agrave.

La presencia de edificios altos y calles estrechas reduce el flujo de viento, calienta el aire en los edificios y aumenta el efecto de las altas temperaturas. La presencia de edificios altos cercanos puede contribuir a la propagación de la radiación, especialmente debido a los materiales de construcción. Los edificios urbanos suelen utilizar materiales oscuros como asfalto y cemento, que pueden absorber y almacenar más energía. Los pavimentos y otras superficies no permeables o reflectantes absorben el calor durante el día y lo liberan lentamente durante la noche, preservando el aire caliente en las ciudades.

En cualquier caso, no se trata en absoluto de un fenómeno uniforme, ya que a menudo hay zonas en las que puede ocurrir con especial frecuencia, como los centros urbanos, los centros industriales o las centrales eléctricas.

### **4.3. Identificación de islas de calor urbanas superficiales**

Dentro de los límites de los asentamientos urbanos, las condiciones naturales difieren significativamente de las condiciones del área circundante, allí se forma un microclima especial: el clima de la capa de aire superficial de secciones individuales del territorio urbano. En estas zonas, la superficie de espacios verdes se reduce debido al aumento de las áreas cubiertas con asfalto y otros revestimientos y estructuras. Esto conduce a una disminución de la evaporación y un aumento de las temperaturas en los centros de las ciudades.

Actualmente no hay consenso sobre cuándo ocurren las islas de calor y cuándo alcanzan su máxima intensidad, ya que las islas de calor se forman y cambian en el tiempo y el espacio dependiendo de características específicas del entorno físico y social, como la ubicación geográfica, las características urbanas y las condiciones meteorológicas. Además, las estaciones del año tienen un peso importante en los

valores de intensidad obtenidos, ya que factores como la radiación, la cobertura del suelo y las condiciones atmosféricas aportan variaciones importantes (Rivera, 2016).

#### 4.3.1. Islas de calor urbanas superficiales en primavera (26 de marzo)

Las islas de calor urbanas superficiales en primavera, al igual que en otras estaciones, son el resultado de una combinación de factores relacionados con la urbanización y las características propias de las ciudades. Estos factores incluyen la densidad de construcción, la utilización de materiales que retienen calor, la falta de vegetación, y las emisiones de calor antropogénicas, entre otros. A continuación, se detallan las causas principales que contribuyen a la formación de islas de calor urbanas superficiales en primavera.

En primavera, el efecto de isla de calor urbana puede ser particularmente notable debido al incremento de las temperaturas y la actividad solar, junto con el uso intensivo de sistemas de calefacción o aire acondicionado que aún se mantiene desde el invierno o se anticipa al verano, respectivamente. Además, la primavera es una época de transición en la que la vegetación urbana aún puede estar recuperándose del invierno, lo que reduce temporalmente su capacidad para mitigar el calor.

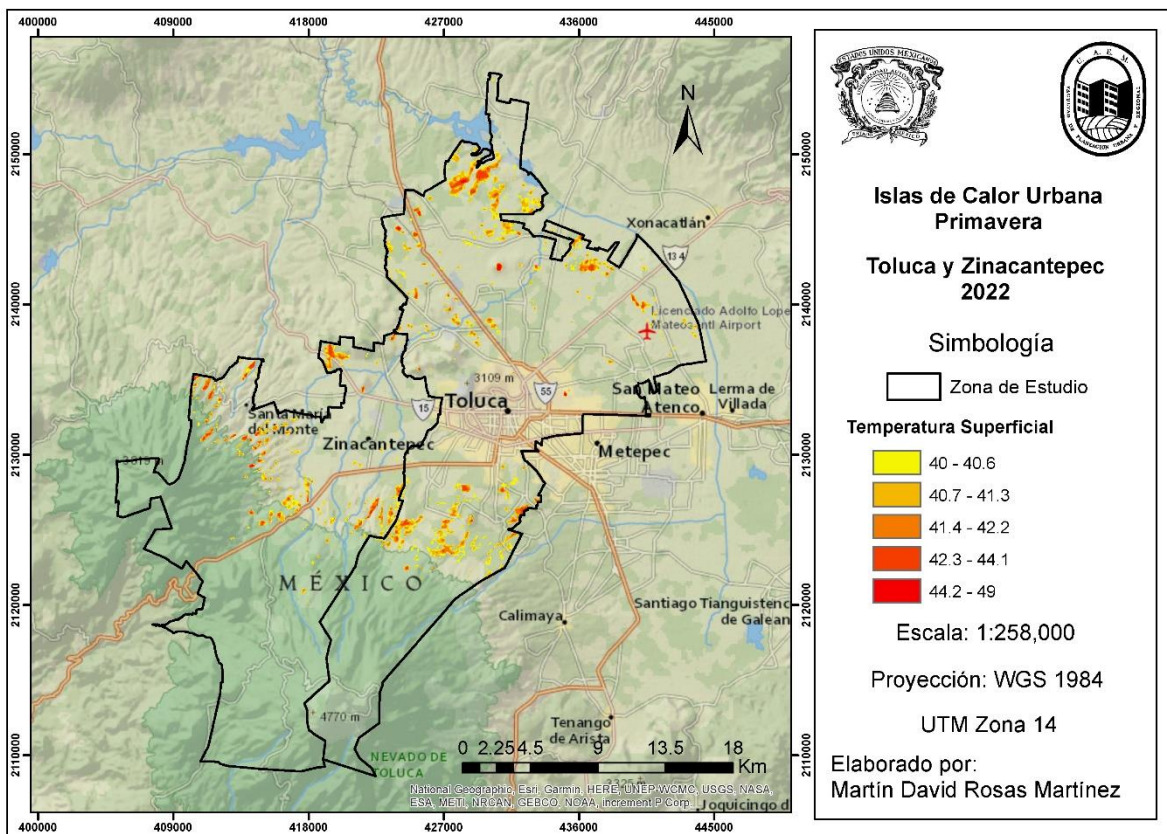
Estas islas son un fenómeno climático caracterizado por temperaturas más altas en áreas urbanas en comparación con sus alrededores rurales. Este efecto se intensifica en primavera, una estación de transición que experimenta un aumento gradual de las temperaturas. La primavera es particularmente relevante para el estudio de las ICUS debido a varios factores que contribuyen a su formación y efectos durante esta estación.

En los municipios de Zinacantepec y Toluca las islas de calor se producen con diferentes tamaños e intensidades y cambian de acuerdo con la época del año y al tipo de temperatura analizada. En la figura 18 se muestra que el comportamiento de la intensidad de isla de calor en primavera se determinó moderado, debido a la

extensión y la ubicación de la isla, aunque existen intensidades superiores, estas se distribuyen de forma dispersa como micro islas.

Estas islas de calor que se producen durante las estaciones de primavera ocurren porque corresponden a la época seca del lugar por lo que los factores que pueden condicionar su aparición pudieran ser los bajos niveles de humedad del suelo y la escasa vegetación, aunado a los materiales de construcción. Debido a que la zona urbana presenta pocos edificios altos, se descarta la sombra como posible causa.

Figura 18. Islas de calor superficiales en primavera (26 de marzo)



*Fuente: Elaboración propia.*

En el mapa, los puntos de color rojo indican las áreas con las temperaturas máximas más elevadas, que van desde los 44 a 49 grados Celsius. Estas zonas rojas son las islas de calor más intensas dentro del área de estudio. A medida que los colores en el

mapa cambian de rojo a naranja y luego a un naranja más claro, la intensidad del calor disminuye, con rangos de temperatura que van de 42 a 44 grados, de 41 a 42 grados y de 40 a 41 grados, respectivamente. Las áreas que no están coloreadas o que son de color blanco representan temperaturas inferiores a 40 grados.

Las islas de calor que se presentan en el noroeste del municipio de Toluca se localizan en el Parque Industrial San Cayetano (Carr. Toluca-Atlacomulco Km. 16) y en la empresa farmacéutica Genomma Lab, con temperaturas que varían de los 41 a 43 grados, donde comúnmente hay infraestructura urbana. Los materiales comúnmente utilizados en la construcción urbana, como el hormigón, el asfalto y el ladrillo, tienen una alta capacidad para absorber y retener el calor solar durante el día y liberarlo lentamente durante la noche. Esto provoca que las áreas urbanas mantengan temperaturas más elevadas en comparación con las zonas rurales circundantes.

La ICUS también ubicada al noroeste del municipio de Toluca se encuentra localizada en Puerta México, un grupo proveedor de servicios aduanales y de logística relacionados con el Comercio Internacional, en donde dicha zona presenta temperaturas que varían de los 42 a 45 grados. Esta zona presenta bajos valores de albedo, si bien, las superficies con alto albedo reflejan más radiación solar, contribuyendo a temperaturas superficiales más bajas, mientras que las superficies con bajo albedo absorben más radiación, aumentando las temperaturas superficiales.

Mientras tanto en la parte oeste, se localizan ICUS en el Fraccionamiento Paseos San Martín, estas islas se deben a varios factores relacionados principalmente con el desarrollo urbano y las características de las construcciones y el entorno. La expansión urbana sin una planificación adecuada conlleva a la sustitución de áreas verdes y superficies naturales por construcciones y pavimentos. Esto resulta en una menor evaporación y transpiración, procesos que naturalmente ayudan a enfriar el ambiente. Asimismo, la reducción de áreas verdes en los fraccionamientos urbanos

disminuye la sombra y la evaporación de agua, dos factores clave para la regulación térmica. Los árboles y plantas no solo proporcionan sombra, sino que también a través de la transpiración, liberan vapor de agua al aire, contribuyendo a enfriar el ambiente.

