

Metodología y aplicación del estudio de islas de calor urbanas superficiales

Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. El proceso de dictaminación y su trazabilidad puede consultarse, así como el libro en Acceso Abierto.



comunicacion-cientifica.com

[DOI.ORG/10.52501/cc.419](https://doi.org/10.52501/cc.419)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**
PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
COLECCIÓN
**CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Metodología y aplicación del estudio de islas de calor urbanas superficiales

Fermín Carreño Meléndez
Martín David Rosas Martínez

Carreño Meléndez, Fermín

Metodología y aplicación del estudio de islas de calor urbanas superficiales / Fermín Carreño Meléndez, Martín David Rosas Martínez.— Ciudad de México : Comunicación Científica, 2026. (Colección Ciencia e Investigación).

70 páginas : fotografías ; gráficas ; 23 × 16.5 centímetros

DOI: 10.52501/cc.419

ISBN: 978-968-9738-72-5

1. Isla de calor urbana. 2. Climatología urbana. I. Rosas Martínez, Martín David, autor, II. Carreño Meléndez, Fermín, autor.



LC: QC981.7.U7 C47

DEWEY: 551.525091732 C47

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a los autores D.R. © Fermín Carreño Meléndez y Martín David Rosas Martínez, 2026. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2026

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2026,
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,
Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,
Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170
info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com
 [comunicacioncientificapublicaciones](#)  [@ComunidadCient2](#)

ISBN 978-968-9738-72-5

DOI 10.52501/cc.419



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.
La trazabilidad de la dictaminación puede consultarse, así como el libro en acceso abierto, en <https://doi.org/10.52501/cc.419>

Índice

<i>Introducción</i>	11
1. Isla de calor urbana (ICU)	15
1.1. Tipos	16
1.2 Características	18
1.3 Conformación	20
1.4 Impactos	25
1.5 Métodos de detección	27
1.6 Estructura urbana	30
1.7 Percepción remota	33
Componentes de un sistema de teledetección	35
Superficies reflectantes	37
Principios físicos	38
Formación de la imagen multiespectral	40
1.8 Reflectancia	42
1.9 Análisis espacial	44
1.10 Conclusión parcial	46
2. Metodología para medir islas de calor urbanas superficiales	49
2.1. Descripción de la zona de estudio	50
2.2. Materiales y método	52

2.3. Datos para condiciones atmosféricas	53
2.4. Datos y procesos para temperatura superficial	53
2.5. Datos para superficie artificial (uso de suelo urbano)	57
2.6. Conclusión parcial	58
3. Ejemplo de aplicación del análisis de islas de calor urbanas superficiales	61
3.1 Identificación y clasificación exhaustiva de superficies artificiales	62
3.2 Análisis temporal detallado de temperatura superficial	62
3.3 Análisis espacial profundo de la distribución de ICUS	63
3.4 Discusión profunda y estrategias para la mitigación de ICUS	64
<i>Referencias</i>	65
<i>Sobre los autores</i>	69

Resumen

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) representa una de las principales alteraciones microclimáticas derivadas de la urbanización acelerada, manifestándose como un incremento sostenido de la temperatura en áreas urbanas respecto a sus entornos rurales. Este proceso, identificado desde el siglo XIX, se ha convertido en una característica generalizada de las ciudades modernas con alta densidad poblacional y predominio de superficies impermeables. Las ICU no constituyen un efecto secundario del crecimiento urbano, sino la expresión de un desequilibrio en el balance energético superficial provocado por la sustitución de coberturas naturales por materiales con alta capacidad de absorción térmica y baja evapotranspiración, así como por condiciones atmosféricas que favorecen la acumulación de calor.

La dinámica térmica urbana se ve intensificada por factores como el diseño y la morfología de la ciudad, la densidad edificatoria, el calor antropogénico y la fragmentación de las áreas verdes, generando patrones espaciales diversos. Sus impactos trascienden lo climático, y afectan el consumo energético, la salud pública, la calidad del aire y la sostenibilidad económica de las ciudades. En este marco, el análisis de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) mediante percepción remota, especialmente con imágenes Landsat 8, permite cuantificar con precisión las variaciones térmicas intraurbanas. La aplicación de esta metodología en la zona metropolitana de Toluca evidencia la estrecha relación entre antropización del suelo y calentamiento superficial, aportando bases técnicas para el diseño de estrategias de mitigación urbana, orientadas a la resiliencia climática y al mejoramiento de la calidad de vida.

Palabras clave: *islas de calor urbanas, microclima urbano, balance energético superficial, percepción remota, planeación urbana.*

Introducción

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) constituye una de las manifestaciones más evidentes de la alteración microclimática inducida por la urbanización acelerada; se caracteriza por un aumento continuo del nivel térmico en los entornos construidos en comparación con las áreas rurales o periurbanas circundantes. Este proceso, documentado inicialmente por Luke Howard en 1833 al observar anomalías térmicas en Londres, se presenta hoy como un rasgo universal en cualquier aglomeración con más de 10 000 habitantes y una significativa cobertura de superficies impermeables. Lejos de ser un mero efecto colateral del crecimiento demográfico, las ICU revelan una profunda disfunción en el balance energético superficial, donde la sustitución de coberturas naturales por materiales de alta capacidad térmica y baja emisividad evapotranspirativa genera un calentamiento persistente que se intensifica especialmente en condiciones anticiclónicas de cielos despejados y vientos calmados.

Las causas de este fenómeno son múltiples y convergentes. Los materiales urbanos convencionales —hormigón, asfalto, ladrillo y vidrio— absorben y almacenan gran cantidad de radiación solar durante el día para liberarla lentamente durante la noche; mientras que la drástica reducción de la evapotranspiración y el espacio matemático de cañones urbanos limitan tanto la convección como la radiación de onda larga hacia el espacio. A ello se suma el calor antropogénico derivado del tráfico vehicular, la industria y los sistemas de climatización, configurando un sistema que

altera radicalmente el intercambio energético entre la superficie y la atmósfera. La misma estructura urbana actúa como amplificador: la densidad edificatoria, la altura de los edificios, el trazado vial y la fragmentación de áreas verdes, determinan no sólo la intensidad, sino también la morfología espacial de las islas de calor, generando patrones concéntricos, radiales o irregulares según la configuración territorial.

Los impactos de las ICU trascienden el ámbito estrictamente térmico y se proyectan sobre dimensiones ambientales, energéticas, sanitarias y económicas de gran relevancia. El incremento de la demanda energética por refrigeración en periodos estivales —que puede alcanzar entre 1.5 y 2 % por cada 0.6 °C de calentamiento adicional— eleva las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes asociados a la generación termoeléctrica. Desde la perspectiva de la salud pública, el estrés térmico agravado por las ICU incrementa la morbilidad durante olas de calor, afectando especialmente a poblaciones vulnerables como niños y adultos mayores. Asimismo, la degradación de la calidad del aire y del confort térmico urbano compromete la habitabilidad de las ciudades y genera costos adicionales en mantenimiento de infraestructuras y gestión de escorrentías pluviales.

En este contexto, el estudio de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) adquiere especial importancia, pues permite cuantificar con precisión las diferencias térmicas entre superficies artificiales y superficies naturales mediante técnicas de percepción remota que capturan la emisión térmica en el rango infrarrojo (10-12 μm). La utilización de imágenes Landsat 8, procesadas mediante algoritmos de corrección atmosférica y estimación de emisividad, como el método de Normalización de Emisividad (NEM) y técnicas *Split-Window* (sw), ofrece una herramienta robusta para mapear la intensidad térmica a escala intraurbana, y su variación estacional, superando las limitaciones de las mediciones *in situ*, y permitiendo análisis comparativos de gran cobertura espacial.

El presente volumen tiene como propósito central sistematizar una metodología rigurosa y replicable para la identificación, cuantificación y análisis espacial de las ICUS, aplicada de manera exhaustiva al caso de los municipios de Toluca y Zinacantepec, en la zona metropolitana de Toluca durante el año 2022. Por medio de la integración de datos Landsat 8, cartografía de uso del suelo y herramientas de análisis geoestadístico, se

demuestra cómo las superficies artificiales de mayor grado de antropización —núcleos comerciales, industriales y vialidades principales— concentran las máximas intensidades térmicas, alcanzando diferencias de hasta 18 °C con respecto de áreas naturales en periodo estival. Este enfoque no sólo valida empíricamente la relación causal entre estructura urbana y calentamiento superficial, sino que proporciona bases técnicas sólidas para la formulación de estrategias de mitigación —incremento de cobertura vegetal, empleo de materiales de alta reflectancia y *redesign* geomorfológico— orientadas a construir ciudades más resilientes frente al cambio climático, y a mejorar sustancialmente la calidad de vida de sus habitantes.

