

Aké Turriza, K.A., y Rivera-Arriaga, E. 2025. Islas de calor urbanas bajo escenarios de cambio climático. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 67-94. doi 10.26359/52462.0705.



# Artículo de revisión: Islas de calor urbanas bajo escenarios de cambio climático

## Review article: Urban heat islands under climate change scenarios

*Karianna A. Aké Turriza<sup>1,\*</sup> y Evelia Rivera-Arriaga<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Posgrado Multidisciplinario para el Manejo de la Zona Costero-Marina, Instituto EPOMEX  
Universidad Autónoma de Campeche

<sup>2</sup>Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX),  
Universidad Autónoma de Campeche

\* autor de correspondencia: al041220@uacam.mx

---

doi 10.26359/52462.0705

Recibido 15/enero/2025. Aceptado 20/abril/2025

*JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático*

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



### **Resumen**

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan un fenómeno estudiado y documentado en el contexto del cambio climático y la urbanización. Este artículo de revisión ofrece una visión de la caracterización de las ICU en el contexto de los escenarios de cambio climático, destacando elementos como la variabilidad climática, la vulnerabilidad urbana y las estrategias de mitigación. Se analizan los progresos en la comprensión de las ICU, incluyendo investigaciones recientes sobre su dinámica y efectos a largo plazo. Se exploran medidas para abordar esta problemática en entornos urbanos, como el diseño urbano sostenible, el aumento de áreas verdes y la promoción de tecnologías de enfriamiento urbano. En esta revisión se abordan los estudios realizados sobre las Islas de Calor Urbanas, de los últimos 14 años; dando un total de 119 publicaciones relacionadas sobre la temática que han contribuido significativamente a la comprensión de las ICU, proporcionando nuevas perspectivas sobre su dinámica, impactos y posibles soluciones.

**Palabras claves:** Islas de Calor Urbanas (ICU), cambio climático, urbanización, ciudades sostenibles, riesgos.

### **Abstract**

Urban Heat Island (UHI) represents a phenomenon studied and documented in the context of climate change and urbanization. This review article offers a view of the characterization of ICUs in the context of climate change scenarios, highlighting elements such as climate variability, urban vulnerability and mitigation strategies. Progress in understanding ICUs is discussed, including recent research on its dynamics and long-term effects. Measures are explored to address this problem in urban environments, such as sustainable urban design, increasing green areas and promoting urban cooling technologies. This review addresses the studies carried out on Urban Heat Islands over the last 14 years; giving a total of 119 related publications on the subject that have contributed significantly to the understanding of ICUs, providing new perspectives on their dynamics, impacts and possible solutions.

**Keywords:** Urban Heat Islands (UHI), climate change, urbanization, sustainable cities, risks.



## Introducción

La creciente urbanización y el cambio climático son temas interrelacionados que moldean el paisaje de nuestras ciudades modernas, planteando problemáticas para la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida urbana. En este contexto, según Soltani, y Sharifi (2017) las Islas de Calor Urbano (ICU) emergen como un fenómeno de importancia, caracterizado por áreas dentro de los entornos urbanos que experimentan temperaturas notablemente más altas que sus alrededores. Estas ICU no sólo afectan el confort térmico de los residentes urbanos, sino que también conllevan implicaciones significativas para la salud pública, el consumo de energía y la calidad del aire.

Varios investigadores han destacado los efectos de la (ICU) y su impacto en las áreas urbanas. Estudios realizados por Oke *et al.* (2017), Buyadi *et al.* (2013) y Kabisch *et al.* (2023) destacan cómo la configuración urbana y la densidad de construcción contribuyen al aumento de la temperatura en el centro de las ciudades en comparación con las zonas rurales circundantes. La falta de áreas verdes y la canalización de cursos de agua en entornos urbanos exacerbando aún más este fenómeno.

La geometría urbana, la actividad humana y los factores meteorológicos son determinantes en la formación de la ICU, como lo señalan Erell *et al.* (2011), García (1990) y Taleb y Abu-Hijleh (2013). La absorción de radiación, la reflexión de la radiación por edificios altos y las emisiones contaminantes derivadas de la urbanización son factores clave.

Las Islas de Calor Urbanas no solo tienen implicaciones en el clima local, sino que también afectan la salud y el bienestar de la población urbana. Según Villanueva *et al.* (2013), el aumento en el consumo de energía eléctrica para combatir el calor contribuye a la emisión de gases contaminantes, exacerbando así los efectos nocivos de la ICU.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) señala que la ICU intensa durante olas de calor representa un riesgo adicio-

nal para la salud pública, especialmente para las personas mayores o enfermas (Martín-Vide *et al.*, 2016). En un contexto de cambio climático, donde las temperaturas extremas son más frecuentes, es importante abordar estos riesgos para mitigar sus impactos adversos en los sistemas humanos y naturales.

Para abordar estas problemáticas, se han propuesto diversas estrategias de mitigación de la Isla de Calor Urbano. Aliviar el efecto isla de calor urbano es de gran importancia para mejorar el confort térmico, el ahorro de energía y la reducción de carbono, y lograr un desarrollo urbano sostenible (Hong *et al.*, 2023). Métodos como la ecologización de tejados y la pavimentación reflectante se han destacado como eficaces para reducir la temperatura y mitigar los impactos de la ICU (Schneider *et al.*, 2023).

En resumen, la comprensión de los factores que contribuyen a la formación de la Isla de Calor Urbano y su relación con el cambio climático es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de adaptación y mitigación que protejan la salud y el bienestar de las comunidades urbanas. Este artículo busca explorar exhaustivamente la caracterización de las ICU en el contexto del cambio climático y la urbanización, así como abordar estrategias de adaptación y mitigación basadas en evidencia científica (Brenner *et al.*, 2023).

El propósito fundamental de esta de revisión es explorar de manera exhaustiva la caracterización de las ICU en el contexto del cambio climático y la urbanización, así como abordar estrategias de adaptación y mitigación, resumir los resultados de investigaciones previas sobre las ICU, destacando las tendencias observadas, los factores de influencia y las estrategias de mitigación y adaptación propuestas.

Este artículo cuenta con un claro objetivo de carácter descriptivo-exploratorio, que consiste en sintetizar y comparar los resultados de investigaciones previas sobre las ICU. El propósito es proporcionar



una visión amplia y actualizada de las ICU, con el fin de informar y orientar futuras investigaciones y

acciones en el ámbito de la planificación urbana y la gestión ambiental.

## Metodología

### Método

Con el fin de alcanzar el objetivo mencionado, se han aplicado ciertos criterios de búsqueda y de inclusión para elegir los estudios que han sido incorporados en esta revisión. A continuación, se detallan ambos criterios.

### Estrategia de búsqueda

En esta sección se examinan los métodos utilizados para buscar la literatura relevante, reconociendo que ningún método de búsqueda puede ser completamente exhaustivo debido a las numerosas variables que restringen la capacidad para acceder a toda la información publicada.

Se usaron tres técnicas de búsqueda para la obtención de los artículos científicos originales (fuentes primarias de datos), los cuales posteriormente se pasaron por el filtro de los criterios de inclusión (figura 1).

- Búsquedas en bases de datos bibliográficas. Se realizó una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos nacionales e internacionales, específicamente en Springer, DOAJ y World Wide Science, con el objetivo de rastrear bibliografía y acceder a las fuentes primarias de información.
- Las palabras clave utilizadas fueron: Islas de Calor Urbanas (ICU), cambio climático, urbanización, ciudades sostenibles, riesgos.
- Búsquedas en motores de búsqueda. Se llevaron a cabo exploraciones en motores de búsqueda, incluyendo Google Académico, empleando las mismas palabras clave. También se realizó una búsqueda por autor y título de aquellos artículos que no estaban disponibles en su totalidad en las bases de datos.

### Criterios de inclusión

Una vez que se obtuvieron los resultados de las búsquedas utilizando las tres técnicas mencionadas anteriormente, todos los artículos fueron sometidos a un proceso de filtrado. Sólo se incluyeron en la revisión aquellos estudios que cumplieran con los criterios siguientes:

- Acceso completo al artículo científico: Se priorizó el acceso completo al artículo para garantizar la disponibilidad de toda la información relevante, como el número y características de los participantes, el diseño del estudio, el país de realización y los resultados obtenidos.
- Focalización en el fenómeno de las islas de calor urbano: Se incluyeron investigaciones que se centren en la caracterización de las islas de calor urbano, así como en el desarrollo y evaluación de estrategias para mitigar sus efectos en el entorno urbano. Se excluyeron investigaciones que no estuvieran directamente relacionadas con este tema.
- Relevancia de los datos proporcionados: Se priorizaron los estudios que ofrecieran datos relevantes sobre la formación, distribución y efectos de las islas de calor urbano, así como medidas de adaptación y mitigación. Se excluyeron investigaciones basadas únicamente en modelos teóricos sin datos empíricos.
- Practicidad de las recomendaciones: Se incluyeron investigaciones que ofrecieran recomendaciones prácticas para mitigar los efectos de las islas de calor urbano a nivel local y global. Se excluyeron investigaciones que no proporcionaran orientación basada en evidencia sobre métodos específicos para mitigar este fenómeno.