En el sur del municipio, las islas están localizadas principalmente en localidades como El Refugio, Santiago Tlacotepec y San Felipe Tlalmimilolpan con temperaturas que varían de los 40 a 42 grados, y esto debido a los cambios de uso de suelo y al gran desarrollo urbano que se está implementando en dichas zonas.

Por otra parte, en el Municipio de Zinacantepec, se encuentran intensidades altas de ICUS y estas se ubican en el noroeste y este, en localidades como Santa María del Monte, El Cópore y San Juan de las Huertas con temperaturas que varían de los 42°C a 49°C. Cabe mencionar que en estas zonas además de toda la estructura urbana que se encuentra, hay muchos cultivos, si bien, el fenómeno de las islas de calor, comúnmente asociado con áreas urbanas, también puede tener implicaciones significativas en el ámbito agrícola, aunque la información específica sobre su impacto directo en cultivos es menos prevalente.

Las islas de calor superficiales en los cultivos pueden ser causadas por varios factores, que incluyen la transformación del uso del suelo, la falta de vegetación, y las propiedades térmicas de los materiales utilizados en la agricultura. A continuación, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y otros (2016), detallan algunos de los factores que contribuyen a la formación de islas de calor en áreas de cultivo:

1. Cambio en los patrones de uso del suelo: La transformación de ecosistemas naturales en tierras de cultivo puede alterar los patrones de reflectividad y absorción de la superficie terrestre. Por ejemplo, la deforestación y la conversión de terrenos forestales en áreas agrícolas pueden reducir la

cobertura vegetal y aumentar la exposición del suelo, lo que a su vez incrementa la absorción de calor.

2. Propiedades térmicas de los materiales: Los materiales utilizados en la agricultura, como plásticos para invernaderos o coberturas de suelo, pueden tener propiedades térmicas que retienen más calor en comparación con la vegetación natural o suelos no modificados.
3. Reducción de la evapotranspiración: La vegetación natural juega un papel importante en el enfriamiento del ambiente a través de la evapotranspiración. En áreas de cultivo, especialmente aquellas con riego insuficiente o cultivos que no proporcionan una cobertura completa del suelo, la capacidad de enfriamiento por evapotranspiración puede ser menor, lo que resulta en temperaturas superficiales más altas.
4. Irrigación y gestión del agua: Las prácticas de irrigación pueden influir en la temperatura superficial de los cultivos. Por ejemplo, el riego excesivo puede aumentar la humedad del suelo y reducir la temperatura superficial, mientras que la falta de agua puede conducir a un aumento de la temperatura.
5. Ausencia de sombra: Los cultivos, especialmente aquellos de baja estatura, pueden no proporcionar suficiente sombra para el suelo, lo que permite que la radiación solar incida directamente y aumente la temperatura superficial.
6. Efectos de la urbanización circundante: Las áreas de cultivo ubicadas cerca de zonas urbanas pueden verse afectadas por el calor adicional generado por las ciudades, conocido como el efecto de isla de calor urbana, que puede extenderse a las zonas rurales circundantes.

Es importante destacar que las islas de calor no solo se limitan a las zonas urbanas, sino que también pueden ocurrir en áreas rurales y de cultivo debido a los factores mencionados. Además, las islas de calor en zonas de cultivo pueden tener impactos negativos en la productividad agrícola y en el confort térmico de las áreas circundantes.

#### 4.3.2. Islas de calor urbanas superficiales en verano (30 de junio)

El mapa que se muestra en la figura 19 representa la distribución de la temperatura superficial en las áreas de Toluca y Zinacantepec durante el verano de 2022. Este tipo de mapa es una herramienta útil para visualizar el fenómeno de las islas de calor urbanas superficiales, que se caracteriza por temperaturas más altas en áreas urbanizadas en comparación con las zonas rurales o menos desarrolladas circundantes.

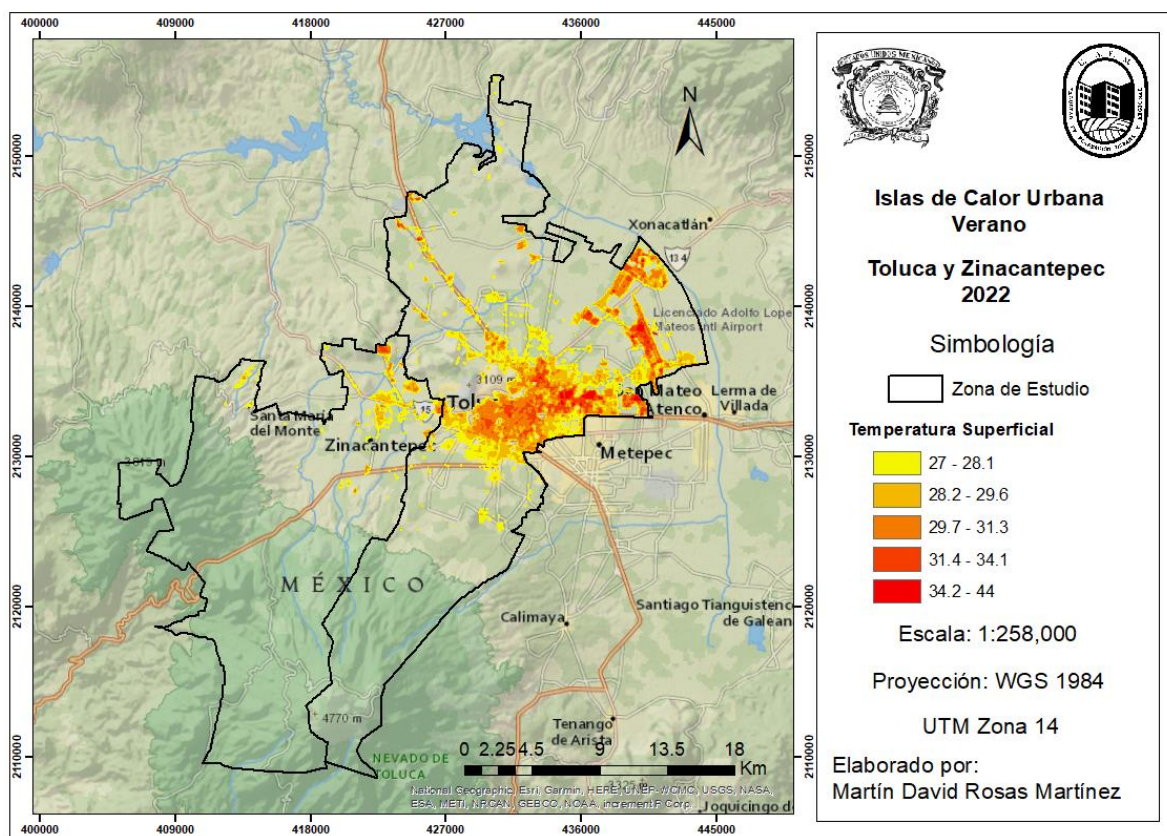
La leyenda del mapa indica las diferentes gamas de temperatura máxima, que van desde menos de 27°C hasta entre 31°C y 44°C. Los colores más claros representan temperaturas más bajas, mientras que los colores más oscuros y hacia el rojo indican temperaturas más altas. Las áreas con temperaturas más altas, marcadas en tonos de rojo, probablemente corresponden a zonas urbanas con alta densidad de construcciones y poca vegetación, lo que contribuye al efecto de isla de calor. Por otro lado, las áreas más frescas, mostradas en tonos más claros, podrían ser zonas con mayor cobertura vegetal o menor desarrollo urbano.

Para verano se presentan islas con la máxima intensidad (muy fuerte), aunque existen micro islas con intensidad de débil a fuerte, como lo es en la zona del aeropuerto del municipio de Toluca y sus causas se atribuyen a factores como la lenta absorción de calor por los materiales de la ciudad, la sombra generada por edificios de media altura que se encuentran alrededor, los niveles de humedad del suelo urbano respecto al rural y la escasa vegetación.

Las islas de calor que se producen en verano alcanzan una intensidad fuerte. El patrón en esta estación, se explica de acuerdo con lo reportado por Jáuregui et al. (1973), el cual muestra que las islas de calor en ciudades tropicales se conforma con mayor intensidad en el periodo húmedo que en el seco, específicamente, las islas diurnas llegan a alcanzar su máximo desarrollo en el hemisferio norte en julio (tal como ocurre con los municipios de estudio), ayudadas por el ángulo de posición

solar, ya que favorece el enfriamiento por evaporación de zonas rurales con vegetación, es decir, durante un día soleado en época lluviosa gran parte del calor se gasta en el proceso de evaporación del suelo, mientras que la zona urbana se seca con mayor rapidez permitiendo que la radiación caliente su superficie (Jáuregui, 1997).

Figura 19. Islas de calor superficiales en verano (30 de junio)



*Fuente: Elaboración propia.*

La distribución espacial de las islas de calor es que se concentran principalmente en el centro de Toluca y Zinacantepec, coincidiendo con las áreas de mayor densidad de población y edificación. Zonas como el centro histórico de Toluca, la zona industrial y áreas residenciales densamente pobladas muestran las temperaturas más altas, superando los 34.2°C.



Se observa un gradiente de temperatura decreciente desde el centro urbano hacia las zonas periféricas. Las áreas rurales y menos desarrolladas, como las zonas agrícolas y forestales al oeste y sur de la ciudad, presentan temperaturas más bajas, entre 27°C y 29.6°C.