1. Isla de calor urbana (ICU)

La investigación sobre las islas de calor urbanas (ICU) se inicia aproximadamente hace 200 años con el científico Luke Howard (1833), quien describió el fenómeno de la isla de calor en la ciudad de 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; debido, posiblemente, 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, 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 aumento de la temperatura al interior de las ciudades respecto al medio rural. El centro de las ciudades, donde las construcciones y los edificios forman un conjunto más denso y compacto, suelen presentar las temperaturas más elevadas (Morán, 2017).

Una *isla de calor* es una condición que ocurre cuando la temperatura en las áreas urbanas es más alta que en la periferia (McCartney y Mehta, 2020).

Barrera (2022) señala que la ICU muestra más efectos microclimáticos en las ciudades con mayores temperaturas, que en las áreas rurales circundantes.

A manera de resumen se puede afirmar que hay un consenso general en la conceptualización de islas de calor urbana que está asociada a 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 de la temperatura 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.

1.1. Tipos

Las islas de calor urbanas presentan dos tipos. El primer tipo son las islas de calor superficiales, que representa 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 la ciudad. El segundo tipo, denominado *islas de calor atmosféricas*, refleja las diferencias térmicas entre el aire de las regiones 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, cuyas principales características recogemos en la tabla 1, y definimos a continuación:

- *La Isla de calor urbana atmosférica (ICU)*: Refleja la diferencia entre la temperatura del aire de 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.

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

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

<i>Características</i>	<i>Isla de calor urbana de superficie (ICUs)</i>	<i>Isla de calor urbana atmosférica (ICU)</i>
Desarrollo temporal	Presente tanto de día como de noche	Pequeña o inexistente durante el día
	Más intensa en los días de verano	Más intensa en las noches de invierno
Condiciones para el desarrollo de la máxima intensidad	Mayor variación espaciotemporal	Escasa variación espaciotemporal
	Día: 10 a 15°C Noche: 5 a 10°C	Día: -1 a 3°C Noche: 7 a 12°C
Método típico para su estudio	Mediciones indirectas	Mediciones directas
	Sensores remotos	Estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles
Representación gráfica típica	Imagen térmica	Mapa de isoterms
		Imagen térmica

Fuente: Sarricolea y Romero (2010).

Las islas de calor atmosféricas, según Voogt (2008), 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. Alcanzan 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 et al. (s. f.) mencionan que existen tres tipos de islas de calor; las cuales 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)

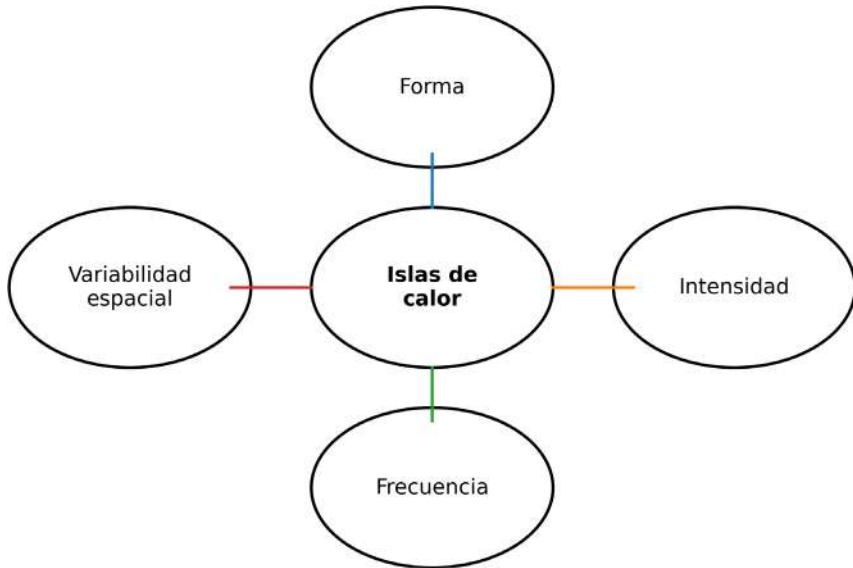
Las dos primeras, las ICCD y las ICCP, están relacionadas con el calentamiento de la atmósfera urbana; calentamiento que se relaciona, a su vez, con el calor relativo de la superficie urbana. La capa de dosel urbana (CDU) es la capa de aire en las áreas urbanas próxima a la superficie que se desarrolla en dirección ascendente hasta, aproximadamente, la altura promedio de los edificios. En la parte superior de la capa de dosel se encuentra la capa perimetral de la ciudad, que puede tener un espesor de 1 km, o más, a lo largo del día, y que puede reducirse a una distancia de cientos de metros durante la noche. El ICCP es lo que crea un domo de aire más cálido que sopla la ciudad con el viento. El viento con frecuencia cambia la forma del domo a la forma de una pluma.

Las islas de calor difieren en su forma espacial, en sus características temporales (relacionadas con el paso del tiempo) y en ciertos procesos físicos subyacentes que impulsan su desarrollo. Los científicos miden el nivel térmico del aire en la ICCD e ICCP de forma directa con termómetros, en tanto que en la ICS usa sensores remotos montados en satélites o aviones (Voogt, 2008).

1.2 Características

Las características clave para analizar una isla de calor son: la forma, la frecuencia, la intensidad y las variaciones tanto espaciales como temporales (López et al., 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 a lo largo de las estaciones del año. La figura 1 muestra los aspectos a considerar en el estudio de isla de calor urbana.

Figura 1. Principales características de las ICU



Fuente: elaboración propia basada en Voogt (2008).

A continuación, se muestran 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 (es decir, en forma de haz), por el flujo de aire caliente hacia la periferia; radial, si sigue una trayectoria; o 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 determina en función de la diferencia de temperatura que hay entre la ciudad y 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 localización geográfica de la isla en el territorio. Esto estará relacionado con los atributos 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, así como los factores humanos que contribuyen a 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 regiones urbanas y rurales.
2. *Extensión espacial*: El área geográfica afectada por el fenómeno.
3. *Variabilidad temporal*: Cómo cambian las temperaturas en el transcurso del día y del año.
4. *Altura*: La variación del alcance de las islas de calor urbanas 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 al interior 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.

1.3 Conformación

Oke (1982) analizó las causas que favorecen 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 conforme 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 procedente del sol 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 los suelos urbanos y las capas contaminadas, especialmente la masa de los edificios en los que se almacenan el calor solar y se liberan más tarde; mientras que en las comunidades rurales la inercia térmica es mucho menor.

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

Gartland (2008) postula que las islas de calor se desarrollan en entornos urbanos y suburbanos, ya que una gran cantidad de materiales de construcción convencionales exhiben una mayor capacidad para captar y conservar el calor solar a diferencia de 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, el uso de materiales oscuros combinados con diseños arquitectónicos y pavimentaciones configuradas en forma de cañones urbanos tienden a captar y retener una mayor cantidad de energía solar. Los niveles térmicos 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 el descenso de la velocidad del viento y la contaminación atmosférica en áreas urbanizadas, también desempeñan un papel significativo en el surgimiento de islas de calor urbanas (Gartland, 2008).

Voogt (2008) subraya que una multitud de factores cruciales inciden en el desarrollo, manifestación, persistencia y severidad 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 estos determinan la manera en que se disipa o retiene el calor en una zona determinada.

Por otro lado, las actividades antropogénicas, tales como el empleo de materiales de construcción de alta capacidad térmica (asfalto o concreto), la disminución de áreas verdes, el aumento del tráfico vehicular, y la emisión de calor residual de las estructuras urbanas 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 favorece la formación de microclimas urbanos más cálidos que sus alrededores rurales o suburbanos (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 creación de islas de calor también está relacionada con las características geomorfológicas especiales 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 los edificios que contribuye a la creación de islas de calor es que bloquean el viento en la ciudad, lo que resulta en una reducción de la intensidad de enfriamiento por convección. A medida que progresan los centros urbanos, los cambios en la región se vuelven mayores y aumenta asimismo la temperatura superficial promedio en la región (Fedorkova et al., 2012).