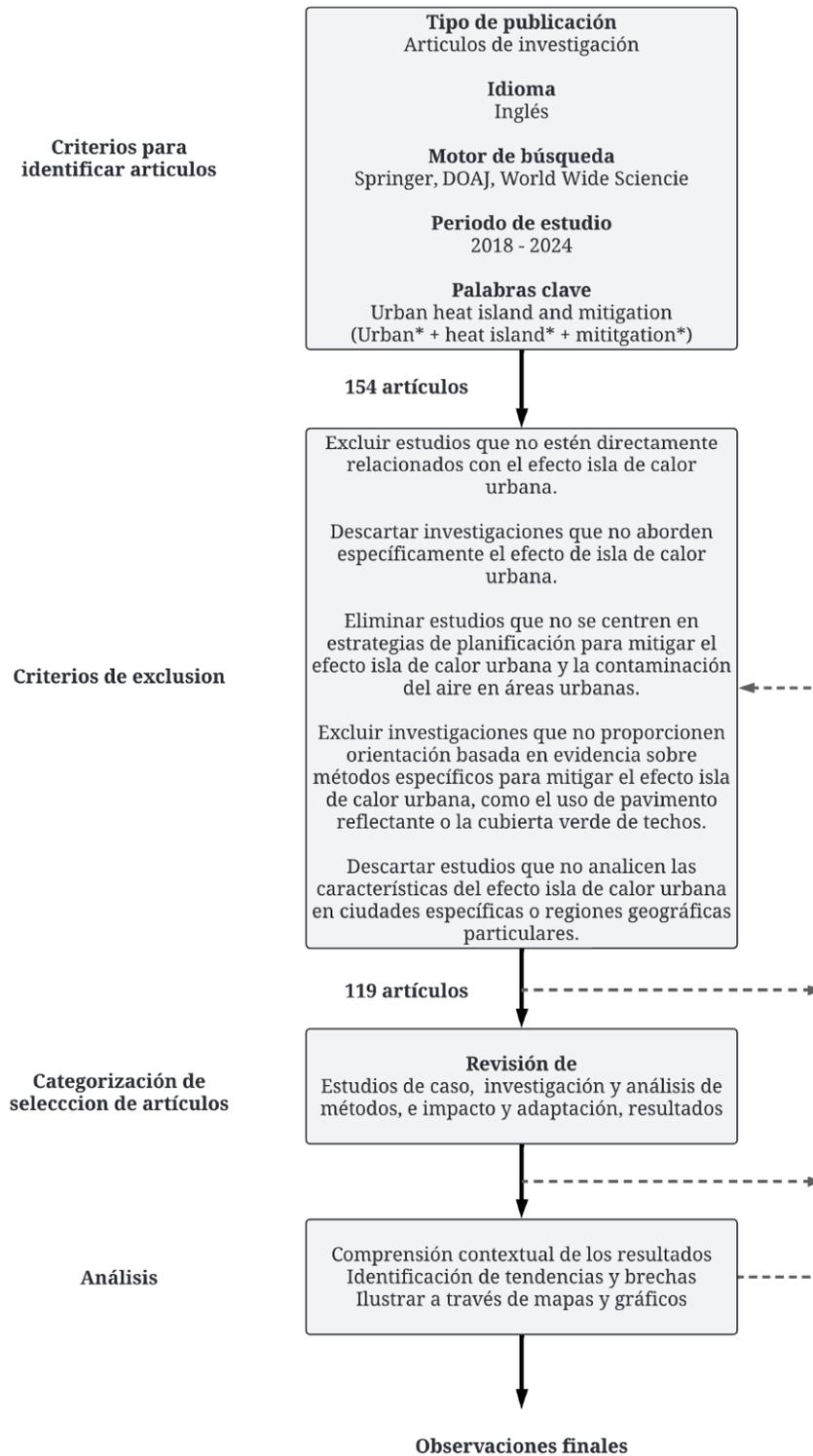


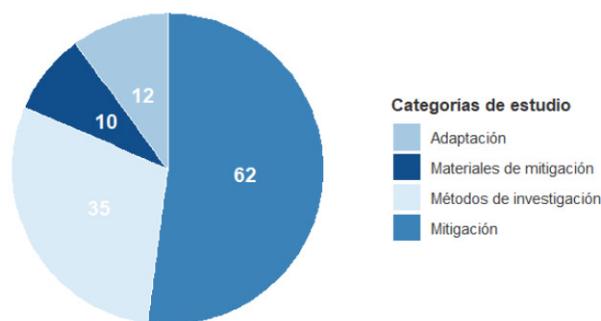
Figura 1. Análisis para la revisión de estudios de islas de calor. Fuente: Elaboración propia.





### Distribución de artículos por tema en el estudio de Islas de Calor

Cantidad de artículos científicos por tema



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de revisión

**Figura 3.** Distribución de artículos por tema en el estudio de Islas de Calor. Fuente: Elaboración propia.

cación de emergencia y las políticas públicas orientadas a reducir la vulnerabilidad al calor extremo.

- **Mitigación: 62 artículos.** La mayor parte de la investigación se dedica a estrategias de mitigación, que buscan reducir la intensidad y la extensión de las islas de calor. Entre las estrategias más comunes se encuentran la implementación de techos verdes, pavimentos fríos, aumento de la vegetación urbana y el uso de materiales reflectantes en las construcciones.
- **Materiales de mitigación: 10 artículos.** Estos estudios investigan materiales específicos que pueden ser utilizados para reducir las tempe-

raturas en áreas urbanas. Se analizan materiales innovadores para techos y pavimentos, así como pinturas y revestimientos con alta reflectancia solar.

Además, se han identificado varios factores clave que influyen en la efectividad de las estrategias de mitigación, tales como el clima local, la densidad urbana y las características socioeconómicas de las áreas afectadas. La colaboración internacional ha sido esencial para avanzar en este campo, permitiendo el intercambio de conocimientos y experiencias entre diferentes regiones y contextos climáticos.

## Resultados

### Cambio climático

#### Definición de cambio climático

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se refiere a una alteración en las condiciones del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que modifica la composición de la atmósfera mundial y se suma a

la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Esta definición se complementa con la aportación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que lo describe como una transformación discernible en las condiciones climáticas, originada por cambios en el valor promedio y la variabilidad de características climáticas, y que se



mantiene a lo largo de períodos extensos, normalmente medidos en décadas o incluso siglos.

Según Miller (2007), el cambio climático a nivel mundial abarca alteraciones en cualquier componente del clima terrestre, incluyendo elementos como la temperatura, los patrones de lluvia, la intensidad de las tormentas y sus trayectorias.

### **Impacto del Cambio Climático en los Sistemas Globales**

El fenómeno del cambio climático, influenciado por la actividad humana, se manifiesta en sus impactos en los sistemas físicos y biológicos a nivel global. Principalmente, estos efectos se observan en cambios de temperatura, especialmente notables en las latitudes altas y medias del hemisferio norte. Sin embargo, evidencia creciente indica que también se producen efectos significativos en los patrones de precipitación y temperatura, sugiriendo que el cambio climático está teniendo repercusiones en una variedad de sistemas y sectores más allá de las regiones del hemisferio norte (Rosenzweig y Neofotis, 2013). Estos cambios remodelan los patrones espaciales y temporales de la energía y la humedad globales (Chi *et al.*, 2023).

### **Evidencia científica y proyecciones futuras del Cambio Climático**

Desde la década de 1950, se han observado cambios sin precedentes en los registros climáticos, incluyendo un calentamiento atmosférico, disminución de nieve y hielo, aumento del nivel del mar y concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). Este período, conocido como el Calentamiento de principios del siglo XX (ETCW), destaca como uno de los episodios más significativos en el registro climático histórico anterior al calentamiento reciente, proporcionando una comprensión importante de la variabilidad climática y sus implicaciones futuras (Hegerl *et al.*, 2018).

Los estudios científicos indican un incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos en las últimas cinco décadas, incluyendo altas temperaturas, olas de calor y pre-

cipitaciones intensas, con consecuencias potencialmente graves para la humanidad (IPCC, 2013). En los países en vías de desarrollo, los riesgos asociados al cambio climático están aumentando, representando un considerable porcentaje de su Producto Interno Bruto (PIB) (Buhr *et al.*, 2018).

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado la probabilidad de eventos extremos como olas de calor (Abatzoglou y Barbero, 2014). Informes como el del Banco Mundial en 2012 advierten sobre la posibilidad de un aumento de hasta 4°C en la temperatura promedio global para finales del siglo XXI, lo que podría resultar en eventos climáticos extremos como sequías severas e inundaciones significativas (Banco Mundial, 2012). Las publicaciones del IPCC también resaltan la urgencia de medidas adicionales de mitigación para frenar el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global a menos de 3°C, o incluso 5°C para el año 2100 (IPCC, 2014).

Este análisis destaca que los ciclos del cambio climático, históricamente más lentos, se están acelerando, en gran parte debido a la actividad humana que aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta acumulación de gases en la atmósfera contribuye al calentamiento global, causando un aumento en la temperatura media del planeta y exacerbando los impactos del cambio climático (Oliver Yébenes, 2024).

### **Vulnerabilidad al cambio climático**

El análisis de la vulnerabilidad es fundamental en el proceso de adaptación al cambio climático, ya que proporciona información importante para identificar las principales amenazas climáticas en un territorio específico y abordar las causas subyacentes que pueden aumentar los impactos en la sociedad. Los fenómenos extremos asociados al clima, como las olas de calor, sequías, inundaciones y ciclones tropicales revelan la vulnerabilidad tanto en los ecosistemas como en los sistemas humanos (CEPAL, 2014) (figura 4).



**Figura 4.** Factores que inciden en la vulnerabilidad de un sistema. (Fuente: Adaptado del IPCC, 2001).

La mayoría de los estudios sobre vulnerabilidad al cambio climático definen este concepto como una combinación de tres aspectos: la exposición de los sistemas a los fenómenos climáticos, la sensibilidad ante estas condiciones riesgosas y la capacidad de hacer frente a los impactos resultantes (CEPAL, 2014). Estas tres dimensiones permiten operativizar el concepto mediante indicadores tanto biofísicos como sociales, con el objetivo principal de cuantificar el fenómeno y establecer relaciones de causa y efecto entre eventos y recursos (Mussetta *et al.*, 2017). Por otro lado, los elementos que influyen en la vulnerabilidad frente al cambio climático están vinculados a la amenaza resultante de las modificaciones o fluctuaciones climáticas. Estos elementos incluyen el grado de exposición a una amenaza específica, la sensibilidad inherente de los sistemas naturales y humanos, y la capacidad de respuesta o adaptación de dichos sistemas. Esta capacidad de respuesta abarca recursos financieros, tecnológicos, así como habilidades organizativas y de planificación (Gutiérrez y Espinosa, 2010). En resumen, comprender la vulnerabilidad al cambio climático implica no solo reconocer los aspectos físicos y biológicos de los sistemas naturales, sino también considerar los factores socioeconómicos, políticos, culturales e institucionales que influyen en la capacidad de los sistemas humanos para enfrentar y adaptarse a los impactos climáticos adversos. Este enfoque integral es importante para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación en el contexto del cambio climático global.