En el municipio de Toluca las ICUS se localizan principalmente al noreste, en el Parque Industrial Toluca 2000, San Blas Oztacatipan y en el Aeropuerto Internacional de Toluca, con temperaturas superficiales altas que varían de los 31°C a 44°C. Este efecto se debe principalmente a la modificación del paisaje natural por la urbanización, que incluye la construcción de edificios, calles y otras infraestructuras que absorben y retienen el calor. Además, la actividad humana, como el tráfico y la industria, contribuye al aumento de la temperatura en estas áreas.

Estas áreas tienen principalmente superficies urbanas, como el asfalto y el hormigón, que tienen una alta capacidad de almacenar calor y una baja reflectividad, lo que significa que absorben una gran cantidad de radiación solar durante el día y la liberan lentamente durante la noche. Como se ha mencionado anteriormente, esto lleva a temperaturas más altas en comparación con las zonas rurales, donde la vegetación y las superficies naturales tienen un efecto de enfriamiento debido a la sombra y la evapotranspiración.

Dichas áreas también se caracterizan por edificios de gran altura que tienen una gran superficie para reflejar y absorber la radiación solar, lo que conduce a un mayor calentamiento de las áreas adyacentes; también bloquean los vientos y, en consecuencia, reducen la intensidad del enfriamiento convectivo. Este fenómeno se llama efecto cañón urbano.

El análisis de la figura 19 mostró que los techos de los edificios del Parque Industrial Toluca 2000 y garajes están cubiertos con tela asfáltica, que tiene un coeficiente de absorción de radiación solar de 0.9, lo que provoca anomalías de

temperatura en las imágenes. El Aeropuerto Internacional de Toluca cuenta con la pista más larga del país, con 4.2 km de longitud y 45 metros de ancho, por lo que el aumento de la temperatura de la superficie se debe probablemente al material del tejado y todo el material construido de concreto o asfalto de la pista.

Al este del municipio las ICUS están identificadas principalmente en zonas como Galerías Toluca, Robert Bosch Toluca y General Motors Toluca, con temperaturas superficiales que varían de los 38 a 44 grados, en dichas zonas los centros comerciales, casas y fabricas suelen ser propensos a las islas de calor debido a la concentración de edificios, el asfalto y el concreto utilizados en la construcción, así como la falta de áreas verdes. Estas condiciones pueden llevar a una mayor retención de calor y una menor evaporación de la humedad, lo que contribuye a un aumento de las temperaturas en comparación con las áreas circundantes.

Por otro lado, en el municipio de Zinacantepec hay ICUS que se están intensificando y colindan con el Municipio de Toluca, y estas se encuentran al noreste de Zinacantepec, en localidades como Rancho San Jorge (San Mateo Oxtotitlán) y Ojuelos (San Luis Mextepec), con temperaturas que varían de los 27 a 30 grados.

Cabe mencionar, que al oeste del municipio de Zinacantepec se localiza una ICUS con temperaturas altas que varían desde los 29 a 40 grados, dicha zona es boscosa y esto puede surgir debido a varios factores, principalmente relacionados con la actividad humana y los cambios en el uso del suelo. Aunque el término "islas de calor" se asocia más comúnmente con áreas urbanas, donde las superficies construidas y la falta de vegetación aumentan las temperaturas locales, en los contextos de bosques, este fenómeno puede ocurrir por razones similares, pero en un marco diferente. Un factor contribuyente puede ser la alteración de los ecosistemas locales y los cambios en la composición de la vegetación. Por ejemplo, la sustitución de bosques nativos por plantaciones de especies no nativas o monocultivos puede

afectar el balance de energía local y las propiedades de reflexión del suelo (albedo), lo que podría conducir a un aumento de las temperaturas en esas áreas.

Mientras que, al suroeste y sur del municipio, se encuentran ICUS ubicadas en La Peñuela, Parque Ecoturístico La Ciénega, Raíces y Parque de los Venados, con temperaturas superficiales que varían de los 27 a 30 grados. Esto se debe principalmente a que en dichas zonas se han presentado cambios de uso de suelo, como la urbanización, la deforestación y la agricultura, estos pueden influir significativamente en la formación y la intensificación de las ICUS. Por ejemplo, la urbanización reemplaza la cobertura natural del suelo con pavimento y edificios, lo que aumenta la temperatura por la absorción y emisión de calor de estas superficies.

#### 4.3.3. Islas de calor urbanas superficiales en otoño (12 de octubre)

Al analizar el mapa de la dinámica de las islas de calor en la estación de otoño (Figura 20) de 2022 se puede observar que las islas de calor tienen una intensidad débil, en el caso del Municipio de Zinacantepec se encuentran islas muy pequeñas de baja intensidad que se ubican principalmente en el sureste del municipio, con temperaturas superficiales de 25 a 27 grados.

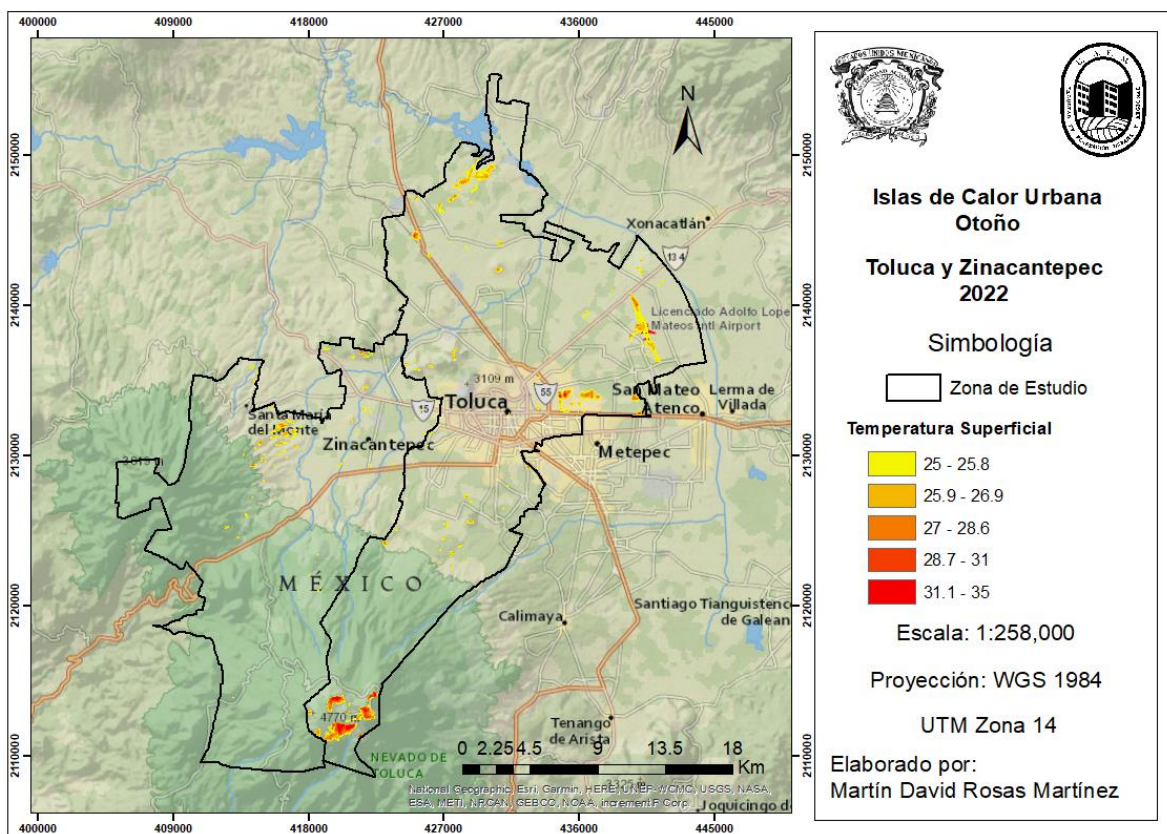
Al noroeste se localizan varias ICUS y entre ellas se encuentran localidades que presentan cambios de uso de suelo, como el Barrio de la Rosa, El Curtidor, El Cópore y la Universidad Tecnológica de Zinacantepec, también vale la pena señalar que las anomalías térmicas también se localizan en algunas zonas agrícolas al noroeste de Zinacantepec con temperaturas que varían de los 25 a 35 grados y esto debido al fuerte calentamiento de las tierras cultivables y a los cambios de uso de suelo.

Mientras que, en el municipio de Toluca, las islas de calor con mayor intensidad se ubican en el noroeste y noreste, con temperaturas que varían de los 23 a 25 grados, estas ICUS están principalmente ubicadas en zonas con escasa vegetación. El centro

de la ciudad de Toluca por ejemplo es más susceptible a la contaminación térmica debido a los edificios densos y la alta transferencia de calor de los edificios, ya que, debido a su ubicación geográfica, las características climáticas y el pequeño número de áreas verdes, la ciudad recibe una gran cantidad de calor diariamente y no existe el suficiente tiempo para reflejarlo.

En el sur del municipio se localizaron ICUS que se ubican en el Parque Ecológico Ejidal de Cacalomacán y Mirador Don VikoRanger con bajas temperaturas superficiales que varían de los 23 a 24 grados.