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

<i>Tipo</i>	<i>Factor</i>	<i>Descripción</i>
Físico-geográfico	Localización	La estructura física del territorio, la latitud y la longitud impactan en las condiciones de la atmósfera debido a que se relacionan directamente con elementos del clima.
	Clima	Las corrientes de aire y las nubes tienen impacto en el desarrollo de las islas de calor. A menor viento y nubosidad mayor severidad de isla de calor. A medida que las corrientes de aire y la nubosidad se intensifican, favorecen la mezcla del aire y mitigan la intensidad.
	Intervalo temporal diario 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	En entornos donde los asentamientos urbanos están integrados en un paisaje rural circundante con zonas húmedas se reducen la intensidad y extensión de la isla debido a que el enfriamiento se da más lento en estas superficies, con mayor relevancia en climas de alta temperatura y humedad relativa elevada.
Antrópico	Geometría urbana	La estructura física 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 de manera importante de lo compacto o dispersa que sea la ciudad.
	Materiales de construcción	Generalmente se utilizan materiales con un albedo bajo y una mayor inercia térmica; es decir, poseen la característica de almacenar por mayor tiempo la energía calorífica y reflejarla lentamente al espacio; además de ser superficies impermeables, lo que permite la existencia de una superficie más seca y con menor evaporación, lo que se traduce en la disminución de la humedad relativa atmosférica y el calentamiento del aire.
	Función de la ciudad	Impacta en la emisión de contaminantes a la atmósfera urbana, con la utilización de energía que genera calor y el empleo de agua para el riego. Ciudades con función comercial o industrial impactan más en la fuerza térmica de la isla de calor.
	Fuentes de emisión de calor	El calor producido por las acciones humanas influye en el calentamiento; sobre todo, la quema de combustibles fósiles por uso de automotores y aparatos domésticos como aires acondicionados.

Fuente: elaboración propia basada en Voogt (2008).

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

El incremento significativo de estas islas de calor urbanas está relacionado con la conductividad y capacidad calorífica de los materiales impermeables, que son características del crecimiento de la ciudad, y que afectan el uso de energía y el bienestar de la población urbana.

Por su parte, Barrera et al. (2022) señalan que las ICU se forman debido a la configuración física de las ciudades (incluida su topografía, morfología espacial y densidad de edificación), los materiales estructurales empleados en los edificios, aceras y carreteras, el flujo de aire a través del sistema de conductos de calles, y la capacidad humana productora de calor con actividades como el transporte y la industria. Gartland (2008) enumera las características urbanas que impulsan la formación de ICU (tabla 3). 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

Tabla 3. *Características urbanas y suburbanas importantes para la formación de ICU y su efecto en el balance térmico de la superficie terrestre.*

<i>Característica que contribuye a la formación de ICU</i>	<i>Efecto en el balance energético</i>
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
Incremento en el consumo de energía	Aumento del calor antropogénico

Fuente: Gartland (2008).

1.4 Impactos

Las islas de calor urbanas (ICU) pueden tener una gama de impactos tanto positivos como negativos en diversas ciudades a nivel global; los cuales son especialmente pronunciados durante los meses estivales, cuando sus efectos adversos en el medio ambiente y en la calidad de vida se vuelven más claros. La manifestación de las ICU implica varios efectos secundarios que afectan a la ciudad y a sus habitantes; principalmente, a causa del aumento 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 la tabla 4 se detalla una categorización exhaustiva de las consecuencias asociadas a las ICU, segmentadas por región climática y estación del año; lo que proporciona una visión integral de cómo estas anomalías térmicas urbanas pueden influir en distintos contextos y épocas, exacerbando desórdenes de salud colectiva, aumentando el consumo energético, deteriorando la condición ambiental del aire y agravando el estrés térmico en la población urbana.

Tabla 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 en Voogt (2000).

En la tabla 4 se puede observar que las consecuencias negativas son: incremento del consumo de energía; aumento en la liberación de contaminantes e incremento térmico por concentración de gases de efecto invernadero; daño

del confort térmico y de la salud humana; así como degradación de la calidad del agua (US Environmental Protection Agency [EPA], 2013).

En la estación veraniega, cuando los valores de temperatura suben por el efecto de la isla de calor urbana, el consumo energético de la ciudad sube, 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 incremento 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 SO₂, NO_x, 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 ondas de calor prolongadas ocurridas en Europa. Las poblaciones más susceptibles a estos daños, como los niños y los adultos mayores, son más vulnerables al impacto en la salud por olas de calor (EPA, 2013).

Por ejemplo, en Estados Unidos, los Centros de Control y Prevención de Enfermedades estimaron que la exposición al calor causó más de 8 000 muertes prematuras entre 1979 y 2003 (Center for Disease Control and Prevention, 2006, citado por EPA, 2013).

Finalmente, Gartland (2008) afirma 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; las temperaturas más altas, la falta de sombra y el papel que desempeñan en la expansión de la contaminación del aire tienen graves efectos sobre la mortalidad y las enfermedades humanas; generan un derroche significativo de recursos económicos 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 y poco saludables para la flora y la fauna urbana.

1.5 Métodos de detección

La identificación de islas de calor urbanas es un indicador importante para evaluar la intensidad y la afectación causada por la urbanización en un área. Existen cinco métodos básicos para la identificación de islas de calor urbanas: (a) estación fija, (b) sensor vertical, (c) transversales móviles, (d) balance de energía, y (e) detección remota (Godínez *et al.*, 2018). A continuación, se describen una por una:

(a) **Estación fija:** Comparación de datos climáticos entre estaciones urbanas, suburbanas y rurales bajo la influencia de sistemas meteorológicos de mesoescala; con 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. Comparar estaciones meteorológicas.
2. Examinar datos de múltiples ubicaciones para efectos de área bidimensional (Méndez *et al.*, 2011).
3. Examinar grandes conjuntos de datos históricos para evaluar las tendencias regionales de islas de calor con el paso del tiempo (Méndez *et al.*, 2011).

(b) **Sensor vertical:** Este método incluye la incorporación de equipos de observación en torres de radio, el lanzamiento de globos meteorológicos instrumentados o el vuelo de helicópteros a diversas altitudes, puesto que el suelo terrestre afecta los 10 km superiores de la atmósfera (la troposfera); no obstante, la mayoría de estos efectos se limitan a una región menos profunda, aproximadamente, de 1 a 1.4 km, llamada *capa límite*; ahí, el calor y la fricción de la superficie generan calor en el aire que se eleva hacia la atmósfera y a 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 en el transcurso de una pista o ruta predeter-

minada y deteniéndose para tomar lecturas a través de una serie de instrumentos meteorológicos, en cualquier momento del día, en lugares representativos con condiciones climáticas tranquilas y despejadas, para medir la extensión máxima de la amplitud 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 et al., 2018).

Por otra parte, Gartland (2008) afirma que las estaciones fijas y las travesías móviles se utilizan generalmente para monitorear la temperatura del aire alrededor de una ciudad. La teledetección puede implementarse para encontrar temperaturas y otras características de superficies, como 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.

- (d) **Balance de energía:** Sánchez y Barradas (2001) señalan que uno de los mecanismos más afectados en el sistema urbano-atmósfera es el balance energético, ya que la energía disponible en el balance radiativo superficie-atmósfera (radiación neta en un lugar determinado) se reparte, principalmente, entre el calor que calienta el aire (flujo de calor sensible) y el calor que se utiliza en la evaporación del agua (flujo de calor latente). Cuando las áreas húmedas disminuyen en la ciudad, el flujo de calor latente se reduce de forma drástica y, en consecuencia, aumenta el flujo de calor sensible, lo que provoca un mayor calentamiento del aire superficial y un incremento de la temperatura en el sistema urbano (Godínez et al., 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 condición térmica de la superficie incluyen los cambios derivados de la radiación del suelo 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 y 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).