#### **Caracterización del cambio climático**

El cambio climático ha sido objeto de intensa investigación, especialmente en la descripción de sus

efectos a través de registros de observación. Abatzoglou y Barbero (2014) señalan que los análisis se centran en cambios en condiciones medias, como la temperatura anual, así como en medidas estadísticas que abarcan desde la frecuencia hasta la magnitud de las temperaturas extremas.

Los procedimientos de detección y atribución utilizados por Paeth *et al.*, (2017) buscan discernir si las anomalías y tendencias climáticas observadas están dentro del rango esperado de variabilidad natural o indican un cambio climático influenciado por la actividad humana.

Además de su relevancia estadística, los registros de temperatura desempeñan un papel importante en la definición del alcance geográfico de los ecosistemas y tienen importantes implicaciones sociales, como afectar al transporte, la demanda energética y la salud humana. La presencia o ausencia de registros de temperatura puede percibirse como un símbolo del cambio climático, independientemente de su respaldo científico.

Abatzoglou y Barbero (2014) anticipan que los registros de temperatura continuarán evolucionando en el siglo XXI, con un aumento en las lecturas más altas y una disminución en las más bajas, lo que tendrá consecuencias significativas para la demanda pico de energía y los efectos en la salud asociados con el calor, requiriendo medidas de adaptación.

Beever *et al.* (2010) señalan que los nuevos registros de temperatura podrían plantear riesgos considerables para los ecosistemas y la salud humana, mientras que Walther (2009) menciona que la disminución en la probabilidad de nuevos registros de frío puede tener beneficios y riesgos ecológicos.



Finalmente, Donat (2013) destaca que se espera que las temperaturas extremas sean más frecuentes, intensas y prolongadas debido al calentamiento global, enfatizando la importancia de documentar estas características y comprender los mecanismos físicos subyacentes para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación.

Además de los aspectos mencionados anteriormente, es importante destacar que la comprensión y documentación del cambio climático no solo tienen implicaciones científicas y ambientales, sino también económicas y políticas. La necesidad de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación efectivas se vuelve cada vez más urgente a medida que los efectos del cambio climático se hacen más evidentes en todo el mundo.

Las investigaciones revisadas señalan la importancia de considerar no solo las tendencias generales en los registros de temperatura, sino también la variabilidad regional y local, ya que los impactos del cambio climático pueden variar considerablemente según la ubicación geográfica (OECD, 2021).

Asimismo, se destaca la importancia de la colaboración internacional y la adopción de medidas coordinadas para abordar el cambio climático, ya que este es un problema global que requiere una respuesta global. La cooperación entre países, junto con políticas y acciones a nivel nacional, regional y local, es muy importante para enfrentar las problemáticas planteadas por el cambio climático y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de nuestro planeta.

Los resultados de esta revisión destacan la necesidad de una acción urgente y coordinada para abordar el cambio climático y sus efectos. Esto incluye no solo la investigación continua para comprender mejor los mecanismos subyacentes y los impactos del cambio climático, sino también la implementación de políticas y medidas concretas para mitigar sus efectos y adaptarse a los cambios inevitables que ya están ocurriendo.

### **Modelos climáticos**

Los modelos climáticos, como expresiones numéricas del sistema climático, han demostrado ser herramientas importantes para la investigación y comprensión del cambio climático. Estos modelos se basan en las características físicas, químicas y biológicas del sistema climático, así como en sus interacciones y procesos (IPCC, 2007). Además de su uso en la investigación, los modelos climáticos tienen aplicaciones operativas significativas, incluida la predicción climática en diversas escalas temporales (Argenal, 2010).

Los modelos climáticos actuales sugieren un aumento global de la temperatura que oscila entre 1.4 y 5.8 grados Celsius para el período comprendido entre 1990 y 2100. Estas proyecciones se derivan de suposiciones sobre diversas fuerzas impulsoras, como el crecimiento demográfico y el avance tecnológico. Sin embargo, es importante destacar que estas proyecciones no tienen en cuenta la implementación de políticas climáticas para reducir las emisiones (Díaz Cordero, 2012).

La revisión sistemática de los modelos climáticos y las proyecciones sobre el cambio climático revela la importancia de estos modelos como herramientas para comprender los patrones climáticos futuros. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de estas proyecciones, especialmente en lo que respecta a la falta de consideración de políticas de mitigación de emisiones. Esto destaca la necesidad de acciones coordinadas a nivel global para abordar eficazmente el cambio climático y sus impactos potenciales.

### **Escenarios climáticos**

Se revisa la importancia de los escenarios de cambio climático como herramientas fundamentales en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático causado por actividades humanas. Estos escenarios ofrecen una visión simplificada del clima futuro, basada en relaciones climáticas coherentes. Además, sirven como insumos clave en simulaciones de los impactos del cambio climático (CEPAL, 2019).



Para su creación, se considera un conjunto coherente de suposiciones sobre el futuro desarrollo de las emisiones de sustancias con potencial radiactivo, como los gases de efecto invernadero y los aerosoles. Estas suposiciones están influenciadas por factores como el crecimiento demográfico, el avance tecnológico y el desarrollo socioeconómico (CIIFEN, 2023).

La revisión efectuada destaca que la creación de estos escenarios es una fase importante en el desarrollo de estudios sobre la adaptación al cambio climático, ya que proporcionan una guía para la dirección a seguir en este proceso (Zermeño Díaz, 2008). En resumen, los escenarios de cambio climático son herramientas esenciales para comprender y abordar los desafíos que enfrenta el planeta debido al cambio climático inducido por el ser humano.

## Clima

### La importancia de la variabilidad climática en la sociedad humana

La variabilidad climática, entendida como los cambios en el estado medio y otras estadísticas del clima en diversas escalas temporales y espaciales, es un fenómeno de gran relevancia para la sociedad humana. Tanto los procesos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna) como las influencias externas naturales o antropogénicas (variabilidad externa) contribuyen a estos cambios (Argenal, 2010).

Esta variabilidad ejerce una influencia considerable en el bienestar de la sociedad humana, ya que está estrechamente vinculada con condiciones climáticas inusuales y eventos extremos. Por tanto, comprender a fondo esta variabilidad es esencial para formular acciones destinadas a mitigar y adaptarse, asegurando así la seguridad humana y la sostenibilidad (Behera, 2020).

La variabilidad climática abarca una amplia gama de escalas temporales, desde lo estacional hasta lo multidecenal, y presenta diversos patrones y atributos. Estas variaciones pueden influir en la eficacia de las estrategias de adaptación para mitigar

riesgos y en su aplicabilidad geográfica (Ember *et al.*, 2020).

Los factores que determinan la vulnerabilidad al cambio climático están relacionados con la amenaza resultante de las alteraciones o variaciones en el clima. Estos factores incluyen el nivel de exposición a una amenaza particular y la sensibilidad intrínseca de los sistemas naturales y humanos, así como su capacidad de respuesta o adaptación, que abarca recursos financieros, tecnológicos y habilidades organizativas y de planificación (Bernex, 2006).

En resumen, la comprensión y el abordaje de la variabilidad climática desde múltiples perspectivas son esenciales para garantizar la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo de la sociedad humana frente a los desafíos climáticos en evolución.

### Climatología urbana

La climatología urbana es un campo interdisciplinario de estudio que se adentra en la compleja interacción entre las ciudades y su atmósfera circundante. Enfocándose principalmente en las áreas urbanas, este campo integra una variedad de disciplinas, como meteorología, climatología, arquitectura e ingeniería, entre otras (Mills, 2014).

Desde hace décadas, se ha observado que las islas de calor urbanas, resultado directo de la climatología urbana, contribuyen al aumento de las temperaturas en las zonas urbanas en comparación con sus alrededores. Este fenómeno ha suscitado una creciente preocupación sobre el impacto del cambio climático en el confort térmico y el consumo energético necesario para mantenerlo (Singh *et al.*, 2014).

Los procesos generados por la actividad humana en entornos urbanos, como la construcción de estructuras y la planificación urbana, provocan cambios significativos en el clima de las ciudades. Sin embargo, estos cambios están influenciados por factores regionales, lo que destaca la importancia de distinguir entre el clima urbano y las influencias externas (Oke *et al.*, 2017).

El clima urbano se define como una variación regional del clima que ha sido alterada por la presen-



cia y la actividad de la ciudad. Su estudio implica comparaciones con entornos periurbanos o rurales para entender mejor las diferencias. Factores como el pavimento, las estructuras edificadas y el diseño de la red vial modifican los intercambios de radiación, lo que resulta en una mayor contaminación atmosférica y un aumento de las temperaturas en comparación con las áreas suburbanas (Fernández y Martilli, 2012).

### Isla de Calor Urbana (ICU)

#### Efectos de la Isla de Calor Urbana (ICU)

La ICU se intensifica en zonas urbanas debido al efecto de la configuración urbana y la densidad de construcción. Esta dinámica conduce, especialmente en condiciones de estabilidad atmosférica, a un aumento de la temperatura en el centro de las ciudades en comparación con las áreas rurales circundantes (Oke *et al.*, 2017). Cuanto mayor es la diferencia de temperatura, más fuerte es el efecto de isla de calor urbana (figura 5).