Figura 20. Islas de calor superficiales en otoño (12 de octubre)



*Fuente: Elaboración propia.*

Cabe señalar que, durante el otoño, las temperaturas de las ICUS pueden ser más bajas por varias razones (Oke, 1982):

1. Reducción de la radiación solar: En otoño, la inclinación del eje terrestre con respecto al sol cambia, lo que resulta en días más cortos y una disminución de la radiación solar incidente. Esto lleva a una reducción general de las temperaturas, incluyendo las áreas urbanas.
2. Cambios en la vegetación: Durante el otoño, la vegetación puede experimentar cambios fenológicos como la caída de hojas, lo que puede alterar la capacidad de las plantas para absorber energía solar y realizar evapotranspiración, un proceso que ayuda a enfriar el aire circundante.
3. Variaciones estacionales: Las temperaturas más bajas en otoño son parte de las variaciones estacionales. A medida que el clima se enfría, las diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y rurales pueden disminuir, especialmente durante la noche cuando la liberación de calor almacenado en materiales urbanos es menos intensa.
4. Cambios en la dinámica atmosférica: En otoño, pueden ocurrir cambios en los patrones de viento y en la cobertura de nubes, lo que puede influir en la distribución de la temperatura. Por ejemplo, los vientos pueden traer masas de aire más frío y las nubes pueden reducir la radiación solar que llega al suelo.
5. Influencia de las masas de aire: Durante el otoño, las masas de aire frío provenientes de latitudes más altas pueden ser más frecuentes, lo que puede llevar a una disminución de las temperaturas en las áreas urbanas.
6. Efectos de la urbanización: Aunque la urbanización generalmente conduce a un aumento de las temperaturas, las características específicas de una ciudad, como la presencia de áreas verdes y cuerpos de agua, pueden mitigar el efecto de isla de calor y resultar en temperaturas más bajas en ciertas áreas durante el otoño.

En resumen, las bajas temperaturas de las islas de calor superficiales en otoño pueden ser el resultado de una combinación de factores estacionales, cambios en la

vegetación, variaciones en la dinámica atmosférica y la influencia de masas de aire frío, así como las características específicas de urbanización en cada ciudad.

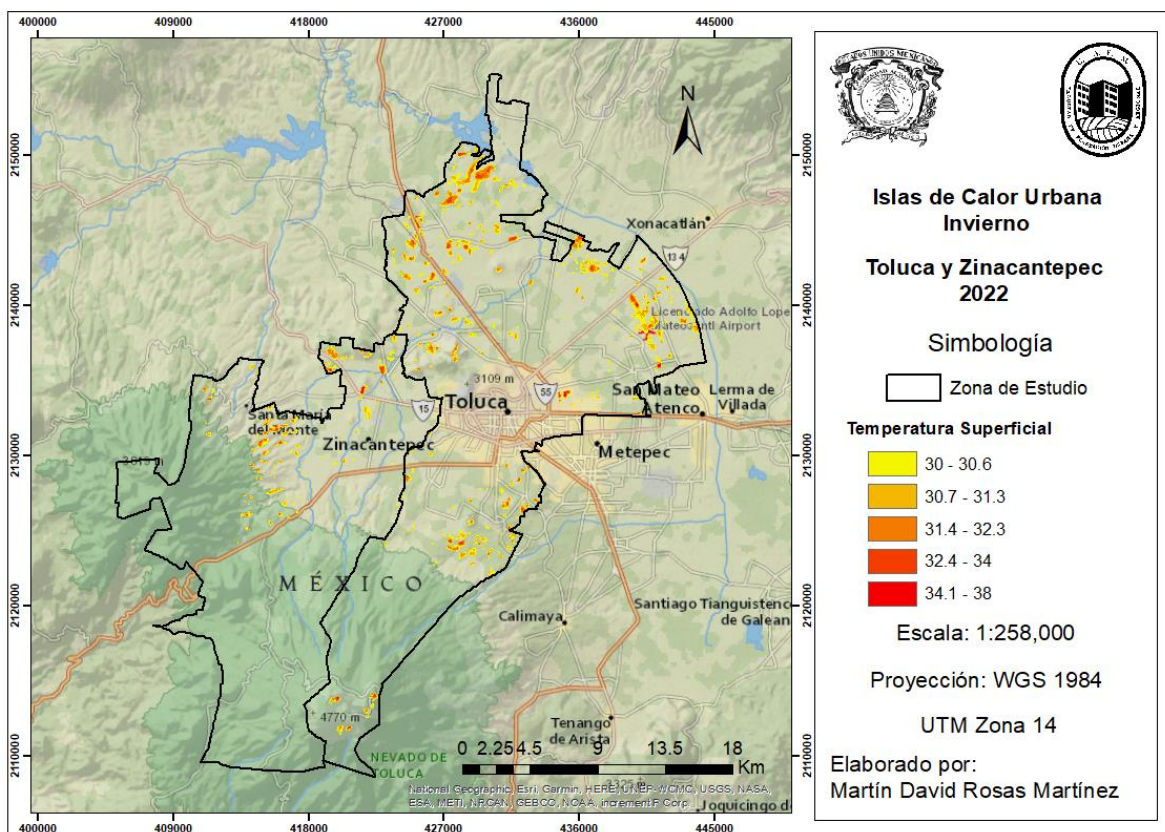
#### 4.3.4. Islas de calor urbanas superficiales en invierno (29 de enero)

Las islas de calor superficiales en invierno se deben a varios factores relacionados con las características urbanas y las actividades humanas.

En la figura 21 se puede observar que durante la estación de invierno el comportamiento de las islas de calor presentó intensidades muy fuertes, principalmente en el aeropuerto internacional de Toluca, zonas industriales (Parque Industrial San Cayetano, Planta Tía Rosa), carreteras principales y conjuntos urbanos que se encuentran en el municipio, con temperaturas superficiales que varían de los 30 a 38 grados. Sus principales causas son por la disipación de la energía térmica generada para el suministro de calor y los procesos de producción al espacio urbano, cabe mencionar que la intensidad de estas islas de calor durante invierno está fuertemente correlacionada con la densidad de habitantes, principalmente porque la actividad humana consume energía, que luego se libera en forma de calor. De igual manera las superficies oscuras almacenan energía debido a su bajo albedo, lo que eleva la temperatura de los edificios y carreteras y así produciendo intensidades altas en las islas de calor.

Por otra parte, en el municipio de Zinacantepec el rango de temperatura del día en invierno, entre la zona urbana y la periferia, oscila entre los 28°C y los 36°C, es decir, hay una diferencia térmica de 8°C. También se puede observar en la figura 21 que al noreste del municipio se está formando una isla de calor, con temperaturas de 32°C, en dicha zona se encuentran varios conjuntos urbanos, que hasta la actualidad se siguen extendiendo, como lo son Sándara Residencial, Conjunto Urbano Privadas de la Hacienda y El Porvenir, dichos conjuntos se encuentran construidos con materiales como el asfalto y el concreto con lo cual retienen más calor y este calor se libera lentamente durante la noche.

Figura 21. Islas de calor superficiales en invierno (29 de enero)



*Fuente: Elaboración propia.*

Este fenómeno puede ocurrir tanto en verano como en invierno y se debe a varios factores que contribuyen a la retención y generación de calor en el entorno urbano. La configuración urbana también juega un papel crucial. Las altas densidades de edificios en las ciudades pueden bloquear el flujo de aire y reducir la ventilación natural, lo que contribuye a mantener el calor atrapado en las áreas urbanas. Además, las superficies verticales de los edificios pueden absorber la radiación solar durante el día y reemitirla durante la noche, aumentando las temperaturas.

En invierno, Oke (1982) menciona que las temperaturas altas de las islas de calor superficiales pueden ser causadas por:

1. **Materiales de construcción:** Los materiales utilizados en las ciudades, como el hormigón y el asfalto, tienen una alta capacidad para absorber y retener el calor durante el día y liberarlo lentamente durante la noche.
2. **Densidad de edificaciones:** La densidad urbana y la geometría de las ciudades, con edificios altos y calles estrechas, pueden atrapar el calor y reducir la circulación del aire, lo que mantiene las temperaturas más altas.
3. **Actividades humanas:** La generación de calor a través de actividades humanas, como el tráfico, la calefacción de edificios y la industria, contribuye al aumento de la temperatura en las áreas urbanas.
4. **Efectos de la radiación solar:** Durante el día, la radiación solar es absorbida por las superficies urbanas y luego se irradia como calor, lo que puede mantener las temperaturas más altas incluso después de la puesta del sol.
5. **Topografía y condiciones climáticas:** La ubicación geográfica de una ciudad y sus condiciones climáticas específicas también pueden influir en la intensidad del fenómeno de isla de calor.

Es importante destacar que la intensidad de las islas de calor puede variar según la estación y las condiciones climáticas específicas. Algunos estudios sugieren que las islas de calor pueden ser más intensas en verano, mientras que otros indican que pueden ser igualmente significativas en invierno (Dávila y otros, 2011). Además, la variabilidad en la intensidad de las islas de calor también puede estar relacionada con la estructura urbana y la presencia de factores como la vegetación y las superficies de agua.

En resumen, las islas de calor superficiales en invierno se deben a la combinación de la retención de calor por materiales de construcción, la falta de vegetación, la generación de calor por actividades humanas y la configuración urbana que limita la ventilación natural. Estos factores hacen que las áreas urbanas sean más cálidas que sus alrededores rurales, incluso durante los meses de invierno.