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; no obstante, estos vuelos son costosos para realizarse, 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 los registros térmicos urbanos, dejando de lado los registros térmicos de las paredes, 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 la ciudad de Vancouver (Columbia Británica, Canadá) 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 et al. (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 entornos urbanos 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 muy

importante proteger el instrumento del calor del tubo de escape del vehículo y equiparlo con un sensor correctamente ventilado que capture los datos recogidos a través del automóvil durante la travesía, eligiendo los puntos inicial y final como un punto común (Hicham et al., 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 mediante un área urbana a una altura específica de la superficie.

En cuanto al último método, el enfoque de modelización, consiste en proceder por modelización informática.

1.6 Estructura urbana

La *estructura urbana* se refiere tanto a 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, lo que implica que es importante una buena planificación urbana. Los tipos de la infraestructura vial y ferroviaria, así como pequeñas masas de agua afectan el uso del suelo y la ubicación de los edificios.

Benavides (2006) define la *estructura urbana* como aquel soporte que somete a un tipo de organización a la ciudad, puesto que dispone las partes que constituyen un todo. Es la interrelación entre las partes y el todo, entre todas las alternativas.

Por otro lado, Zárate (2012) habla sobre la diferenciación interna de las cuales están dotadas las ciudades, y menciona una de estas diferencias: el mosaico urbano; si bien, los interiores de las ciudades están constituidos por paisajes y usos del suelo predominantes —a veces definidos y distinguidos con claridad desde perspectivas funcionales y sociales—, es verdad que dichos paisajes forman un verdadero mosaico con las denominadas

estructuras urbanas, tales como centros, áreas industriales, áreas residenciales, etcétera.

Existen tres modelos básicos de la primera fase de concepción de la arquitectura 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*); el cual se superpone al núcleo funcional, la zona de transición, las zonas residenciales de rentas medias y altas, y las zonas suburbanas. El segundo, el “Modelo de estructura urbana sectorial”, argumenta que los factores que influyen las preferencias de localización de las rentas altas son el deseo de cercanía con el CBD y zonas de servicios, el prestigio de los lugares de residencia, el interés por lugares accesibles y la preferencia por zonas con mejores condiciones medioambientales organizadas por las vías principales. El tercero, el “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 el requerimiento de recursos económicos para ocupar los espacios privilegiados y centrales (Zárate, 2012).

Los modelos de estructura urbana interna monocéntrica 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 complejos en regiones urbanas con la creación de un sistema basado en funciones que diferencie los funcionamientos.

Por otro lado, la morfología urbana de las ciudades también se refiere a la ubicación del colectivo poblacional y el funcionamiento en el espacio urbano; lo que ha estado en constante transformación. En primer lugar, las ciudades se han ampliado física y funcionalmente con personas y actividades económicas 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, sino que ahora incluyen territorios circundantes de baja densidad y funcionalmente conectados. En segundo lugar, los gradientes de densidad urbana han disminuido en promedio durante el desarrollo de las décadas, lo que denota que la ampliación física ha ido acompañada de una redistribución de la población dentro del espacio urbano (Veneri, 2015).

La estructura urbana, tanto en la escala interna como en la 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 a partir de la intervención humana. Todo esto altera el intercambio de energía y humedad entre la superficie de las ciudades y la atmósfera. Estos factores hacen que los parámetros térmicos del aire en las ciudades sean de varios grados por encima de las temperaturas del aire en áreas rurales circundantes (Flores, 2020).

La presencia de calles angostas y edificios altos disminuye el flujo del viento. Esto provoca que el aire quede aprisionado, se caliente y se intensifique el efecto de las altas temperaturas. “Cuando hay edificios altos cerca unos de otros, la radiación se multiplica, sobre todo si los materiales utilizados en la construcción ayudan a eso” (Flores, 2020). El científico Brian Vant-Hull publicó un mapa de distribución del calor en Manhattan en 2015. El mapa mostró que el centro de la ciudad experimentaba un fenómeno conocido como *caja de luz*. En este, los grandes edificios de vidrio reflejaban la luz solar, lo que generaba que esas zonas fueran notablemente más cálidas que las circundantes. (Benavides, 2006).

El tamaño de las ciudades 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 los valores de temperatura en un entorno rural próximo ($Tu-r$) está relacionada con la población de dicha ciudad (P) de forma logarítmica”.

$$Tu-r = 3.06 \text{ Log } P - 6.79$$

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 la superficie

urbana 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 puede atribuirse al efecto cañón, que 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 los contextos urbanos 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 la regional urbana, los cambios en la densidad, en las categorías de materiales de edificación, en el trazado y ancho de calles, así como en la carga de las funciones y concentración de actividades, en los flujos de personas, entre otros aspectos, están relacionados con el clima y las islas de calor.

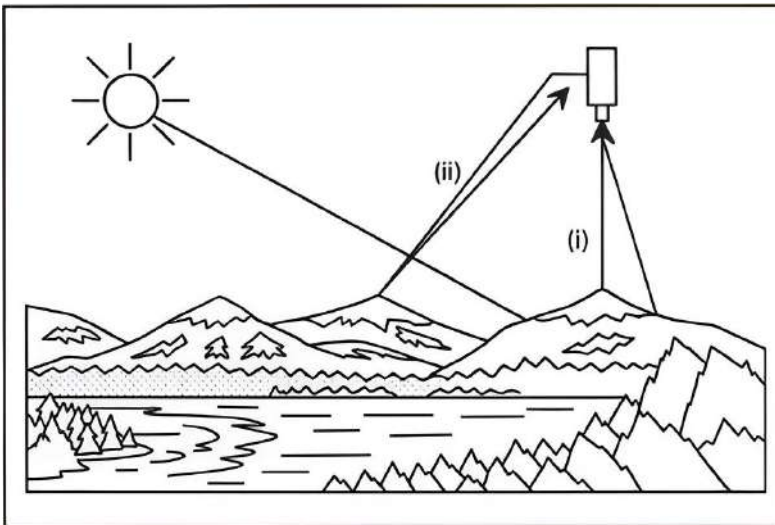
1.7 Percepción remota

La *percepción remota*, de acuerdo con Jensen (2014), se compara con las matemáticas como una herramienta o técnica, ya que el empleo de sensores sofisticados para medir la magnitud de energía electromagnética que sale de un objeto o zona geográfica a distancia, para 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 corteza 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 sólo 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 un vector energético externo 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 ámbito 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 (Chuvieco, 2002). Estas tres modalidades —reflexión, emisión y emisión-reflexión— constituyen los mecanismos básicos por medio 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 está relacionado con la energía emitida directamente por el objeto y captada por el sensor; y la emisión-reflexión involucra la emisión de energía por el sensor, que luego es reflejada por el objeto y capturada nuevamente por el mismo sensor (figura 2).

Figura 2. Formas de teledetección



Fuente: Chuvieco (2002).

El primero de ellos, la reflexión, es la forma más importante de la percepción remota, ya que proviene directamente del vector energético primario de la Tierra, el Sol. El Sol ilumina la corteza terrestre y refleja esta ener-

gía 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. Así mismo, 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 (Chuvienco, 2002).

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

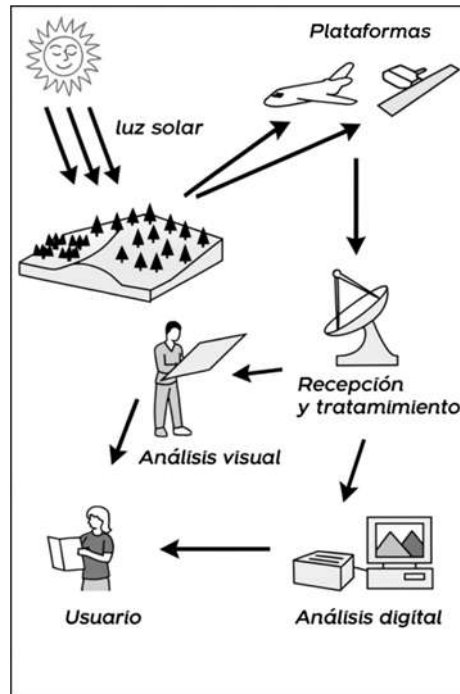
Por su parte, Lira (1987) señala que la percepción remota la componen los siguientes aspectos: (a) la fuente de iluminación, formada en este caso por el Sol, que emite luz o radiación solar; (b) el paisaje, configurado por todos los objetos presentes en el territorio explorado por el hombre, como pueden ser los ríos, colinas, geología, vegetación; (c) la escena, o sea el paisaje donde se enfoca nuestro interés, que puede ser la superficie de una roca o un valle; (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, que corresponde al lugar donde se coloca el sensor remoto para adquirir una perspectiva 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 ámbito de investigación.