La falta de áreas verdes y la canalización de cursos de agua en las ciudades contribuyen a la exacerbación de la ICU (Buyadi *et al.*, 2013). La escasez de amplias áreas verdes y la canalización de los cursos

de agua en la ciudad disminuyen las posibilidades de aprovechar la energía solar a través de procesos como la fotosíntesis o la evaporación del agua.

En ciudades con una población grande, la temperatura del aire puede aumentar significativamente debido a la ICU. En ciudades con más de un millón de habitantes, la temperatura promedio del aire anual puede aumentar entre 1 y 3°C (Kabisch *et al.*, 2023). Este fenómeno está afectado por la sustitución de áreas abiertas y vegetación por la construcción de carreteras, edificios y otras infraestructuras, lo que provoca cambios en las superficies permeables.

La configuración urbana, densidad de población y actividades humanas son factores clave que influyen en la aparición de la ICU. La intensidad de este fenómeno está directamente vinculada a las áreas con las densidades de construcción más elevadas y los volúmenes de edificaciones más grandes (Barrera Alarcón *et al.*, 2022). Esto se refleja en perfiles térmicos nocturnos donde las intensidades máximas de la Isla de Calor Urbana se registran en el centro de las áreas urbanas y disminuyen significativamente a medida que nos alejamos hacia la periferia de la ciudad (Barrera Alarcón *et al.*, 2022).

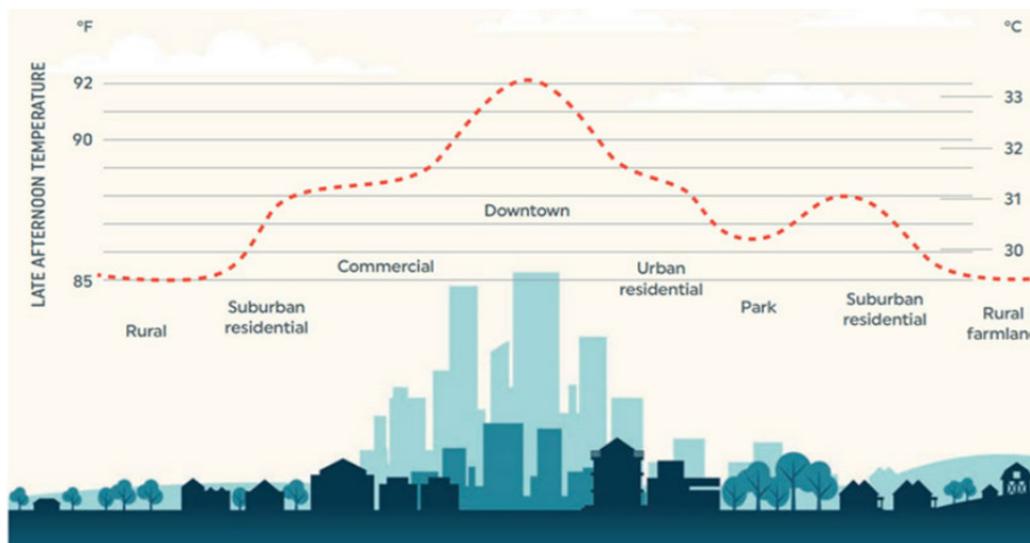


Figura 5. Mapa de islas de calor en las zonas urbanas. (Fuente: Imagen Lawrence Berkeley National Lab, 2019).



### Factores que contribuyen a la formación de ICU

La geometría urbana, la actividad humana, los procesos físicos y los factores meteorológicos son determinantes en el balance energético y la generación de la ICU. Estos elementos determinan si una superficie se enfría o se calienta, dependiendo de su proporción y de las relaciones entre ellos (García, 1990; Erell *et al.*, 2011).

La absorción de radiación en entornos urbanos y la reducción de la pérdida de calor radiante durante la noche son factores significativos en la formación de la ICU. La absorción más pronunciada de radiación en entornos urbanos, la reducción de la pérdida de calor radiante durante la noche y el incremento en la radiación de onda larga, que es absorbida y emitida de nuevo hacia la superficie debido a la contaminación urbana, desempeñan un papel significativo en la generación de este fenómeno (Terjung, y Louie, 1973).

La presencia de edificios altos multiplica las reflexiones horizontales de la radiación, contribuyendo al efecto de la ICU (Taleb y Abu-Hijleh, 2013).

La influencia humana, incluida la urbanización y la combustión de combustibles, es un factor fundamental en la formación de la ICU. La aparición de la isla de calor se debe a la influencia de la climatología urbana, donde las áreas construidas proporcionan una mayor superficie para la absorción de calor, el cual se irradia lentamente durante la noche (Aguilar García, 2021). La aparición de fenómenos meteorológicos extremos y la alteración de variables climáticas locales son consecuencias directas de la ICU. La ICU también provoca alteraciones en la disposición espacial de otras variables, tales como la presión atmosférica, los patrones de viento, la cantidad de nubes y la lluvia, así como en la dispersión de contaminantes (Sánchez Rodríguez, 2013).

### La urbanización causante de la isla de calor

Las Islas de Calor son fenómenos que provocan un aumento significativo de la temperatura local, resultando en un incremento considerable en el consumo de energía eléctrica por parte de los residen-

tes. Este aumento se atribuye al uso extensivo de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, empleados para climatizar edificios y viviendas con el objetivo de proporcionar confort a sus habitantes. Sin embargo, este confort tiene un costo ambiental significativo. Con el aumento en el uso de energía eléctrica, se generan emisiones de gases contaminantes, tales como dióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Tumini, 2010).

Las Islas de Calor se originan a partir de dos procesos distintos pero interrelacionados asociados a la urbanización (Villanueva *et al.*, 2013). El primero implica la sustitución del suelo natural por materiales como el asfalto y el concreto, resultado directo de la urbanización, lo que modifica las superficies naturales con elementos urbanos. El segundo proceso indica que las actividades urbanas, como el transporte y la industria, generan emisiones contaminantes que contribuyen al calentamiento de la ciudad.

El crecimiento urbano conlleva una serie de efectos en cadena, entre los que se incluyen la pérdida de espacios verdes, la reducción en la absorción de carbono, el incremento en la emisión de contaminantes atmosféricos, la impermeabilización de los suelos y la retención de calor en estructuras, superficies y la atmósfera, lo que propicia la formación de lo que se conoce como Islas de Calor. Es innegable que la urbanización representa una transformación drástica del entorno natural, y esta transformación tiene un impacto en los cambios a nivel global (IPCC, 2022).

### Enfrentando el riesgo: isla de calor urbana y su relación con el cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) define el riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso relacionado con el clima y sus consecuencias adversas para los sistemas humanos y naturales. Este concepto engloba tanto la posibilidad de que ocurra un evento adverso como las potenciales pérdidas, daños o efectos negativos que podrían resultar de dicho evento. En el contexto del cambio cli-



mático, el término riesgo se utiliza principalmente en referencia a los riesgos de impactos climáticos (IPCC, 2022).

Las Islas de Calor son fenómenos que se consideran estrechamente relacionados con el cambio climático y representan un riesgo adicional en áreas urbanas. El cambio climático puede intensificar este efecto, aumentando las temperaturas urbanas y exacerbando los riesgos para la salud, especialmente durante olas de calor. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021)

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) intensas han adquirido el carácter de riesgo durante las olas de calor en las aglomeraciones urbanas de latitudes medias, al agravar las condiciones de calor excesivo en horario nocturno, con efectos nocivos en la salud de personas mayores o enfermas. La intensidad de estas Islas de Calor depende de varios factores, incluyendo la geografía, la urbanización, el tiempo y el clima (Martín-Vide *et al.*, 2016).

En resumen, las Islas de Calor Urbanas representan un riesgo significativo para la salud y el bienestar de la población urbana, especialmente en el contexto del cambio climático en el que las temperaturas extremas son cada vez más frecuentes. Es fundamental comprender y abordar estos riesgos para mitigar sus impactos adversos en los sistemas humanos y naturales.

### Resultados de los estudios sobre las Islas de Calor Urbano (ICU) y estrés por calor

La intensidad de las Islas de Calor Urbano (ICU) ha sido objeto de diversos estudios en diferentes ciudades del mundo, revelando patrones interesantes y preocupantes en relación con el cambio climático y la urbanización. A continuación, se presentan algunos hallazgos destacados de investigaciones recientes:

- Análisis en Hannover, Alemania. Un estudio realizado en Hannover, Alemania, durante los años 2018, 2019 y 2020, reveló un incremento significativo en la intensidad de la ICU durante períodos de calor sin precedentes. Estos años se destacaron por ser algunos de los más

calurosos registrados en Alemania. (Müller *et al.*, 2021). Comparando con un año sin calor en 2017, se encontró que la intensidad de la ICU aumentó considerablemente durante los años de calor extremo, especialmente en las temperaturas mínimas nocturnas. El efecto de la ICU fue más pronunciado en áreas urbanas densamente construidas, mientras que las áreas con mayor cobertura vegetal, como un parque urbano, mostraron una menor intensidad de la ICU. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar estrategias de “ecologización” urbana, como aumentar la cantidad de espacios verdes y arbolados, para mitigar los efectos del calor en las áreas urbanas.