#### **4.4. Conclusión parcial**

La variabilidad de la temperatura superficial a lo largo de las estaciones del año y durante el ciclo diurno es un fenómeno complejo que se ve influenciado por múltiples factores, entre los que destacan la inclinación solar, los procesos térmicos en superficies y la influencia de la atmósfera.

La inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto a su órbita alrededor del Sol es la principal responsable de las estaciones del año. Esta inclinación, que es de aproximadamente 23.5 grados, provoca que la cantidad de radiación solar que recibe cada hemisferio varíe a lo largo del año. Durante el verano, el hemisferio inclinado hacia el Sol recibe una mayor cantidad de radiación solar directa, lo que resulta en temperaturas más altas. En contraste, durante el invierno, el mismo hemisferio se inclina alejándose del Sol, recibiendo radiación solar más oblicua y menos intensa, lo que conduce a temperaturas más bajas (Universitat de Barcelona, s.f), cabe señalar que, dependiendo de la ubicación geográfica de la ciudad, puede influir la intensidad de las temperaturas incluso en invierno.

Los procesos térmicos en superficies también juegan un papel crucial en la variabilidad de la temperatura. Diferentes tipos de superficie, como el agua, el suelo, y las áreas urbanas, absorben y liberan calor de manera distinta. Por ejemplo, el agua tiene una alta capacidad térmica, lo que significa que puede absorber grandes cantidades de calor sin experimentar un aumento significativo en la temperatura. Esto explica por qué las áreas costeras suelen tener climas más moderados en comparación con las regiones interiores.

Por otro lado, las superficies urbanas, con su abundancia de asfalto y concreto, tienden a absorber y retener más calor, fenómeno conocido como isla de calor urbano, lo que resulta en temperaturas más altas en comparación con las áreas rurales circundantes.

En primavera, las ICUS son notables debido al incremento de las temperaturas y la actividad solar, junto con el uso intensivo de sistemas de calefacción o aire acondicionado. La vegetación urbana aún puede estar recuperándose del invierno, lo que reduce su capacidad para mitigar el calor. Se observa que, en Zinacantepec y Toluca, las islas de calor varían en tamaño e intensidad según la época del año y el tipo de temperatura analizada. Los factores que pueden condicionar su aparición incluyen los bajos niveles de humedad del suelo y la escasa vegetación.

En verano, las islas de calor alcanzan una intensidad fuerte, ayudadas por el ángulo de la posición solar que favorece el enfriamiento por evaporación en zonas rurales con vegetación. Las áreas urbanas se secan más rápidamente, permitiendo que la radiación caliente su superficie. En verano, las ICUS alcanzan una intensidad fuerte, con áreas como el Parque Industrial Toluca 2000 y el Aeropuerto Internacional de Toluca mostrando temperaturas superficiales altas que varían de 31 a 44 grados. La urbanización y la actividad humana son factores clave en el aumento de la temperatura en estas áreas.

En otoño, las islas de calor tienen una intensidad débil en Zinacantepec, ubicándose principalmente en el sureste del municipio con temperaturas superficiales de 23°C a 27°C grados. Los factores que pueden influir en la reducción de las temperaturas de las ICUS durante el otoño incluyen la reducción de la radiación solar, cambios en la vegetación, variaciones estacionales, cambios en la dinámica atmosférica y la influencia de masas de aire frío.

En invierno, las islas de calor superficiales se deben a la disipación de la energía térmica generada para el suministro de calor y los procesos de producción al espacio urbano. La intensidad de estas islas de calor durante el invierno está fuertemente correlacionada con la densidad de habitantes, principalmente porque la actividad humana consume energía, que luego se libera en forma de calor y por los procesos de producción al espacio urbano.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### *Comparación con otros estudios sobre Islas de Calor Urbanas en México*

Para contextualizar los resultados obtenidos en este estudio sobre las Islas de Calor Urbanas Superficiales (ICUS) en Toluca y Zinacantepec, es importante compararlos con investigaciones previas en contextos locales similares. En estudios realizados en otras ciudades de México, como la Ciudad de México (Jáuregui, 1973) y Guadalajara (Parada, 2015), se han identificado patrones similares en cuanto a la influencia de la urbanización en la creación de islas de calor. Estos estudios también destacan la relación entre el uso de suelo, la densidad de población y la intensidad del fenómeno.

En comparación con el estudio de Jáuregui (1973) sobre la Ciudad de México, se puede observar que la intensidad de las ICUS en Toluca y Zinacantepec es menor, probablemente debido a diferencias en la densidad poblacional y la estructura urbana. Sin embargo, ambos estudios coinciden en que las áreas con una alta concentración de superficies impermeables, como el asfalto y el concreto, presentan temperaturas significativamente más altas que las zonas rurales circundantes. Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde se identificaron las áreas del centro de Toluca como las más afectadas por las ICUS.

Por otro lado, Parada (2015) encontró que las ICUS en Guadalajara son más intensas durante los meses de verano, lo cual coincide con los resultados observados en Toluca y Zinacantepec. La variación estacional también fue un factor determinante en ambos estudios, lo que subraya la importancia de considerar la temporalidad al analizar este fenómeno.

### *Ventajas y limitaciones de la metodología empleada*

La metodología empleada en este estudio, basada en el uso de imágenes satelitales de alta resolución (Landsat) y técnicas de percepción remota, tiene varias ventajas sobre los métodos tradicionales. Una de las principales ventajas es la capacidad de obtener datos a gran escala, lo que permite analizar la distribución espacial de las ICUS de manera más detallada y precisa. Esto es especialmente útil para identificar áreas críticas dentro de las zonas urbanas que requieren atención en términos de planificación urbana y mitigación del fenómeno.

Sin embargo, también existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, las imágenes satelitales están sujetas a las condiciones atmosféricas del momento en que se capturan. Como se mencionó anteriormente, factores como la nubosidad o las bajas temperaturas pueden sesgar los resultados al disminuir la intensidad de las ICUS detectadas. Además, la resolución temporal de las imágenes satelitales es limitada, ya que no se capturan diariamente, lo que impide un monitoreo continuo del fenómeno.

En comparación con otros estudios que emplearon sensores a nivel de superficie, como estaciones meteorológicas fijas o transectos móviles, el uso de imágenes satelitales tiene la desventaja de no capturar las variaciones diurnas de las ICUS, que son más pronunciadas en las noches debido a la menor disipación de calor en áreas urbanas densas. Por ejemplo, Jáuregui (1973) utilizó estaciones meteorológicas para medir las Islas de Calor Atmosféricas (ICUA) en la Ciudad de México, y encontró que la intensidad de las ICUA es mayor durante la noche. En este sentido, una combinación de técnicas de percepción remota y mediciones in situ podría proporcionar un análisis más completo del fenómeno.

#### *Conclusiones sobre las comparaciones*

A pesar de las limitaciones mencionadas, los resultados de este estudio coinciden en gran medida con los hallazgos de investigaciones previas en cuanto a la identificación de los principales factores que contribuyen a las ICUS, como la

urbanización, el uso de suelo y la densidad de población. No obstante, la metodología basada en imágenes satelitales proporciona una ventaja significativa en la identificación espacial de las ICUS a gran escala, lo que es esencial para el desarrollo de estrategias de mitigación en el contexto urbano. Para mejorar futuros estudios, se recomienda combinar el uso de imágenes satelitales con mediciones in situ que capturen las variaciones diurnas y estacionales con mayor precisión.

Las islas de calor urbanas (ICUS) presentan variaciones importantes a lo largo del año debido a diversos factores, tanto intrínsecos como extrínsecos. En el caso particular del centro de Toluca, una zona urbanamente densa, se observan fluctuaciones significativas en la intensidad y extensión de las ICUS entre estaciones. Este comportamiento puede atribuirse a una serie de variables ambientales y urbanas que interactúan de manera compleja en la generación y distribución del fenómeno.

Un factor determinante que puede explicar la inconsistencia de las ICUS es la *influencia estacional*. Durante el verano, las altas temperaturas y la mayor radiación solar intensifican las ICUS, mientras que, en invierno, las temperaturas más bajas y la menor insolación tienden a reducir su intensidad. Adicionalmente, la densidad de la vegetación, la cantidad de áreas verdes y la presencia de cuerpos de agua juegan un rol fundamental en la modulación de las temperaturas en diferentes épocas del año, lo que puede generar variaciones en los resultados obtenidos.

Otro aspecto por considerar es el *efecto del clima local y las condiciones atmosféricas en el momento de la captura de las imágenes satelitales*. En este estudio, se emplearon imágenes satelitales obtenidas en diferentes días del año, lo que introduce un posible sesgo en los resultados debido a la variabilidad climática diaria. Factores como la nubosidad, la velocidad del viento y la temperatura ambiente en el día de la toma pueden influir en la exactitud de las mediciones. Por ejemplo, días con *alta nubosidad* pueden reducir la radiación solar directa sobre la

superficie urbana, atenuando temporalmente el efecto de las ICUS. De igual forma, la captura de imágenes en días con *bajas temperaturas* puede mostrar una intensidad menor de las ICUS, dando lugar a un subregistro de la magnitud real del fenómeno en condiciones más típicas de alta radiación solar.

Es probable que las imágenes capturadas en días con condiciones atmosféricas menos ideales, como la nubosidad o temperaturas inusualmente bajas, hayan influido en los resultados obtenidos, creando una percepción de inconsistencia en la intensidad de las ICUS a lo largo del año. Para mitigar este posible sesgo, es importante tener en cuenta que las imágenes utilizadas provienen de diferentes momentos del año, lo que puede llevar a una *variabilidad en los datos* que no siempre refleja de manera precisa las condiciones promedio de cada estación.