Componentes de un sistema de teledetección

El proceso de teledetección se materializa gracias a la compleja interacción entre la energía electromagnética y la cobertura terrestre. Este proceso tiene una dependencia significativa de la respuesta reflectante diversa que presentan las superficies terrestres, la cual es modulada tanto por factores externos, como por 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 3). 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 (Chuvieco, 2002).

Figura 3. 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 que hay entre los diferentes tipos de suelos, de especies vegetales, o entre 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, la humedad o la textura.
- **Químicos:** en relación con variaciones de composición, contenido en materia orgánica, etc.
- **Ambientales:** en relación con la pendiente, la orientación, la estación del año, la hora de la toma, etc.

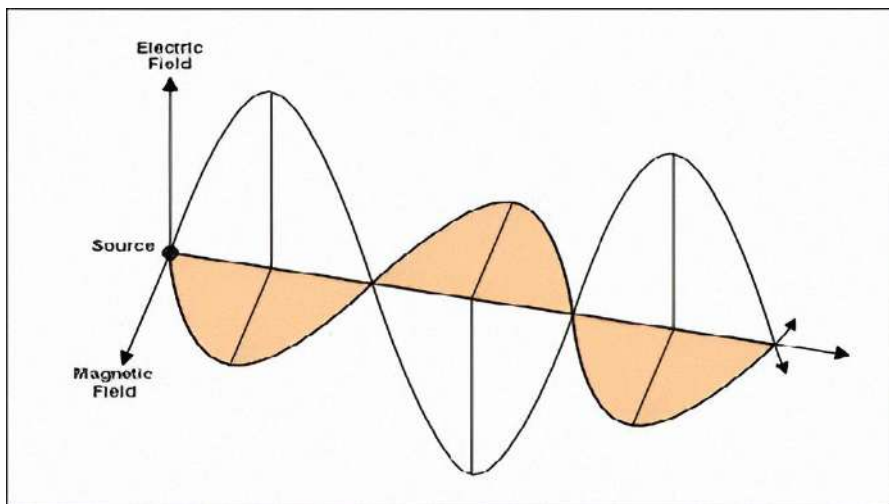
La complejidad de estos comportamientos, por un lado, provoca dificultad en la interpretación de la imagen, pero, por otro —y esto es lo realmente importante—, enriquece la información obtenida al introducir más matices. Distintas disciplinas lo utilizarán para desarrollar estudios e investigaciones 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 4).

Figura 4. 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 λ 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 con base en sus propiedades energéticas, siendo la siguiente la fórmula en que se basa:

$$Q = h * F$$

Donde Q es la cantidad de energía transportada por una onda, h es una constante (la constante de Planck), y F es la frecuencia. Al despejar F en la fórmula precedente y haciendo la sustitución correspondiente nos encontramos con la siguiente expresión:

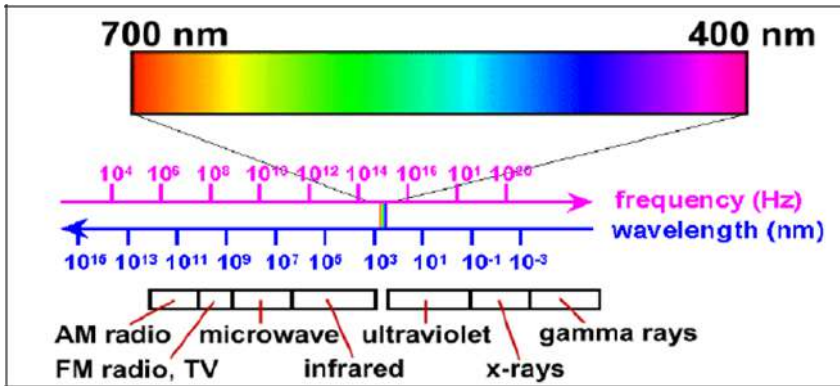
$$Q = h (c) / \lambda$$

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 del desarrollo tecnológico los sensores espaciales utilizan un rango de longitud de onda reducido que va desde el espectro visible de 0.4 a 0.7 μm hasta el rango de las microondas (es decir, ondas mayores a 1 mm), pasando por el punto medio del rango espectral infrarrojo, correspondiente al rango térmico medio (10-12 μm) usado en detección de temperatura superficial (figura 5).

Por otro 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 gases tienen un efecto absorbente, bloqueando el camino de las ondas en determinadas zonas de la tierra del espectro.

Figura 5. El espectro electromagnético



Fuente: Pérez y Muñoz (2006).

Formación de la imagen multispectral

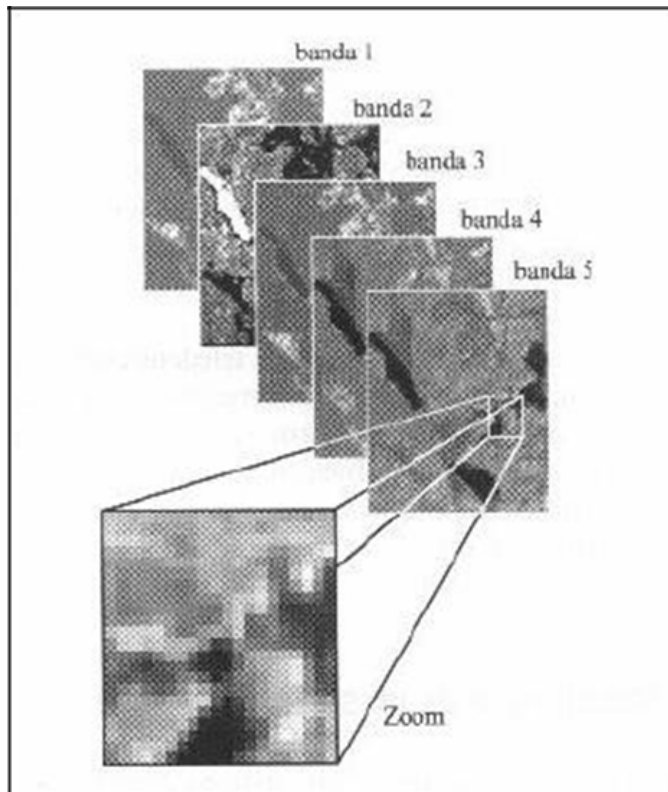
Las imágenes se adquieren a bordo de los satélites utilizando una serie de fotodetectores que convierten las mediciones de radiación del suelo en mediciones numéricas denominadas *niveles digitales*. Por tanto, el valor del nivel digital correspondiente a un píxel es proporcional a la intensidad de la 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 fue como nació el concepto de *imágenes multispectrales*.

El número de bandas espectrales en un sensor remoto varía considerablemente dependiendo de su diseño y finalidad. Por ejemplo, el satélite SPOT (Satélite Para la Observación de la Tierra) opera con cuatro bandas; Landsat, con siete, y NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica), con cinco. 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 hiperespectrales que son capaces de discriminar entre diferentes materiales y condiciones ambientales con gran precisión. Los sensores hiperespectrales, 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 6).

Figura 6. Formación de la imagen multispectral



Fuente: Pinilla (s. f.).

1.8 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, una superficie con 0.1 tiene 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 sólo 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 transportando luego 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, envolventes de edificios, modifican el microclima en el que se ubican, aumentando las temperaturas del aire y de la radiación media, 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, en comparación 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 (EPA, 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 lleva a reducir el consumo energético y la demanda eléctrica por refrigeración con aire acondicionado durante el verano, además de un aumento en confort térmico de la edificación; a 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, disminuyen la necesidad de sistemas mecánicos de enfriamiento, mejorando el confort del entorno y dificultando 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 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 es reflejada de regreso a la atmósfera, debido a la presencia de nubes; otra permanece en la atmósfera a causa de los gases de efecto invernadero, y el resto escapa a la superficie (EPA, 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 (EPA, 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, contribuyen al calentamiento, puesto que están compuestas de vapor de agua condensado, que retiene el calor.

La US Environmental Protection Agency (EPA, 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; no obstante, 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.