- **Impacto de Olas de Calor en Diferentes Ciudades.** Investigaciones en ciudades como Madison (EE.UU.), Melbourne y Adelaida (Australia), y Atenas (Grecia), confirmaron la intensificación de la ICU durante períodos de olas de calor. Se observó un aumento en la intensidad del efecto de Isla de Calor Urbano durante el día y la noche durante las olas de calor, con temperaturas máximas diarias particularmente elevadas. (Johnson *et al.*, 2020). Estos resultados destacan la necesidad de medidas adaptativas y de mitigación específicas para enfrentar el impacto de las olas de calor en entornos urbanos.
- **Tendencias de Urbanización y Expansión Urbana.** El crecimiento acelerado de las ciudades, especialmente en países como China, ha exacerbado el efecto de las Islas de Calor Urbano. Investigaciones han demostrado que la rápida expansión urbana ha contribuido significativamente al aumento del estrés por calor en áreas urbanas, como se evidencia en el caso de China. Es importante comprender y abordar los patrones de expansión urbana para mitigar los efectos negativos del calor en las ciudades en crecimiento. (Li y Zhang, 2019).
- **Desafíos y Futuras Investigaciones.** A pesar de los avances en la comprensión de la ICU, aún existen brechas en la investigación, como



la falta de estudios en entornos verticales y la necesidad de explorar la variabilidad espacio-temporal del estrés por calor en diferentes entornos urbanos. (Davis *et al.*, 2022). Futuras investigaciones deberían centrarse en identificar estrategias efectivas de adaptación y mitigación para reducir el impacto del calor urbano en la salud y el bienestar de los residentes.

### **Resultados de los estudios sobre las Islas de Calor Urbano (ICU) en zonas costeras**

La investigación sobre las islas de calor urbanas en ciudades costeras revela patrones particulares debido a la influencia del mar y la variación estacional. Por ejemplo, en Bari, Italia, se ha observado que las características urbanas como la densidad y el uso del suelo modifican la intensidad del UHI. Las brisas marinas pueden mitigar las temperaturas durante el día, pero las áreas densamente urbanizadas experimentan UHI más intensos, especialmente en verano y de noche, con incrementos de hasta 4.8 °C (Kakumanu *et al.*, 2020).

En Dalian, China, se demostró que la UHI solo es significativa durante la primavera y el verano, mientras que en otoño e invierno no se observa un efecto notorio. La vegetación y la elevación juegan un papel importante en moderar las temperaturas, especialmente en los meses cálidos (Xiang *et al.*, 2021).

Por otro lado, en Brasil, ciudades como Manaus, Curitiba, y Campinas también han sido objeto de estudios. En particular, en Manaus, se ha utilizado teledetección para analizar la UHI (Santos *et al.*, 2018), mientras que en Campinas se ha investigado el impacto de la vegetación en el microclima urbano para contrarrestar la densificación urbana (Lima *et al.*, 2022). Estos estudios destacan la importancia de la vegetación y la morfología urbana para mitigar los efectos del calor.

Estos estudios evidencian que las UHI en zonas costeras están fuertemente influenciadas por factores locales como la proximidad al mar, la estacionalidad y la cobertura vegetal.

### **Métodos de investigación de las islas de calor urbana**

Se han desarrollado varios métodos para investigar el efecto de las islas de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés), que incluyen el análisis de datos de observación meteorológica, la simulación numérica de meso escala con el modelo WRF y el análisis de imágenes de teledetección (Kabisch *et al.*, 2023). Entre ellos, las imágenes de teledetección se destacan en el estudio comparativo del efecto de UHI en diferentes etapas de desarrollo urbano. La teoría de la Zona Climática Local (LCZ), propuesta por Stewart y Oke (2012), proporciona una herramienta innovadora para la reducción de escala del efecto UHI y establece un esquema de clasificación sistemático para diferentes formas urbanas y paisajes de superficie.

Los métodos de investigación del efecto UHI abarcan análisis de datos meteorológicos, mediciones y análisis de campo, simulación numérica y teledetección. La teledetección, en particular, se utiliza ampliamente en el estudio comparativo del efecto UHI en diferentes períodos de desarrollo urbano, siendo parte de investigaciones a microescala. (Anderson *et al.*, 2020).

Las herramientas geoespaciales en el mapeo de UHI proporcionan datos avanzados de teledetección/aerotransportados y análisis espaciales para procesar grandes conjuntos de datos de manera eficiente. Estas herramientas permiten investigar áreas espaciales más extensas con una gran cobertura temporal en comparación con los datos limitados de temperatura del aire disponibles en observatorios. (Jones y Smith, 2019).

Existen varios métodos y enfoques para analizar y mapear UHI, desde el uso tradicional de datos satelitales hasta metodologías emergentes como la teledetección, análisis espacial basado en SIG y sistemas aéreos no tripulados (UAS), que amplían las capacidades de mapeo y análisis. (Taylor *et al.*, 2021).

Un estudio realizado en la provincia urbanizada de Kayseri, Turquía, empleó imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 para investigar la evolución



de las temperaturas de la superficie terrestre (LST) y los efectos de UHI entre 2013 y 2022 (Peng *et al.*, 2024). Este estudio también analizó el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Construcción (NDBI), revelando correlaciones entre los cambios en LST, UHI, NDVI y NDBI. (Peng *et al.*, 2024).

Los estudios sobre UHI comúnmente utilizan imágenes satelitales de teledetección y técnicas de simulación para analizar y comprender este fenómeno urbano.

Las Islas de Calor Urbano (ICU) representan un desafío significativo en la planificación y gestión urbana, así como en la mitigación de los impactos del cambio climático. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica, se han identificado diversas metodologías de investigación que abordan este fenómeno en diferentes contextos geográficos y climáticos.

Uno de los hallazgos importantes de esta revisión es la variabilidad en la intensidad y la evolución de las ICU en diferentes áreas urbanas. Por ejemplo, el estudio realizado en Hannover, Alemania, destaca cómo las condiciones extremas de calor pueden exacerbar las ICU y sus efectos en el entorno urbano (Kabisch *et al.*, 2023). En contraste, investigaciones en nuevas áreas de expansión en ciudades chinas revelan patrones evolutivos diversificados de las ICU en relación con el crecimiento urbano (Peng *et al.*, 2024).

La relación entre las ICU, la contaminación del aire y la salud pública también ha sido objeto de análisis en diversos estudios. Un estudio aplicado en Granada, España, demuestra cómo el análisis espaciotemporal de la ICU, la contaminación del aire y los patrones de enfermedades puede proporcionar información valiosa para la planificación urbana y la salud pública (Hidalgo-García y Arco-Díaz, 2023). Del mismo modo, la evaluación del impacto del calentamiento urbano en el crecimiento de los árboles en las calles de Berlín destaca la interacción entre la vegetación urbana y las ICU (Hurley y Heinrich, 2024).

La mitigación de las ICU ha sido abordada a través de diversas estrategias y tecnologías innovadoras. Desde modelos de simulación paramétrica del microclima urbano en áreas antiguas de Dongshi Town, China, hasta la utilización de teledetección y aprendizaje automático para estimar la temperatura de la superficie terrestre en Yazd, Irán, se han explorado múltiples enfoques para comprender y mitigar las ICU (Huang *et al.*, 2024).

Además, se ha investigado el papel de la infraestructura verde en la reducción de las ICU. Estudios como el análisis espaciotemporal de la infraestructura verde en Granada, España, han demostrado cómo esta puede actuar como una medida efectiva de mitigación (Hidalgo García, 2023).

Asimismo, la comparación sistemática del impacto de diferentes medidas, como techos y paredes frescos, en la formación de las ICU resalta la importancia de la planificación urbana sostenible (Jiachen *et al.*, 2018).

En resumen, la investigación sobre las ICU ha avanzado significativamente en las últimas décadas, proporcionando insights valiosos para comprender este fenómeno complejo y desarrollar estrategias efectivas de mitigación en entornos urbanos.

## **Adaptación a las islas de calor**

### **en la ciudad: perspectivas y estrategias**

La adaptación al cambio climático, según el IPCC (2014, AR5), implica ajustarse a los efectos presentes o futuros del clima. Esto incluye la moderación o prevención de impactos negativos, así como el aprovechamiento de los efectos beneficiosos, mediante intervenciones tanto en sistemas humanos como naturales.

Investigaciones, como la de Okyere *et al.* (2019), han destacado que la adaptación al cambio climático implica anticipar, responder, minimizar consecuencias, recuperarse y aprovechar nuevas oportunidades.

Sin embargo, lograr una adaptación exitosa no solo depende de tener los recursos adecuados, sino también de la disposición y habilidad para trans-



formar esos recursos en acciones efectivas, como señala Cinner *et al.* (2018).

En el contexto específico de las ciudades, donde las islas de calor son un desafío evidente, estas perspectivas sobre la adaptación al cambio climático adquieren una importancia particular. En las áreas urbanas, la adaptación se convierte en una cuestión crítica para garantizar la calidad de vida de los residentes y la sostenibilidad de las comunidades.

La adaptación a las islas de calor en la ciudad no solo implica la implementación de medidas físicas para mitigar el calor, sino también la capacidad de las comunidades para adaptarse, aprovechando recursos y generando acciones efectivas frente a los desafíos del cambio climático. (Cinner *et al.*, 2018).

Las islas de calor urbanas (ICU) representan un desafío cada vez más relevante en el contexto de las ciudades modernas, donde el aumento de las temperaturas y la variabilidad climática plantean preocupaciones significativas para la salud pública, el medio ambiente y la calidad de vida de los residentes urbanos. A través de la revisión y síntesis de investigaciones recientes, se exploran en este artículo diversas estrategias de adaptación diseñadas para mitigar el impacto de las ICU y promover entornos urbanos más sostenibles y resistentes al calor. (Smith, *et al.*, 2023).

La variabilidad de estrés térmico en ciudades como Sevilla (España) ha sido objeto de estudio en investigaciones como la realizada por Hidalgo-García, y Rezapouraghdam (2023). Esta investigación propone una serie de medidas de mitigación basadas en el modelo climático UrbClim, destacando la importancia de estrategias específicas adaptadas a las condiciones locales. Por otro lado, estudios exploran estrategias de adaptación al calor en ciudades de gran envergadura en Estados Unidos, evaluando su efectividad bajo diferentes escenarios futuros.