En futuras investigaciones, sería recomendable realizar un control más estricto de las condiciones atmosféricas durante la captura de imágenes satelitales, seleccionando fechas representativas de las condiciones climáticas típicas de cada estación. Esto permitiría una mejor comparación estacional y una mayor consistencia en los resultados. Asimismo, realizar mediciones adicionales en días con condiciones atmosféricas similares entre estaciones podría contribuir a reducir la variabilidad y aumentar la precisión en la identificación y análisis de las ICUS.

En conclusión, aunque las ICUS muestran fluctuaciones a lo largo del año, gran parte de esta variabilidad puede estar relacionada con las condiciones atmosféricas del momento en que fueron tomadas las imágenes, lo que podría generar un *sesgo en los datos*. No obstante, este sesgo no invalida los resultados, sino que destaca la importancia de considerar las condiciones ambientales al interpretar la intensidad y distribución de las ICUS.

## CONCLUSIONES

El primer capítulo proporciona una base teórica esencial para comprender las islas de calor urbanas superficiales (ICUS). Estas se definen como áreas urbanas que experimentan temperaturas significativamente más altas en comparación con sus entornos rurales debido a la interacción entre el entorno construido y las condiciones climáticas. Las principales conclusiones de este capítulo son:

1. **Clima Urbano:** El crecimiento y la expansión urbana alteran significativamente el clima local. Las estructuras urbanas como edificios, calles y aceras influyen directamente en la temperatura de la superficie, creando microclimas específicos que difieren notablemente del entorno rural. Este cambio de clima urbano es un resultado directo de la actividad humana y la urbanización.
2. **Causas y Consecuencias del Clima Urbano:** La urbanización y la reducción de áreas verdes son factores clave que contribuyen a las ICUS. La densidad de construcción y el uso de materiales que retienen calor exacerbaban este fenómeno. Las consecuencias incluyen no solo un aumento de las temperaturas locales sino también efectos adversos en la salud pública, el bienestar y el confort térmico de los habitantes urbanos.
3. **Métodos de Detección:** Se destaca la importancia de las técnicas de percepción remota y los modelos computacionales para la identificación y análisis de las ICUS. Las técnicas directas incluyen mediciones in situ de temperatura, mientras que las indirectas se basan en imágenes satelitales que permiten una evaluación detallada de la distribución y la intensidad de las ICUS.

El capítulo 2 presenta una revisión de estudios de caso a nivel internacional, nacional y estatal sobre ICUS, proporcionando un contexto comparativo para el estudio realizado en Toluca y Zinacantepec. Las conclusiones más relevantes son:

1. Estudios Internacionales y Nacionales: Los estudios de caso a nivel internacional demuestran que las ICUS son un fenómeno global que afecta a ciudades de todos los tamaños y climas. Los estudios nacionales refuerzan la idea de que las condiciones locales, como el tipo de material de construcción y la densidad de población, juegan un papel crucial en la formación de ICUS. Estos estudios también resaltan la importancia de considerar la justicia climática, ya que las poblaciones vulnerables son las más afectadas por las ICUS debido a la falta de infraestructura adecuada y espacios verdes.
2. Metodologías Aplicadas: La revisión de diferentes metodologías empleadas en el estudio de las ICUS, desde mediciones directas de temperatura hasta análisis con imágenes satelitales, proporciona una base sólida para la metodología utilizada en este estudio. La adopción de métodos avanzados y tecnologías innovadoras es crucial para una comprensión precisa de la dinámica de las ICUS.

El tercer capítulo describe detalladamente la metodología empleada para identificar y analizar las ICUS en Toluca y Zinacantepec. Las principales conclusiones son:

1. Datos de Percepción Remota: La utilización de imágenes satelitales de alta resolución (Landsat 8) ha demostrado ser eficaz para la detección de ICUS. Estas imágenes permiten evaluar la estructura espacial y temporal de las islas de calor, proporcionando datos precisos y detallados sobre las variaciones de temperatura superficial.
2. Análisis Espacial: El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis espacial ha facilitado una comprensión más profunda de la distribución y la intensidad de las ICUS en las áreas de estudio. Estos enfoques permiten mapear y analizar la relación entre las temperaturas superficiales y las características urbanas específicas.
3. Factores Urbanos Determinantes: La metodología ha confirmado que factores como la densidad de construcción, el tipo de materiales utilizados en las



edificaciones y la presencia de áreas verdes son determinantes en la formación y la intensidad de las ICUS. La planificación urbana debe considerar estos factores para desarrollar estrategias de mitigación efectivas.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y su discusión en relación con la literatura existente. Las conclusiones principales incluyen:

**Presencia Estacional de ICUS:** Las ICUS están presentes en todas las estaciones del año, aunque su intensidad varía. Durante el verano, las ICUS alcanzan su máxima intensidad debido a la combinación de altas temperaturas y materiales urbanos que retienen el calor. Este patrón estacional subraya la necesidad de estrategias de mitigación específicas para diferentes épocas del año.

**Impacto de la Urbanización:** Las áreas densamente construidas y con poca vegetación presentan las temperaturas más altas. Este hallazgo resalta la importancia de integrar más áreas verdes y utilizar materiales de construcción que reflejen más el calor, como techos verdes y pavimentos fríos, para mitigar los efectos de las ICUS.

**Distribución Espacial:** La distribución espacial de las ICUS muestra que las áreas industriales y comerciales tienden a tener las temperaturas más altas, mientras que las áreas residenciales con más vegetación presentan temperaturas más bajas. Este conocimiento puede orientar la planificación urbana para equilibrar el desarrollo económico con la sostenibilidad ambiental.

De acuerdo con los resultados obtenidos, está claro que las islas de calor superficiales en los municipios de Toluca y Zinacantepec están presentes en todas las estaciones del año 2022.

A continuación, se presentan las conclusiones generales extraídas de este estudio y los principales factores que contribuyen a la formación de islas de calor urbanas superficiales por estaciones en dichos municipios:

1. Primavera: Las ICUS en primavera son resultado de factores como la densidad de construcción, el uso de materiales que retienen calor, la falta de vegetación, y las emisiones de calor antropogénicas. La primavera, siendo una época de transición, muestra un notable efecto de isla de calor urbano debido al incremento de temperaturas y la actividad solar, junto con el uso intensivo de sistemas de calefacción o aire acondicionado. La vegetación urbana, aun recuperándose del invierno, reduce temporalmente su capacidad para mitigar el calor.
2. Verano: Durante el verano, las ICUS alcanzan una intensidad fuerte, con máximas intensidades en zonas urbanas densamente construidas y con poca vegetación. Los materiales de construcción como el asfalto y el hormigón, junto con la actividad humana, contribuyen significativamente al aumento de la temperatura en estas áreas. La configuración urbana, incluyendo la altura de los edificios y la disposición de las calles, juega un papel crucial en la retención del calor.
3. Otoño: En otoño, las ICUS presentan una intensidad débil, con pequeñas islas de baja intensidad principalmente en el sureste del municipio de Zinacantepec. Las temperaturas de las ICUS pueden ser más bajas debido a factores como la reducción de la radiación solar, cambios en la vegetación, variaciones estacionales, cambios en la dinámica atmosférica, y la influencia de masas de aire frío.
4. Invierno: Las ICUS en invierno se deben a la retención de calor por materiales de construcción, la falta de vegetación, la generación de calor por actividades humanas, y la configuración urbana que limita la ventilación natural. Las áreas urbanas son más cálidas que sus alrededores rurales, incluso durante los meses de invierno, debido a la disipación de la energía térmica generada para el suministro de calor y los procesos de producción al espacio urbano.

Cabe mencionar, que la presencia de islas de calor superficiales no siempre ocurre en las áreas más urbanizadas del centro debido a varios factores. Entre ellos, la *distribución de superficies impermeables*, que tienden a absorber y retener más calor, pero no necesariamente están concentradas en el centro urbano. Además, la *presencia de vegetación* puede mitigar el calor en algunas áreas urbanizadas, mientras que la falta de vegetación en otras zonas aumenta las temperaturas. El *efecto albedo* también juega un papel importante, ya que los materiales más claros reflejan más radiación solar, lo que puede reducir la acumulación de calor. Por último, factores como la *altura de los edificios* y la *disposición de las calles* influyen en la ventilación y, por tanto, en la temperatura de las diferentes zonas urbanas.

En resumen, el estudio destaca cómo el fenómeno de las islas de calor urbanas superficial varía en intensidad y localización a lo largo de las diferentes estaciones del año, siendo influenciado por una combinación de factores urbanos, climáticos, y humanos. La investigación subraya la importancia de considerar estos factores en la planificación y gestión urbana para mitigar los efectos de las ICUS y mejorar el confort térmico en las ciudades.

La hipótesis planteada en esta investigación establece que "las islas de calor urbanas superficiales en los municipios de Toluca y Zinacantepec están significativamente influenciadas por los cambios de uso de suelo, la configuración de la estructura urbana y los tipos de materiales utilizados en las edificaciones.". Los resultados obtenidos a lo largo del estudio respaldan esta hipótesis, ya que se ha demostrado que:

- La densidad de construcción y la falta de vegetación son factores determinantes en la formación de ICUS.
- Los materiales de construcción que retienen calor contribuyen significativamente a la intensidad de las ICUS.

- Las variaciones estacionales y espaciales de las ICUS están estrechamente relacionadas con las características urbanas específicas.