1.9 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 de 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 básicos como distancia, interacciones espaciales, conexiones espaciales, polarización, entre otros; utilizando geostatísticas 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; por ejemplo: Landsat TM, Landsat ETM+, AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer); MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer); ASTER (Autonomous Satellite Technology for Resilient Applications), y GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). 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.

1.10 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; esto, como expresión de la modificación del clima regional, a partir de la comprensión de los elementos que permiten su aparición y el equilibrio que guardan dichos elementos, para después dar paso a la explicación de su principal indicador, que son las islas de calor. El soporte teórico del fenómeno de las 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 determinado.

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 para extraer, en seguida, 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 ICU 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 ICU, 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 dos 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 ICU. 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

ICU, 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, el modelo sectorial y el polinuclear, que describen la diferenciación interna de las ciudades.

2. 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, puesto 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: (a) extracción y procesamiento de información de percepción remota; (b) generación y análisis de información de cambio de uso de suelo; (c) análisis espacial e intensidad de las islas de calor; (d) análisis de resultados y (e) conclusiones.

2.1. Descripción de la zona de estudio

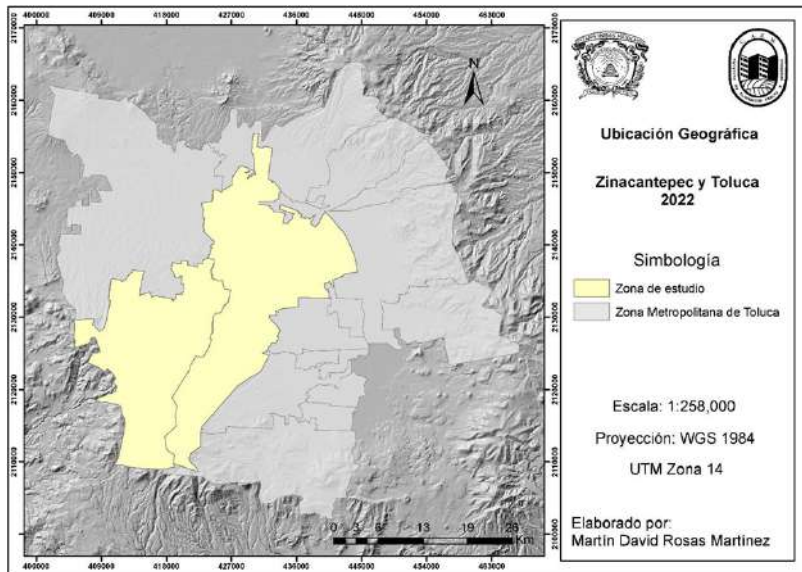
La zona metropolitana de Toluca (ZMT) se sitúa en la región central del país, dentro del Estado de México, abarcando las coordenadas geográficas comprendidas entre 19°34'58"N, 99°31'49"W y 19°04'29"N, 99°50'47"W. Esta zona metropolitana se encuentra a una altitud que varía entre los 2 600 y los 3 000 metros sobre el nivel del mar (msnm). Según los datos proporcionados por el Sistema Estatal de Información Metropolitana (SEIM), la ZMT posee una extensión territorial de 2 410.5 km², 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 (Secretaría de Desarrollo Social [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; posteriormente, la economía de la región se diversificó hacia el sector terciario, logrando una expansión considerable hacia los municipios periféricos (Gobierno del Estado de México / Consejo Estatal de Población [COESPO], 2012).

En el contexto de la zona metropolitana de Toluca, se seleccionaron los municipios de Toluca y Zinacantepec (figura 7) como objetos de estudio; en ellos se han observado significativos cambios en el uso del suelo. Estos cambios han sido propiciados por la instalación de corredores industriales, así como la construcción de fraccionamientos y conjuntos habitacionales. Como consecuencia, ambos municipios han experimentado un notable crecimiento tanto en superficie urbana como en población, así como 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 7. 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 un acelerado cambio de uso de suelo. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), la población total del municipio de Toluca fue de 819 561, mientras que para el año 2020 la población aumentó 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; para el año 2020 estas pasaron a conformar un total de 239 805 viviendas habitadas, de las cuales 239 734 era viviendas particulares, y 71, vivienda colectiva.

Por su parte, la población total del municipio de Zinacantepec fue de 167 759 habitantes, para el año 2010, mientras que para el año 2020 se

registró un aumento hasta los 203 872 habitantes; el municipio contaba con un total de 37 665 viviendas habitadas durante el año 2010, de las cuales 37 660 eran viviendas de tipo particular y cinco de tipo colectivas; lo que para el año 2020 aumentó a 48 816 viviendas habitadas, de las cuales 48 807 se registraron como viviendas particulares, y nueve como viviendas de tipo colectivo.

2.2. Materiales y método

Para llevar a cabo la investigación de islas de calor superficial es necesaria 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 la tabla 5 y se detallan con mayor profundidad posteriormente.

Tabla 5. *Diseño de la investigación*

<i>Fase de investigación</i>	<i>Técnica de investigación</i>	<i>Instrumento de investigación</i>	<i>Fuente</i>
1. 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).
2. 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.
3. Elaboración de cartografía de superficie artificial.	Georreferenciación y digitalización.	Sistema de información geográfica ArcGIS 10.8.2.	IGECM Mapas de ocupación del territorio.
4. Relación de variables y factores de estudio.	Análisis espacial y regresión lineal.	ArcGIS 10.8.2 IBM SPSS Statistic 22.	Cartografía y gráficas elaboradas.
5. Conclusiones.	Análisis.	Investigación realizada.	Propia.

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Datos para condiciones atmosféricas

Se analizará el fenómeno de las islas 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 de 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 et al., 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 (tabla 6).

Tabla 6. Fechas de estudio con condiciones anticiclónicas

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

Fuente: Elaboración propia.

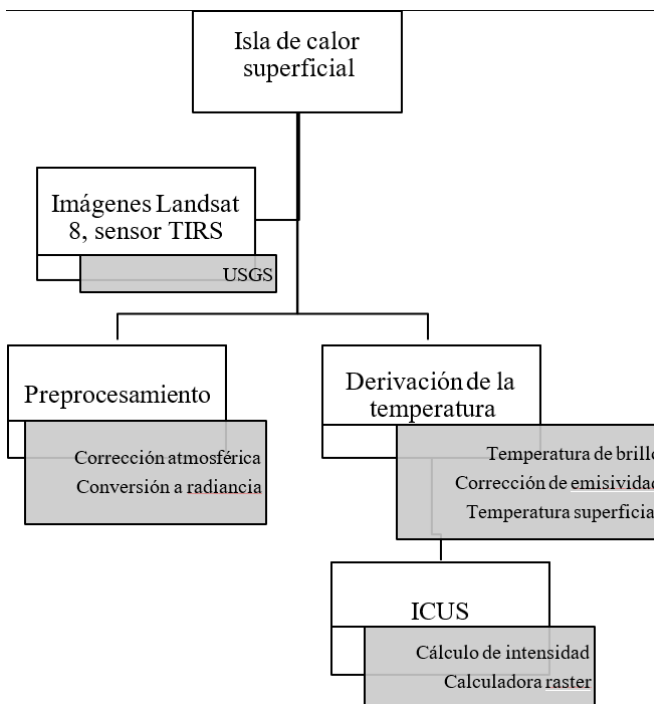
2.4. Datos y procesos para temperatura superficial

Para identificar la isla de calor urbana superficial es necesario derivar la temperatura de la superficie, la cual se obtiene de cuatro 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, dando como resultado una imagen

digital ortorectificada (Servicio Geológico de los Estados Unidos [USGS], 2015). Para la derivación de la temperatura se utilizarán las bandas del infrarrojo térmico entre 10 y 12 μm (banda 10 y 11), y se procesarán en el software ArcGIS 10.8.2.

La figura 8 muestra las etapas de integración de los métodos requeridos para el procesamiento de imágenes satelitales y la adquisición de ICUS.

Figura 8. 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, puesto 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 lo 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 Chuvieco (2002, citado en 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 flujo 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_{λ} es la radiancia espectral TOA (Watts/ (m² * 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 (ND) (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 et al., 2009) (fórmula 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_{λ} es la radiación espectral TOA (Watts/ (m² * srad * μm)); K_1 es la constante de conversión térmica de la banda específica (B10 = 774.89, B11 = 480.89 Wm⁻²sr⁻¹ μm⁻¹), 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 (Normalized Emisivity Method), 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 fórmula 3 (Jiménez-Muñoz et al., 2003).