La intensidad de las ICU y su relación con las temperaturas urbanas se ha examinado exhaustivamente diversas investigaciones (Wang *et al.*, 2023). Este análisis sintetiza el entorno térmico urbano en

mega regiones, proporcionando información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación. Además, la innovación en materiales de construcción, como los materiales de cambio de fase (MCP), ha sido objeto de investigación en estudios como el presentado por (Asadi, 2023), explorando su potencial para mitigar las ICU mediante la regulación térmica en pavimentos de hormigón.

En el ámbito de la infraestructura urbana, soluciones como los pavimentos permeables están siendo investigadas por su capacidad para mitigar las ICU y mejorar el rendimiento hidrológico, como se muestra en el estudio piloto realizado por Liu y Morawska, (2020). A su vez, investigaciones como la llevada a cabo en Phoenix, Arizona (Liu, 2020) utilizan modelos para evaluar el impacto de diversas estrategias de mitigación en la morbilidad relacionada con el calor, ofreciendo información importante para la planificación urbana y la gestión de la salud pública.

La reconfiguración de espacios urbanos, como parques y áreas verdes, emerge como una estrategia prometedora para mitigar las ICU de manera natural, como se destaca en el estudio presentado por Barradas *et al.* (2022). Este enfoque resalta la importancia del diseño urbano para maximizar los beneficios ambientales y la resiliencia ante el calor. Por último, investigaciones como la realizada en la ciudad de Mekelle, Etiopía, por Hidalgo García (2023), exploran la relación entre las ICU y la ecología urbana, proporcionando una visión integral de los efectos del calor urbano en el entorno natural y construido.

En conjunto, estas investigaciones subrayan la diversidad de enfoques y estrategias disponibles para abordar las ICU en entornos urbanos, destacando la necesidad de enfoques integrales y adaptados a las condiciones locales para promover ciudades más saludables, sostenibles y resilientes al calor.

### **Mitigación de las Islas de Calor Urbanas:**

**Estrategias Efectivas para un Futuro Sostenible**  
La mitigación de los impactos derivados de eventos o situaciones adversas es esencial para proteger



tanto a la población como al entorno afectado. Esta estrategia, estrechamente vinculada con la adaptación, busca reducir los efectos negativos y minimizar los riesgos asociados.

Un aspecto importante de la mitigación se centra en las medidas térmicas, las cuales desempeñan un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida de los residentes urbanos y en el avance hacia un desarrollo sostenible. La implementación de proyectos, procedimientos y estrategias específicamente diseñados para abordar las necesidades de una población o región particular es clave para lograr resultados efectivos (Godínez, 2018).

Investigaciones recientes, como la de Hong *et al.* (2023), destacan la importancia de estas medidas térmicas en el contexto urbano. Su estudio destaca la relevancia de adoptar estrategias de mitigación adecuadas para preservar el bienestar de los ciudadanos y promover un crecimiento urbano sostenible.

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan uno de los desafíos más apremiantes para las ciudades modernas, con efectos adversos en la salud pública, el consumo de energía y el medio ambiente. Sin embargo, a medida que la comprensión de estos fenómenos ha evolucionado, también lo han hecho las estrategias de mitigación.

Una de las estrategias más prometedoras identificadas es el uso de vegetación y el aumento del albedo. Estudios como “*Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference*” y “*Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy—A Review*” (Pritipadmaja y Sharma, 2023) resaltan cómo la vegetación y superficies reflectantes pueden reducir significativamente la temperatura urbana, mejorando así la calidad de vida de los residentes y reduciendo la demanda energética.

Además, la optimización de espacios verdes urbanos, como se describe en “*Localizing and prioritizing roof greening opportunities for urban heat island mitigation: insights from the city of Krefeld, Germany*” (Calhoun *et al.*, 2024) y la implementación de infraestructura verde, como humedales

construidos, se ha demostrado que también son eficaces en la mitigación de las ICU (Cheela *et al.*, 2021).

La reflectividad solar de los materiales de la envolvente de los edificios emerge como otro enfoque valioso. Investigaciones como “*Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review*” (Xiang, y Tao, 2023) y “*Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations*” (Small, 2020) destacan cómo los materiales de construcción reflectantes pueden reducir la absorción de calor y mitigar los efectos de las ICU.

La combinación de estrategias pasivas, como techos verdes, y activas, como pavimentos reflectantes, emerge como una solución integral para abordar las ICU. Es esencial considerar los beneficios adicionales, como la mejora de la calidad del aire y la biodiversidad urbana, al implementar estas medidas (Araque *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2024; ).

A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, es imperativo adoptar enfoques multifacéticos y basados en evidencia para abordar las ICU. Este artículo destaca la importancia de la colaboración entre investigadores, urbanistas y responsables políticos para implementar soluciones efectivas que mejoren la resiliencia urbana y la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

### **Tecnología y materiales de construcción**

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan un desafío cada vez más urgente en un mundo marcado por el cambio climático y la rápida urbanización. Sin embargo, a medida que la conciencia sobre este fenómeno crece, también lo hace la investigación y el desarrollo de estrategias para mitigar sus efectos adversos en la calidad de vida urbana. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica actual, se han identificado y analizado diez estudios clave que exploran diversas tecnologías y materiales de construcción con el objetivo de combatir las ICU y mejorar el confort térmico en entornos urbanos.



Los resultados revelan una amplia gama de enfoques y soluciones potenciales:

- **Infraestructuras verdes mejoradas.** Se ha demostrado que estas infraestructuras son eficaces para reducir las temperaturas en entornos urbanos desérticos, ofreciendo una solución prometedora para mitigar las ICU en regiones afectadas por el calor extremo (Mohammed *et al.*, 2023) (figura 6).
- **Planificación urbana sostenible.** La densidad y morfología urbana tienen un impacto significativo en la intensidad de las ICU. Por lo tanto, estrategias de planificación que promuevan un diseño urbano más equilibrado y verde pueden contribuir a mitigar este fenómeno (Li *et al.*, 2020).
- **Energías renovables y techos frescos.** En lugares como Ahmedabad, India, se identifican oportunidades para utilizar energías renovables y techos frescos como medios efectivos para reducir la demanda de refrigeración y combatir el aumento de las temperaturas (Joshi *et al.*, 2022).
- **Reflectividad solar de materiales de construcción.** La utilización de materiales de envolvente de edificios con alta reflectividad solar puede ayudar a reducir la absorción de calor y mitigar las ICU de manera efectiva (Ziaemehr *et al.*, 2023).



**Figura 6.** Una “sala de estar verde” en Frankfurt.  
Fuente: PNUMA/Irene Fagotto (2021)

- **Pavimentación urbana con materiales fríos.** La selección de materiales fríos para pavimentación urbana puede contribuir significativamente a la reducción de las temperaturas en áreas urbanas, mejorando así el confort térmico de los habitantes (Castro *et al.*, 2017).
- **Diseño sostenible de fachadas de edificios.** El diseño adecuado de las fachadas de los edificios puede influir en el microclima exterior y, por ende, en la formación de las ICU, destacando la importancia de estrategias de diseño sostenible (Fox *et al.*, 2018).
- **Pinturas frescas en la morfología urbana.** Las pinturas frescas muestran un potencial significativo para reducir las temperaturas en áreas urbanas densamente construidas, según lo demostrado por la modelización de su efecto mitigador en la morfología urbana realista (Liu y Morawska, 2018).
- **Simulaciones de interacciones térmicas a microescala:** Las simulaciones de estas interacciones proporcionan información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación de las ICU a nivel local, contribuyendo así a un enfoque más preciso y eficaz en la lucha contra este fenómeno (Chatterjee *et al.*, 2019).

En conjunto, estos estudios resaltan la diversidad de enfoques y soluciones disponibles para abordar las Islas de Calor Urbanas mediante tecnologías y materiales de construcción innovadores. Sin embargo, se hace evidente la necesidad de una acción coordinada y una mayor investigación para implementar estas soluciones de manera efectiva y maximizar su impacto en la sostenibilidad urbana.

### Políticas y planificación urbana en la era del Cambio Climático

La planificación urbana y las políticas de desarrollo sostenible juegan un papel importante en la creación de ciudades resilientes frente al cambio climático. Esta revisión sistemática analiza la intersección entre políticas, planificación urbana y medidas de mitigación/adaptación al cambio climático, explorando estudios académicos relevantes en el campo.



El análisis de diversos estudios relacionados con políticas y planificación urbana en el contexto de las islas de calor urbano ofrece una comprensión integral sobre cómo abordar este fenómeno en entornos urbanos. Estos estudios proporcionan una variedad de enfoques y estrategias para mitigar los efectos de las islas de calor, promoviendo así ciudades más frescas y habitables en el contexto del cambio climático.

Al considerar tanto aspectos técnicos como políticos en los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático, se resalta la importancia de políticas que aborden tanto el diseño urbano como las emisiones de gases de efecto invernadero.

La integración de la naturaleza en el diseño urbano se revela como una estrategia efectiva para mitigar las islas de calor, creando áreas verdes, corredores de vegetación y espacios públicos frescos que ayuden a reducir la temperatura urbana. (Dabaieh, *et al.*, 2022).

El potencial de las soluciones basadas en la naturaleza para abordar las islas de calor urbano es destacado, promoviendo la circulación de aire fresco y la absorción de calor a través de la vegetación y áreas verdes dentro de las ciudades (Catalano *et al.*, 2021).

La importancia de integrar la infraestructura verde en la planificación espacial urbana para mitigar los efectos del cambio climático es subrayada, incluyendo la reducción de las islas de calor a través de la plantación de árboles y la creación de parques y jardines (Atanasova *et al.*, 2021).