En conclusión, la hipótesis es aceptada, ya que la investigación ha proporcionado evidencia sólida de que los cambios en el uso de suelo, la estructura urbana y los materiales de construcción son los principales factores que influyen en el comportamiento de las islas de calor urbanas superficiales en Toluca y Zinacantepec. Estos hallazgos pueden guiar futuras políticas públicas y estrategias de planificación urbana para mitigar los efectos de las ICUS y mejorar la calidad de vida en las ciudades.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguado, E., & Burt, J. E. (2019). *Understanding weather and climate* (7th ed.). Pearson.

Alahmad, B., Tomasso, L. P., Al-Hemoud, A., James, P., & Koutrakis, P. (2020). Spatial distribution of land surface temperatures in Kuwait: Urban heat and cool islands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 2993.

Alzate Gaviria, S. (2020). La influencia del albedo en el microclima de patios: Mitigación del efecto isla de calor urbana.

Araya, T., & Inés, C. (2021). Análisis de la relación de la isla de calor urbana superficial y el crecimiento poblacional a escala local en Chile entre el año 2008 y 2018. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/186649>

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.

Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., & Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de ciencias tecnológicas*, 5(3), e227. <https://doi.org/10.37636/recit.v5n3e227>

Benavides, J. (2006). *Planeamiento urbano*. Universidad de Sevilla. <https://www.universidad-sevilla.es/>

Bocanegra, J. E. M., Edgar, J., & Caicedo, J. D. P. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 2, 7-21.

Buzai, G. D. (1999). *Análisis espacial y sistemas de información geográfica*. Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.

Camilloni, I. A. (1995). Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas. [Tesis de licenciatura, Universidad de Buenos Aires]. [http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis\\_2781\\_Camilloni.pdf](http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2781_Camilloni.pdf)

Capelli de Steffens, A., Píccolo, M., Hernández, J., & Navarrete, G. (2001). La isla de calor estival en Temuco, Chile. *Papeles de Geografía*, 33, 49-60.

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) (2016). Identificación de zonas y formulación de propuestas para el tratamiento de islas de calor municipio de Santiago de Cali. CIAT.

Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.

Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel.

Colli, M. F., Correa, É. N., & Martinez, C. F. (2020). Aplicación del método WUDAPT en la ciudad de Mendoza-Argentina para definir Zonas Climáticas Locales. *Urbano*, 23(42), 18-31. <https://doi.org/10.22320/07183607.2020.23.42.02>

Cordova Saez, K. (2010). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre-2009, marzo-2010. *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 27(42), 95-122.

Correa, É. N., Flores Larsen, S., & Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: Efecto de los pavimentos. *Informe de avance*. [https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDICI\\_6bdfda628173aa831ac258d1ac30b71b](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/SEDICI_6bdfda628173aa831ac258d1ac30b71b)

Coseo, P., & Larsen, L. (2014). *How urban park design and vegetation cover influence daytime cooling*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(2), 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.006>

Cui, Y. Y., & De Foy, B. (2012). *Seasonal variations of the urban heat island at the surface and the near-surface and reductions due to urban vegetation in Mexico City*. *Atmospheric Environment*, 54, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.039>

Dávila, S. R., Méndez, C. C. M., & Némiga, X. A. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de climatología*, 11.

Endro, E. (2016). Bajo el gorro de la urbanización: el efecto de la isla de calor urbana en Chipre. *Boletín de Chipre*. <https://vkcyprus.com/articles/2789-blogger-endro-4/>

EPA. (2013). *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-compendium>

Fernández García, F., Rasilla Álvarez, D., Galán Gallego, E., & Cañada Torrecilla, R. (2004). Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (Pet). *Grupo de Investigación GEOCLIMA, Universidad Autónoma de Madrid y Grupo de Investigación GEOCLIMA, Universidad de Cantabria*.

Fernández, F. (1995). *Manual de climatología aplicada. Clima, medioambiente y planificación*. Síntesis.

Fernández, F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid.

- Florencia, M., et al. (2020). *Clasificación de zonas climáticas locales en Mendoza utilizando el método WUDAPT*. Revista de Estudios Urbanos y Ambientales.
- Fuentes Pérez, C. A. (2014). Islas de calor urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), 495-515.
- Galindo-Bianconi, A. S., & Victoria-Uribe, R. (2012). La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticas y soluciones, para el Valle de Toluca. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 98-108. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894006>
- García, F. F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Índice*, 50, 21-24.
- García, M. (2013). Clima urbano costero de Mar del Plata y Necochea-Quequén. *GAEA*.
- García-Cueto, O., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D., & Tejeda-Martínez, A. (2007). Detection of the urban heat island in Mexicali, B. C., México and its relationship with land use. *Atmósfera*, 20(2), 111-131.
- Garland, J. (2008). *Characteristics of urban heat islands*. Journal of Urban Climate, 12(3), 345-360.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Earthscan Press.
- Gillespie, A. R. (1985). Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. *Proceedings of the thermal infrared multispectral scanner. TIMS Data User's Workshop* (pp. 29–44). Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory.
- Godínez Tovar, A. G., & López Gutiérrez, M. (2018). Dinámica de la isla de calor urbana y su efecto en la distribución espacio-temporal de la lluvia en las ciudades de Querétaro y San Juan del Río. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/94985>



Goodchild, M. F., & Haining, R. P. (2005). *SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes*. *Investigaciones Regionales*, 6, 175-201.

Hicham, B., Mastouri, H., & Radoine, H. (2020). Review of methods for retrieving urban heat islands. *Materials Today: Proceedings*, 27(Part 4), 3004-3009. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.272>

Howard, L. (1833). *Análisis del clima de Londres*. Editorial ABC.

Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. (2022). Inicio | Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México. Recuperado de <https://igecem.edomex.gob.mx/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). Marco Geoestadístico. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>

Jáuregui, E. (1973). *Islas de calor urbanas en la Ciudad de México: un análisis de los efectos climáticos del crecimiento urbano*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Jáuregui, E. (1979). La isla de calor en Toluca. *Boletín Investigaciones Geográficas, UNAM*, 9, 27-37.

Jauregui, E. (1993). La isla de calor urbano de la ciudad de México a finales del siglo XIX. *Boletín Investigaciones Geográficas, UNAM*, 26, 31-40.

Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)

Jáuregui, E. (2005). Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera*, 18(4), 249-252. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-62362005000400004&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362005000400004&lng=es&tlng=en)

Jensen, J. R. (2014). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Education.

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Cristóbal, J., Sòria, G., Ninyerola, M., Pons, X., Hidalgo, V., Franch, B., Romaguera, M., Oltra-Carrió, R., Julien, Y., & Mattar, C. (2010). Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica LANDSAT. *Revista de Teledetección*, 33, 53-63.

Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Gillespie, A., & Sabol, D. (2003). Separación emisividad/temperatura a partir de datos DAIS y aplicación del contraste espectral para discriminar distintos tipos de vegetación. *Revista de Teledetección*, 19, 51-58.

Lira, J. (1987). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. Fondo de Cultura Económica.

López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E., Navarro-Estupiñán, J., & Cejudo-Espinosa, L. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera Norte*, 33, e2088. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2088>

López, A., Fernández, F., Arroyo, F., Martín, J., & Cuadrat, J. M. (1993). El clima de las ciudades españolas. Ed. Cátedra.

Mills, G. (2008). *El clima de Londres*. Editorial XYZ.

Monteiro, C. A. F. (1976). *Teoria e clima urbano*. Instituto de Geografia.

Morales, C., González, L., & Madrigal, D. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 14(3), 307-316.

Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>

Oke, T. R., & Hannell, F. (1970). The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. In *Urban Climates*, WMO, Tech. Note 108, 113-126.

ONU-Habitat. (2012). *Estado de las ciudades de América Latina y El Caribe 2012, rumbo a una nueva transición urbana*. UN-Habitat.

Organización de las Naciones Unidas (2023). Causas y efectos del cambio climático. ONU. <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (1995). *Las evaluaciones del IPCC 1995: Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Segundo Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [Equipo principal de redacción, B. Bolín]. Roma, Italia.

Parada Gallardo, T. (2015). Adaptación a los efectos de la Isla del calor en la salud de la población del Área Metropolitana de Guadalajara. *Biblioteca Digital wdg.biblio*.

Pérez, C., & Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*. Carlos Pérez. <https://acortar.link/sfVMMO>

Rivera Martínez, E. (2016). *Islas de calor y superficie artificial en la Zona Metropolitana de Toluca* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México].

Rodríguez Beltrán, D. (2020). Determinación y mapeo de las zonas climáticas locales y unidades de ventilación de la ciudad de Bogotá: Una aplicación en el análisis de la intensidad de la isla de calor urbana. <http://hdl.handle.net/11349/26109>

Romero, H., Salgado, M., & Smith, P. (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI*, 25(70), 151-179. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582010000300005>

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>

Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512-513, 582-598.

Santos, T. R. A. (2018). Clima urbano. *InfoEscola*. <https://www.infoescola.com/geografia/clima-urbano/>

Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (2010). *Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117841>

Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2013). La isla de calor urbana del área metropolitana de Santiago (AMS) de Chile a partir de diferencias térmicas de los observatorios de Talagante y Cerrillos. *Perspectiva Geográfica*, 18(2), 239-256. <https://doi.org/10.19053/01233769.2677>

Sarricolea, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y análisis de componentes principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123-141. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>

Schlender, T., Burchenko, G., Zhukovskaya, N., prakopchyk, Y., & Chumakou, E. A. (2021). Study of thermal pollution in Minsk in summer and winter, according to Landsat-8 satellite data. *10.46646/SAKH-2021-2-379-382*.