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

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} 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 (fórmula 4).

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

La temperatura de la superficie se encuentra en kelvin (K), por lo que se transformará a grados Celsius (°C) restando 273.15. A partir de la imagen térmica y mediante el uso del programa 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, dando como resultado los valores de intensidad de la ICU.

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 clasificaron como islas de calor negativas.

2.5. 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 geoestadísticas básicas (AGEBS), desarrollados por el INEGI en el 2022; 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. Así mismo, se utilizó 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 la tabla 7.

Tabla 7. Descripción de las categorías utilizadas en la superficie artificial

<i>Superficie artificial</i>	
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).

En seguida se realiza el análisis con el software ArcGIS 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 (tabla 8).

Tabla 8. *Clasificación de la superficie artificial por intensidad de antropización*

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

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

2.6. 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, particularmente, de 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 etapas: (a) 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; (b) 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 para el año 2022; (c) 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 de cómo están siendo sus intensidades; finalmente, en las etapas cuatro y cinco (d) se detalla el análisis de resultados y (e) se plantean las 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 Estados Unidos, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) y los Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Korolev, 1999, citado en Kazakov, 2020).

3. Ejemplo de aplicación del análisis de islas de calor urbanas superficiales

Este capítulo ilustra la aplicación práctica de la metodología delineada en los capítulos anteriores, centrándose en la detección y evaluación de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) en un contexto específico de expansión metropolitana. Para ello, se toma como referencia el estudio detallado realizado en los municipios de Toluca y Zinacantepec, pertenecientes a la zona metropolitana de Toluca, durante el año 2022. Este ejemplo no sólo valida la utilidad de las técnicas de percepción remota y análisis espacial para mapear variaciones térmicas estacionales, sino que también resalta las interacciones entre patrones de uso del suelo y la intensidad del calentamiento superficial, ofreciendo hallazgos valiosos para la planificación urbana sustentable. En particular, los hallazgos aquí sintetizados derivan de un análisis exhaustivo previamente publicado, en el que se emplearon imágenes satelitales Landsat 8 para estimar temperaturas superficiales y correlacionarlas con coberturas artificiales, revelando patrones estacionales donde el efecto es más marcado en verano a causa de la acumulación de radiación en zonas industriales y de baja vegetación, en contraste con áreas de mayor cobertura arbórea que actúan como reguladores térmicos (Rosas Martínez y Adame Martínez, 2025). A partir de esta base empírica, se explora la identificación de áreas críticas, la evaluación de influencias urbanas y las implicaciones para estrategias de mitigación, sin reproducir cartografía detallada con el fin de enfatizar la replicabilidad metodológica en diversos entornos metropolitanos.

El objetivo principal del estudio fue identificar áreas específicas altamente afectadas por el fenómeno de las ICUS, evaluar cómo diversas superficies urbanas influyen en la intensidad térmica de la zona y proporcionar información detallada y útil para implementar estrategias efectivas de mitigación. Este análisis también contempló diferentes variables ambientales y urbanísticas relevantes.

3.1 Identificación y clasificación exhaustiva de superficies artificiales

El análisis comenzó con una clasificación integral del uso de suelo, usando imágenes satelitales avanzadas, herramientas de percepción remota y análisis espacial. Esta clasificación distinguió claramente entre superficies artificiales impermeables (asfalto, concreto, edificios, áreas pavimentadas) y superficies permeables naturales (parques, jardines urbanos, cuerpos de agua y tierras agrícolas).

El estudio reveló que las áreas con mayor concentración de superficies impermeables correspondieron predominantemente a núcleos urbanos densos, zonas industriales, comerciales y grandes avenidas vehiculares. Estas superficies destacaron por su capacidad elevada de almacenamiento térmico, su baja reflectancia solar y su limitada capacidad para liberar el calor acumulado, facilitando la formación de ICUS.

3.2 Análisis temporal detallado de temperatura superficial

El estudio se realizó empleando imágenes satelitales Landsat, obtenidas en cuatro fechas distintas correspondientes a las estaciones climáticas del año: primavera (26 de marzo), verano (30 de junio), otoño (12 de octubre) e invierno (29 de enero). Cada imagen fue procesada mediante técnicas avanzadas de teledetección, para obtener mapas precisos y detallados de temperatura superficial.

Los resultados mostraron notables variaciones térmicas estacionales, detalladas a continuación:

- *Primavera*: Las áreas céntricas urbanas presentaron temperaturas máximas cercanas a los 36 °C, significativamente superiores a los 24 °C registrados en áreas naturales y cuerpos de agua, mostrando cómo la urbanización incrementa la absorción y retención térmica.
- *Verano*: Esta estación mostró la mayor intensidad de ICUS, con temperaturas máximas récord de hasta 42 °C en las zonas más densamente urbanizadas, especialmente en áreas con intensa actividad comercial e industrial, así como alta concentración poblacional. La radiación solar acumulada intensificó considerablemente las diferencias térmicas urbanas-rurales.
- *Otoño*: Se observó una ligera disminución de las temperaturas máximas superficiales, alcanzando valores alrededor de 35 °C en zonas urbanizadas. Aunque la diferencia con áreas naturales disminuyó, la presencia de vegetación mantuvo claramente su papel esencial en la regulación térmica.
- *Invierno*: Las temperaturas superficiales máximas en las áreas urbanas disminuyeron hasta los 29 °C; aunque continuaron siendo considerablemente mayores que los 18 °C registrados en las áreas naturales circundantes, hacen evidente la persistencia del fenómeno de ICUS, incluso durante épocas más frías.

3.3 Análisis espacial profundo de la distribución de ICUS

La elaboración detallada de mapas térmicos mediante imágenes satelitales permitió visualizar con precisión la distribución espacial de las ICUS. Este análisis espacial reveló patrones claros y recurrentes: las áreas centrales urbanizadas, los corredores industriales, las grandes avenidas y las zonas comerciales presentaron consistentemente altas temperaturas superficiales, confirmando una relación directa entre urbanización intensiva y calentamiento urbano.

Además, la presencia de espacios verdes, parques urbanos y cuerpos de agua mostraron temperaturas constantemente más bajas, resaltando la importancia crítica de estos espacios en la mitigación térmica y como elementos fundamentales en la planificación urbana para reducir el fenómeno de las ICUS.

3.4 Discusión profunda y estrategias para la mitigación de ICUS

El ejemplo desarrollado destaca cómo el uso adecuado y riguroso de metodologías previamente descritas permite identificar detalladamente áreas afectadas y entender en profundidad el fenómeno de las ICUS. La información obtenida es vital para la toma de decisiones estratégicas en urbanismo y gestión ambiental.

Se destaca la importancia crítica de implementar soluciones integradas y efectivas, como aumentar considerablemente la cobertura vegetal en las ciudades, adoptar materiales constructivos innovadores con alta reflectancia solar, rediseñar la infraestructura urbana para reducir áreas impermeables y desarrollar corredores verdes urbanos.

Finalmente, este ejemplo práctico no sólo facilita una comprensión profunda del fenómeno de ICUS, sino que proporciona una sólida base metodológica y práctica para futuros estudios en otras áreas urbanas, contribuyendo significativamente al desarrollo de políticas urbanas sustentables y efectivas que mitiguen el efecto de las ICUS y mejoren la calidad ambiental y la calidad de vida urbana.

Este caso práctico detallado demuestra la importancia fundamental de un análisis completo y exhaustivo de las ICUS como una herramienta crítica para promover ciudades resilientes frente al cambio climático, y mejorar la sustentabilidad urbana.

Referencias

- 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., y 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.
- Benavides, J. (2006). *Planeamiento urbano*. Universidad de Sevilla.
- Buzai, G. D. (1999). *Análisis espacial y sistemas de información geográfica*. Editorial de la Universidad Nacional de Quilmes.
- 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.
- Córdova 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., y Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 7, 25-30.
- Endro, E. (2016). *Bajo el gorro de la urbanización: el efecto de la isla de calor urbana en Chipre*. Boletín de Chipre.
- EPA (2013). *Reducing urban heat islands: Compendium of strategies*. U. S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/heatislands/heat-island-compendium>
- EPA (2020). *Estrategias de enfriamiento para las islas de calor*.
- Fedorkova, A., Viznyuk, A., et al. (2012). *Formation of "heat islands" in urban areas*.
- Fernández, F. (1995). *Manual de climatología aplicada. Clima, medioambiente y planificación*. Síntesis.