Examinando la relación entre el uso de la tierra verde y las islas de calor urbanas en ciudades europeas, se proporciona información valiosa para desarrollar políticas y estrategias de planificación urbana que promuevan entornos más frescos y sostenibles (Elgendawy *et al.*, 2020).

Finalmente, se ofrece un marco para evaluar la calidad de los planes urbanos en términos de consideraciones sobre las islas de calor urbano, orientando la planificación hacia ciudades más frescas y habitables.

En conjunto, estos estudios destacan la impor-

tancia de integrar estrategias de mitigación de islas de calor urbano en las políticas y planificación urbana, promoviendo un enfoque holístico que incorpore tanto la infraestructura verde como las soluciones basadas en la naturaleza para crear ciudades más frescas y resilientes al cambio climático.

### Técnicas de modelado y simulación

Para analizar y comprender los resultados de las técnicas de modelado y simulación de islas de calor, se revisaron diversos estudios que abarcan diferentes aspectos relacionados con el tema. En primer lugar, el estudio realizado en Yazd, Irán (Mansourmoghadam *et al.*, 2024), se centró en la modelización y estimación de la temperatura de la superficie terrestre utilizando teledetección y aprendizaje automático. Este estudio proporcionó información valiosa sobre cómo estas tecnologías pueden ser aplicadas para comprender las variaciones de temperatura en áreas urbanas, específicamente en una región con características climáticas particulares.

Por otro lado, el análisis espacio-temporal de la temperatura de la superficie terrestre, el efecto isla de calor urbano y los puntos calientes urbanos en Andalucía, España (García, y Díaz, 2023), arrojó luz sobre las relaciones entre estos fenómenos y las variaciones en el campo térmico. Este estudio proporcionó una visión más amplia de cómo factores geográficos y temporales influyen en la distribución de la temperatura en entornos urbanos.

Además, se investigaron las relaciones entre diferentes espacios verdes urbanos y las zonas climáticas locales (Kirschner *et al.*, 2023), lo que ayudó a comprender cómo la vegetación puede influir en la mitigación del calor urbano. Un estudio piloto en Shenyang, Noreste de China (Miao *et al.*, 2023), exploró cómo la calidad del aire exterior se puede vincular con el confort térmico en presencia de árboles en la calle, lo que sugiere posibles estrategias para mejorar la calidad del aire y el confort térmico en entornos urbanos.

Asimismo, se examinó la evolución diurna de la temperatura de los árboles urbanos a escala de ciudad (Vo Hu, 2021), lo que proporcionó infor-



mación detallada sobre cómo estos elementos contribuyen a la regulación térmica en entornos urbanos. Un modelo de árbol único fue desarrollado para simular de manera consistente la capacidad de enfriamiento, sombreado y captación de contaminantes de los árboles urbanos (Pace, et. al., 2021), lo que ofrece una herramienta importante para la planificación urbana orientada a la mitigación del calor.

Finalmente, la complejización del césped urbano se exploró como una estrategia para mejorar la mi-

tigación del calor y la biodiversidad de artrópodos (Francoeur *et al.*, 2021), destacando el papel importante de los elementos naturales en la adaptación de las ciudades al cambio climático.

En conjunto, estos estudios proporcionan una comprensión más completa de las técnicas de modelado y simulación de islas de calor, así como de las estrategias para mitigar sus efectos en entornos urbanos, lo que puede ser fundamental para informar políticas y prácticas de planificación urbana sostenible.

## Discusión

El análisis sistemático de las Islas de Calor Urbano (ICU) en el contexto del cambio climático y las medidas de adaptación y mitigación resalta la complejidad y la interdependencia de múltiples factores. Se destaca cómo la urbanización en aumento, combinada con el cambio climático, está exacerbando los efectos adversos de las ICU en la salud y el bienestar de las comunidades urbanas. (Kim y Brown, 2021)

Investigaciones recientes han demostrado que la geometría de la ciudad, incluyendo la distribución de edificios y la altura de estos, puede influir significativamente en la magnitud de las ICU. Por ejemplo, las ciudades con una alta densidad de rascacielos tienden a experimentar mayores temperaturas urbanas debido a la reducida ventilación y mayor absorción de calor en comparación con las ciudades con una distribución más dispersa de edificios. (Parsae *et al.*, 2019). La radiación solar también desempeña un papel fundamental en la formación de las ICU. Las superficies urbanas, como el asfalto y el concreto, absorben gran parte de la radiación solar durante el día y liberan ese calor gradualmente durante la noche, contribuyendo así al calentamiento urbano. Este fenómeno se ve agravado por la presencia de contaminantes atmosféricos, como los gases de efecto invernadero y los aerosoles, que pueden atrapar el calor y aumentar aún más las temperaturas locales. (Degirmenci *et al.*, 2021)

Además, la actividad industrial y las emisiones de vehículos también contribuyen significativamente al calentamiento urbano al liberar calor directamente en la atmósfera y aumentar la concentración de contaminantes que absorben la radiación solar. (Peng *et al.*, 2024)

Se subraya la importancia de comprender los diversos factores que contribuyen a la formación de las ICU; desde la configuración urbana y la densidad de construcción hasta la falta de áreas verdes y la actividad humana, cada elemento desempeña un papel muy importante. La intensificación de las temperaturas en las zonas urbanas, en comparación con las áreas rurales circundantes, resalta la necesidad urgente de abordar este fenómeno. (Kim y Brown, 2021)

Se reconoce la eficacia de diversas estrategias de mitigación y adaptación, como la ecologización de techos y la pavimentación reflectante, en la reducción de la temperatura urbana y la mejora del confort térmico. Sin embargo, se enfatiza que estas medidas son solo parte de la solución. La implementación efectiva de políticas y acciones coordinadas es importante para enfrentar los desafíos complejos asociados con las ICU en el contexto del cambio climático. (Parsae *et al.*, 2019).

El llamado a la acción se centra en la necesidad continua de investigación e innovación para promover ciudades más sostenibles y resilientes. Esto



incluye no solo la exploración de nuevas tecnologías y materiales de construcción, sino también la promoción de prácticas de planificación urbana que integren la resiliencia climática desde el principio. Al hacerlo, podemos trabajar hacia un futuro

donde las comunidades urbanas estén mejor preparadas para enfrentar los desafíos del calentamiento urbano y el cambio climático. (Degirmenci *et al.*, 2021).

## Conclusiones

Este estudio de revisión sistemática ha resaltado la creciente preocupación por los efectos del calentamiento global en entornos urbanos. Los resultados subrayan la necesidad apremiante de estrategias efectivas para mitigar el impacto de las condiciones térmicas extremas en las áreas urbanas. Las medidas de adaptación identificadas, como el incremento de áreas verdes y la implementación de políticas de diseño urbano sostenible, muestran un potencial prometedor para abordar esta problemática. Sin embargo, es importante reconocer la necesidad de una investigación continua para evaluar la eficacia y la viabilidad de estas medidas en diferentes contextos urbanos y climáticos. Se debe prestar espe-

cial atención a la equidad en la distribución de estas soluciones, asegurando que todas las comunidades urbanas, especialmente aquellas en situación de vulnerabilidad, se beneficien de manera equitativa. Estas conclusiones resaltan la importancia de abordar los problemas derivados del cambio climático de manera proactiva y coordinada, tanto a nivel local como global, para garantizar la resiliencia y sostenibilidad de nuestras ciudades en el futuro. Además, se hace evidente la necesidad de políticas integrales que aborden tanto la mitigación como la adaptación al cambio climático, reconociendo la interconexión de estos aspectos para lograr un desarrollo urbano verdaderamente sostenible.

## Referencias

- Abatzoglou, J. T., and R. Barbero (2014), Observed and projected changes in absolute temperature records across the contiguous United States, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6501–6508, doi:10.1002/2014GL061441.
- Aguilar García, E. A. (2021). Análisis de la distribución e intensidad de las islas de calor urbanas superficiales diurnas (ICUs) en el Cantón Manta, Manabí y su relación con la vegetación local y otras variables geográficas.
- Anderson, P., Johnson, R., y Lee, C. (2020). Urban Heat Island effect: Methods of investigation. *Journal of Environmental Research*, 85(3), 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109642>
- Araque, K.; Palacios, P.; Mora, D.; Chen Austin, M. (2021). Biomimicry-Based Strategies for Urban Heat Island Mitigation: A Numerical Case Study under Tropical Climate. *Biomimetics*, 6, 48. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6030048>
- Argenal, F. (2010). Variabilidad climática y cambio climático en Honduras. Tegucigalpa: PNUD.
- Asadi, I. *et al.* (2023) Reviewing the Potential of Phase Change Materials in Concrete Pavements for Anti-Freezing Capabilities and Urban Heat Island Mitigation. *Buildings*, 13, 3072. <https://doi.org/10.3390/buildings13123072>
- Atanasova, N., Castellar, J.A., Pineda-Martos, R. et al. (2021). Nature-Based Solutions and Circularity in Cities. *Circ. Econ.Sust.* 1, 319–332. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00024-1>
- Balany, F. et al. (2020) Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy—A Review. *Water*, 12, 3577. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Barradas, V.L.; Miranda, J.A.; Esperón-Rodríguez, M.; Ballinas, M. (2022). (Re) Designing Urban Parks to Maximize Urban Heat Island Mitigation by Natural Means. *Forests*, 13, 1143. <https://doi.org/10.3390/f13071143>
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., & Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3). Recuperado de [scielo.org.mx](https://scielo.org.mx)
- Beever, E.A. *et al.* (2010), Testing alternative models of climate-mediated extirpations. *Ecological Applications*, 20: 164–178. <https://doi.org/10.1890/08-1011.1>