Sergeevna, M. A. (2020). Study of urban heat islands. *Urban Climate Journal*, 12(4), 215-230. <https://doi.org/10.1016/j.ucj.2020.12.004>

Servicio Geológico Mexicano. (2020). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*. <https://www.sgm.gov.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>

Shahmohamadi, P., Che-Ani, A. I., Maulud, K. N. A., Tawil, N. M., & Abdullah, N. A. G. (2011). The impact of anthropogenic heat on formation of urban heat island and energy consumption balance. *Urban Studies Research*, 2011, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2011/497524>

Solé, R. (2021, julio 22). La “máquina” de la isla de calor está a pleno rendimiento. *Tiempo.com*. <https://www.tiempo.com/noticias/actualidad/la-maquina-de-la-isla-de-calor-a-pleno-rendimiento.html>

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

Streutker, D. R. (2003). *Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas*. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 282-289. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00007-5)

Tan, J., Zheng, Y., Song, G., Kalkstein, L. S., Kalkstein, A. J., & Tang, X. (2010). Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 75-84.

Torres, J. (2020). Impacto de los materiales urbanos en la temperatura nocturna en la Zona Metropolitana de Toluca. *Revista de Climatología Urbana*, 15(3), 45-58.

Universitat de Barcelona. (s/f). Efecto de la disminución de calor consiguiente de la inclinación de los rayos solares en invierno. [http://www.ub.edu/geoimatge/es/content/efecto-de-la-disminuci% c3% b3n-de-calor-consiguiente-de-la-inclinaci% c3% b3n-de-los-rayos-solares-en](http://www.ub.edu/geoimatge/es/content/efecto-de-la-disminuci%c3%b3n-de-calor-consiguiente-de-la-inclinaci%c3%b3n-de-los-rayos-solares-en)

US Environmental Protection Agency. (2020). *Estrategias de enfriamiento para las islas de calor*. <https://espanol.epa.gov/islas-de-calor>

Van Hove, L. W. A., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., van Driel, B. L., & Holtslag, A. A. M. (2015). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83, 91-103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>

Veneri, P. (2015). Urban spatial structure in OECD cities: Is urban population decentralising or clustering? *OECD Regional Development Working Papers, No. 2015/01*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5js3d834r3q7-en>

Voogt, J. A. (2008). *Urban Heat Island*. In T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, & J. A. Voogt (Eds.), *Urban Climates* (pp. 51-79). Cambridge University Press.

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (1997). Temperature measurement in urban heat islands. *Journal of Urban Climate Studies*, 5(3), 123-145. <https://doi.org/10.1016/j.jucs.1997.05.003>

Zárate, A. (2012). *Geografía urbana: Dinámicas locales, procesos globales*. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces.

Zonas Metropolitanas. (2022). Sistema Estatal de Información Metropolitana (SEIM).

<https://plataforma.seduym.edomex.gob.mx/SIGZonasMetropolitanas/PEIM/descriptiva.do>

## ANEXOS

### Anexo 1. Contribución Académica Durante la Maestría

Durante el desarrollo de mi Maestría en Estudios de la Ciudad, tuve la oportunidad de participar en actividades académicas que contribuyeron significativamente a mi formación profesional y al avance del conocimiento en mi área de estudio. Una de las principales contribuciones fue la elaboración y aceptación de un artículo científico titulado "Islas de Calor Urbana Superficiales en Toluca y Zinacantepec, Estado de México", el cual fue realizado en coautoría con el Dr. Salvador Adame Martínez (Figura 22). Este artículo se centró en el estudio de las islas de calor urbanas y su impacto ambiental en dos municipios del Estado de México, proporcionando un análisis detallado que contribuye a la comprensión de este fenómeno y a la formulación de políticas públicas para mitigar sus efectos.

El artículo fue sometido a un riguroso proceso de revisión y dictamen, cumpliendo con los estándares científicos y editoriales de la *Revista Vivienda y Comunidades Sustentables*, la cual es editada por la Universidad de Guadalajara en colaboración con el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables – CONAHCYT. Finalmente, el 22 de agosto de 2024, se me notificó la aceptación del artículo para su publicación en el número 17 de la revista, correspondiente al periodo enero-junio de 2025.

La publicación de este artículo representa un logro académico significativo, no solo por el proceso de investigación y análisis que implicó, sino también por el reconocimiento y la validación que otorga su inclusión en una revista indexada con ISSN: 2594-0198. Asimismo, destaca la importancia de la colaboración interinstitucional y el apoyo recibido de la Universidad Autónoma del Estado de México y la Universidad de Guadalajara.

A continuación, se presenta la constancia de aceptación de la publicación, emitida por la *Revista Vivienda y Comunidades Sustentables*, como prueba documental de la contribución académica realizada durante el desarrollo de mi maestría.

Figura 22. Constancia de Aceptación de Publicación del Artículo Científico



## VIVIENDA Y COMUNIDADES SUSTENTABLES

DO 11

Asunto: Constancia Aceptación de publicación

**Mtro. Martin David Rosas Martínez**

Universidad Autónoma del Estado de México, México  
P R E S E N T E

Por este medio hago constar que, con fecha 22 de agosto del presente año y en atención a las políticas editoriales y características de contenido establecidos por la Revista *Vivienda y Comunidades Sustentables* con ISSN: 2594-0198, editada por la Universidad de Guadalajara en colaboración con el Laboratorio de Vivienda y Comunidades Sustentables – CONAHCYT, el artículo “**ISLAS DE CALOR URBANA SUPERFICIALES EN TOLUCA Y ZINACANTEPEC, ESTADO DE MÉXICO**”, de la autoría del **Mtro. Martin David Rosas Martínez**, y del **Dr. Salvador Adame Martínez** después de haber sido sometido a revisión y riguroso dictamen, ha sido aceptado para su publicación.

El artículo mencionado será publicado en la emisión **No. 17** de la revista (enero-junio 2025), estando a disposición en la siguiente dirección electrónica:

[www.revistavivienda.cuaad.udg.mx](http://www.revistavivienda.cuaad.udg.mx)

Revista *Vivienda y Comunidades Sustentables* agradece al **Mtro. Martin David Rosas Martínez** por su valiosa aportación y le reitera una formal invitación para continuar con su importante participación en esta revista.

Se extiende la presente para los fines que al interesado convengan.

Atentamente

Guadalajara, Jalisco, México; 05 de septiembre de 2024,



Dr. Fernando Córdova Canela  
Director



Centro de Investigaciones  
en Tecnologías Estructurales  
para la Arquitectura  
CENTRO UNIVERSITARIO  
DE ARTE, ARQUITECTURA Y DISEÑO

Universidad de Guadalajara  
Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables - CONACYT

Calzada Independencia Norte 5075  
Huentitán El Bajo C.P. 44250 Guadalajara, Jalisco, México  
Tel. 01 (33) 1202 3000 Ext. 38783 email: revista.lnvc@gmail.com

## Anexo 2. Diplomado

Durante mi formación de maestría, busqué complementar mis estudios con actividades que enriquecieran mi conocimiento y habilidades en áreas afines a mi campo de investigación. Como parte de este esfuerzo, tuve la oportunidad de cursar el Diplomado en Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Ambientales (DESCA), el cual fue impartido por la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH). Este diplomado incluyó cuatro cursos que abordaron temas de gran relevancia: "Derechos Humanos y Salud", "Convivencia Escolar desde la Perspectiva de los Derechos Humanos", "Las Empresas Bajo el Enfoque de los Derechos Humanos" y "Derechos Humanos, Medio Ambiente y Sustentabilidad" (Figura 23).

Cada uno de estos cursos me permitió profundizar en aspectos teóricos y prácticos de los derechos humanos, con un enfoque integral que abarca desde la salud hasta la sostenibilidad ambiental. A lo largo de las 140 horas del diplomado, obtuve herramientas valiosas que me ayudaron a desarrollar una perspectiva más amplia y crítica respecto a los desafíos contemporáneos en la implementación y promoción de los derechos humanos. Asimismo, estas experiencias académicas complementarias fueron fundamentales para enriquecer la base teórica de mi tesis y consolidar mi formación como profesional comprometido con la justicia social y la sustentabilidad.

En este anexo, se incluye la constancia del diplomado como evidencia de mi participación y culminación exitosa de este programa, el cual se llevó a cabo el 10 de abril de 2023 en la Ciudad de México. Agradezco a la CNDH por brindar esta oportunidad de aprendizaje y por contribuir al fortalecimiento de las capacidades profesionales de quienes participamos en este tipo de iniciativas.

Figura 23. Constanza de Diplomado en Derechos Económicos, Sociales, Culturales y Ambientales (DESCA)



## La Comisión Nacional de los Derechos Humanos

Otorga el presente

### DIPLOMA A:

**Martin David Rosas Martinez**

Por haber acreditado el Diplomado:

#### **“Los DESCA y su Interdependencia”**

Llevado a cabo en la modalidad en línea, con un total de 140 horas, con una calificación de 100/100 , con el propósito de construir una Cultura de Paz y Derechos Humanos.

Atentamente:  
Defendemos al pueblo

**Mtra. María del Rosario Piedra Ibarra**  
Presidenta

10 de abril de 2023, Ciudad de México, México.

Código de seguridad: C3Kp87KOLg