- Fernández, F., y Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista de Estadística y Sociedad*, 50, 21-24.
- Flores, L. (2020). *Efecto de las islas de calor en la estructura urbana*.
- García-Cueto, O., Jáuregui-Ostos, E., Toudert, D., y 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.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. Earthscan Press.
- Gaviria, S. A. (2020). *La influencia del albedo en el microclima de patios: Mitigación del efecto isla de calor urbana* [Tesis de Máster Inédito]. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Gillespie, A. R. (1985). *Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS*. The TIMS Data User's Workshop.
- Godínez Tovar, A. G., y 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*.
- Gómez, F. (1985). *La radiación solar y la contaminación atmosférica en la ciudad*.
- Goodchild, M. F., y Haining, R. P. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. *Investigaciones Regionales*, 6, 175-201.
- Hicham, B., Mastouri, H., y Radoine, H. (2020). Review of methods for retrieving urban heat islands. *Materials Today: Proceedings*, 27, 3004-3009.
- 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. <https://igecem.edomex.gob.mx/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Marco Geoestadístico*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Jensen, J. R. (2014). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Education.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Gillespie, A., y 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, A., Fernández, F., Arroyo, F., Martín, J., y Cuadrat, J. M. (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Cátedra.
- McCartney, H. A., y Mehta, K. N. (2020). *Urban heat islands and public health*.
- Méndez, C. C. M., et al. (2011). *Estudios sobre islas de calor urbanas*.
- Mirzaei, P. A., y Haghighat, F. (2010). Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. *Building and Environment*, 45(10), 2192-2201.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.
- Pérez, C., y Muñoz, A. L. (2006). *Teledetección: Nociones y aplicaciones*. Carlos Pérez.

- 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.
- Romero, H., y Sarricolea, P. (2006). *El uso de la teledetección en el análisis de las islas de calor urbanas*.
- Romero, H., Salgado, M., y 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>
- Rosas Martínez, M. D., y Adame Martínez, S. (2025). Islas de calor urbana superficiales en Toluca y Zinacantepec, estado de México en 2022. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, (17). <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i16.299>
- Rosas Martínez, M. D., y Adame Martínez, S. (2025). Islas de calor urbana superficiales en Toluca y Zinacantepec, estado de México en 2022. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (17). <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i16.299>
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... y Zhu, Z. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*.
- Sarricolea Espinoza, P., y Romero Aravena, H. (2010). Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso. *ACE: Arquitectura, Ciudad Y Entorno*, 5(14).
- Servicio Geológico Mexicano (2020). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*. [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion SIG.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion%20SIG.html)
- Solé, R. (2021, julio 22). *La "máquina" de la isla de calor está a pleno rendimiento*. Tiempo.com.
- Streutker, D. R. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, 85(3), 282-289.
- Tan, J., Zheng, Y., Song, G., Kalkstein, L. S., Kalkstein, A. J., y Tang, X. (2010). Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003. *International Journal of Biometeorology*, 54(1), 75-84.
- Tejedor, E., et al. (2016). *La influencia de la urbanización en la formación de islas de calor*.
- Voogt, J. A. (2008). Urban Heat Island. En T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, y J. A. Voogt (eds.), *Urban Climates* (51-79). Cambridge University Press.
- Voogt, J. A., y Oke, T. R. (1997). Temperature measurement in urban heat islands. *Journal of Urban Climate Studies*, 5(3), 123-145.
- Zárate, A. (2012). *Geografía urbana: Dinámicas locales, procesos globales*. Editorial Centro de Estudios Ramón Areces.

Sobre los autores

Fermín Carreño Meléndez

Investigador y académico con formación en Economía y Urbanismo. Es doctor en Urbanismo por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y maestro en Pedagogía Crítica, con formación doctoral adicional en Pedagogía Crítica y Educación Popular. Actualmente se desempeña como profesor-investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), donde ha sido director de la facultad de Planeación Urbana y Regional. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel I y participa activamente en redes académicas como la Red de Investigadores por la Sustentabilidad (Redis) y la Red Internacional de Investigadores sobre Problemas Socio-Urbanos y Ambientales (RIIPSURA).

Su trabajo se centra en la *sustentabilidad*, la *ecología política* y las *dinámicas territoriales en contextos urbanos y rurales*, articulando marcos teóricos críticos con análisis empíricos aplicados. Entre sus contribuciones más recientes destaca el capítulo “La sustentabilidad urbana” (2022), coeditado con David Iglesias Piña y Luis Alberto Olín Fabela; el capítulo “Las determinaciones territoriales y el discurso de la ‘sustentabilidad’” (2022); la coautoría de *La vulnerabilidad social por inundaciones en México* (2023), y el capítulo “La sustentabilidad: un concepto para alcanzar el desarrollo” (2023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6485-1053>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=ePIDCicAAAAJ&hl=es>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Fermin-Carreno-Melendez-2201239722>

Academia.edu: <https://independent.academia.edu/FerminCarre%C3%B1oMelendez>

Martín David Rosas Martínez

Investigador especializado en Ciencias Ambientales y Estudios Urbanos. Es licenciado en Ciencias Ambientales y maestro en Estudios de la Ciudad por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), donde también cursa estudios de doctorado en Sustentabilidad para el Desarrollo. Su trabajo aborda las interacciones entre procesos ambientales urbanos y estructuras territoriales, con un enfoque metodológico en sistemas de información geográfica y análisis espacial para comprender fenómenos socioambientales contemporáneos. Entre sus aportaciones más recientes se encuentra el artículo “Islas de calor urbana superficiales en Toluca y Zinacantepec, Estado de México en 2022” (2025), publicado en la revista *Vivienda y Comunidades Sustentables*.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5746-6110>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=zhLLcAcAAAAJ>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Martin-David-Rosas-Martinez?ev=hdr_xprf

*Metodología y aplicación del estudio de islas
de calor urbanas superficiales*, de Fermín Carreño
Meléndez y Martín David Rosas Martínez, publicado
por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se
terminó de imprimir en mayo de 2026, Litográfica Ingramex, S. A.
de C. V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de Méxi-
co. El tiraje fue de 100 ejemplares impresos y en versión digital para acceso
abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML. El cuidado de la edición estuvo a
cargo de Darío Escalante.

El fenómeno de las islas de calor urbanas (ICU) representa una de las principales alteraciones microclimáticas derivadas de la urbanización acelerada, manifestándose como un incremento sostenido de la temperatura en áreas urbanas respecto a sus entornos rurales. Este proceso, identificado desde el siglo XIX, se ha convertido en una característica generalizada de las ciudades modernas con alta densidad poblacional y predominio de superficies impermeables. Las ICU no constituyen un efecto secundario del crecimiento urbano, sino la expresión de un desequilibrio en el balance energético superficial provocado por la sustitución de coberturas naturales por materiales con alta capacidad de absorción térmica y baja evapotranspiración, así como por condiciones atmosféricas que favorecen la acumulación de calor.



Fermín Carreño Meléndez es Doctor en Urbanismo por la UNAM y Doctor en Pedagogía Crítica por el Instituto Peter McLaren. Perteneció al SNII, nivel I. Profesor-investigador adscrito a la Facultad de Planeación de la UAEMex y Presidente del Consejo Consultivo para la reforma de Ley de la UAEMex. Es miembro del Cuerpo Académico Consolidado Desarrollo Sustentable, Sociedad y Ambiente.



Martín David Rosas Martínez es Licenciado en Ciencias Ambientales y Maestro en Estudios de la Ciudad por la UAEMex. Actualmente cursa el Doctorado en Sustentabilidad para el Desarrollo en la misma institución, donde su investigación se enfoca en las islas de calor urbanas, la ecología política del territorio y los conflictos socioambientales. Se desempeña como Subdirector Administrativo del Centro de Estudios e Investigación en Desarrollo Sustentable (CEDES-UAEMéx).



Dimensions



2000922



DOI.ORG/10.52501/CC.419



EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA PUBLICACIONES
ARBITRADAS

comunicacion-cientifica.com

ISBN: 978-968-9738-72-5



9 789689 738725