- Behera, S. K. (Ed.). (2020). Interacciones aire-mar tropicales y extratropicales: Modos de variaciones climáticas. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03022-4>
- Bonafoni, S. (2016). Remote sensing and thermal islands. In *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes* (pp. 133-148). Springer, Cham.
- Bonafoni, S., y Keeratikasikorn, C. (2018). An Urban Heat Island study by satellite imagery: A case study in Bangkok, Thailand. *Applied Geography*, 98, 15-24.
- Borsani, M. S. (2011). Materiales ecológicos: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles.
- Buhr, B. *et al.* (2018). Climate change and the cost of capital in developing countries.
- Calhoun, Z.D., Willard, F., Ge, C. *et al.* Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Sci Rep* 14, 540 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w>
- Camacho Dávila, M., y López Baños, Y. (2022) Infraestructura verde para mitigar las Islas de calor en las áreas urbanas: El caso de la ciudad de Toluca.
- Castro, L. C. *et al.* (2017). Evaluation of the thermal performance of different cold materials for urban paving. *Cerámica*, 63(366), 203–209. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662063>
- Catalano, C., Meslec, M., Boileau, J. *et al.* (2021). Smart Sustainable Cities of the New Millennium: Towards Design for Nature. *Circ.Econ.Sust.* 1, 1053–1086. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00100-6>
- CECH, I. *et al.* (1976): “Relative contribution of land uses to the urban heat problem in the coastal subtropics.”; *Weather*, 42 (9); págs. 9-18.
- Centro de Consultoría Estratégica de la Academia China de Ingeniería. (2020). [Strategic Consultancy Center of the Chinese Academy of Engineering]. Retrieved from <http://www.cae.cn/cae/html/main/colys/95225123.html>
- CEPAL. (2014). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. [https://www.euroclima.org/images/Publicaciones/Vulnerabilidad/CA-BID-Vulnerabilidad\\_y\\_adaptacion\\_al\\_cambio\\_climatico.pdf](https://www.euroclima.org/images/Publicaciones/Vulnerabilidad/CA-BID-Vulnerabilidad_y_adaptacion_al_cambio_climatico.pdf)
- CEPAL. (2019). Cambio climático y desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: una revisión de experiencias recientes. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711_es.pdf)
- Cheela, V.R.S. *et al.* (2021). Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings*, 11, 93. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- Chen, B. *et al.* (2024). The evolution of social-ecological system interactions and their impact on the urban thermal environment. *NPJ Urban Sustain*, 4, 3. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00141-4>
- Chi, H., Wu, Y., Zheng, H. *et al.* Patrones espaciales del cambio climático y peligros climáticos asociados en el noroeste de China. *Representante Científico*, 13, 10418 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37349-w>
- Cifuentes-Jara, M., Brenes, R., Brenes, C., Corrales, L., Vargas, M., Betbeder, J., *et al.* (2021). Islas de calor y regulación de la temperatura en la ciudad: Rol de los espacios verdes.
- Cinner, J. E., Adger, W. N., Allison, E. H., Barnes, M. L., Brown, K., Cohen, P. J., *et al.* (2018). Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, 8(2), 117-123. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0065-x>
- Dabaieh, M., Maguid, D., Abodeeb, R., *et al.* (2022). The Practice and Politics of Urban Climate Change Mitigation and Adaptation Efforts: The Case of Cairo. *Urban Forum*, 33, 83–106. <https://doi.org/10.1007/s12132-021-09444-6>
- Davis, R., Green, S., & Thompson, P. (2022). Futuras direcciones en la investigación sobre Islas de Calor Urbano: Desafíos y oportunidades. *Climate Research*, 53(2), 124-139. <https://doi.org/10.3354/cr022124de>
- Cambio Climático, O. E. (2006). Plan nacional de adaptación al cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático. Torreguil, España.
- de Campeche, G. C. D. E. (2015). Programa estatal de acción ante el cambio climático. Visión 2015-2030.
- Degirmenci, K., Desouza, K., Fieuw, W., Watson, R., & Yigitcanlar, T. (2021). Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102873. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102873>
- Donat, M. G., & Coautores. (2013). Análisis actualizados de índices extremos de temperatura y precipitación desde principios del siglo XX: el conjunto de datos HadEX2. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2098–2118. doi:10.1002/jgrd.50150
- Dong, X., Xie, Y., Sun, Z., & Zhan, C. (2011). A review on urban heat island effect research. *Acta Ecologica Sinica*, 31(3), 133-138.
- Eguarte, A., Hidalgo, J., Centeno, R., Álvarez, A., & Vázquez, R. (2014). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.
- Elgendawy, A., Davies, P., & Chang, H. (2020). Planning for cooler cities: A plan quality evaluation for Urban Heat Island consideration. *Journal of Urban Planning and Development*, 146(4), 531-553. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2020.1781605>
- Ember, C. R., Ringen, E. J., Dunnington, J., & Pitek, E. (2020). Estrés por los recursos y diversificación de la subsistencia en las sociedades. *Nature Sustainability*, 3, 737-745. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.005>
- Fernández, F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su impacto en la planificación. *Revista de Estudios Urbanos*, 45(3), 123-145.
- Fox, J., Osmond, P., & Peters, A. (2018). The Effect of Building Facades on Outdoor Microclimate—Reflectance Recovery from Terrestrial Multispectral Images Using a



- Robust Empirical Line Method. *Climate*, 6, 56. <https://doi.org/10.3390/cli6030056>
- Francoeur, X. W., Dagenais, D., Paquette, A., Dupras, J., Messier, C., et al. (2021). Complexifying the urban lawn improves heat mitigation and arthropod biodiversity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127007. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127007>
- Fuentes, V. B. (1994). La Isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie Geográfica*, 4, 83-97.
- Galindo Estrada, I. G. (2010). Identificación y estudios de las Islas urbanas de calor de las ciudades de Guadalajara y Colima. Propuestas de estrategias de mitigación. *Documents/8-IgnacioGalindo*.
- Galloa, K. P., Owenb, T. W., & Huber, A. H. (1993). Satellite-based modeling of urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 44(2-3), 187-196.
- García Haro, A. (2017). Isla de frío de los parques urbanos: una aproximación desde el estudio de la influencia climática de los parques urbanos en Barcelona (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- García, D. H., & Díaz, J. A. (2023). Space-time analysis of the earth's surface temperature, surface urban heat island and urban hotspot: relationships with variation of the thermal field in Andalusia (Spain). *Urban Ecosyst*, 26, 525-546. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01321-9>
- García, F. F. (2009). Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas* (España), (49), 173-195.
- García, F. F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Índice*, (50), 21-24.
- Giannaros, T. M., Melas, D., y Georgiou, S. E. (2013). The performance of the Weather Research and Forecasting Model in capturing urban-induced circulation: A case study for Athens, Greece. *Atmospheric Research*, 124, 29-47.
- Giorgi, F., y Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, págs.467-490.
- Godínez, T. Y. H. (2018). Caracterización de los efectos de la Isla de calor en la Delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México.
- Gómez, S. C. Z., et. al (2023). El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la Isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo*, 44(2), págs.34-41.
- Grimm NB, et al. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science* 319:756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Hegerl, G. C., Brönnimann, S., Schurer, A., y Cowan, T. (2018). El calentamiento de principios del siglo XX: anomalías, causas y consecuencias. *WIREs Climate Change*, 9, e522. <https://doi.org/10.1002/wcc.522>
- Henríquez, C., Smith, P., Contreras San Martín, P., y Qiüense, J. (2021). Variación en la intensidad de la Isla de calor urbana por efecto del cambio climático en ciudades chilenas. *Geographicalia*, 73: 133-154.
- Hernández, M. A., Cantin García, S., Lopez Abejon, N., y Rodríguez Zazo, M. (2010). Estudio de encuestas. *Estudio de Encuestas*, 100.
- Hidalgo García, D. (2023). Spatio-temporal analysis of the urban green infrastructure of the city of Granada (Spain) as a heat mitigation measure using high-resolution images Sentinel 3. *Urban Forestry and Urban Greening*, 87, 128061. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128061>
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2023). Spatiotemporal analysis of the surface urban heat island (SUHI), air pollution and disease pattern: an applied study on the city of Granada (Spain). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30, 57617-57637. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26564-7>
- Hidalgo-García, D., & Rezapouraghdam, H. (2023). Variability of heat stress using the UrbClim climate model in the city of Seville (Spain): mitigation proposal. *Environ Monit Assess.*, 195, 1164. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11768-8>
- Hong, C., Wang, Y., & Gu, Z. (2023). How to understand the heat island effects in high-rise compact urban canopy? *City Built Environ.*, 1(2). <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00002-9>
- How Jin Aik, L., See, L., & He, J. (2020). Land use land cover and surface temperature changes in rapidly urbanizing Asian cities: A case study in Kuala Lumpur, Malaysia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>.
- Huang, Y., Tu, R., Tuerxun, W., Jia, X., Zhang, X., & Chen, X. (2024). A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China. *Buildings*, 14(3), 832. <https://doi.org/10.3390/buildings14030832>
- Hurley, A. G., & Heinrich, I. (2024). Assessing urban-heating impact on street tree growth in Berlin with open inventory and environmental data. *Urban Ecosyst*, 27, 359-375. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01450-9>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Johnson, P., Lee, H., Brown, M., & Smith, T. (2020). Impacto de las olas de calor en la intensificación de la Isla de Calor Urbano en ciudades globales. *International Journal of Climatology*, 40(5): 2158-2172. <https://doi.org/10.1002/joc.6325>
- Jones, M., & Smith, A. (2019). Geospatial tools in Urban Heat Island mapping: Advances in remote sensing and spatial analysis. *Geographical Analysis*, 51(2): 198-210. <https://doi.org/10.1111/gean.12189>
- Joshi, J., Magal, A., Limaye, V. S., et al. (2022). Climate change and 2030 cooling demand in Ahmedabad, In-



- dia: opportunities for expansion of renewable energy and cool roofs. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 27, 44. <https://doi.org/10.1007/s11027-022-10019-4>
- Kabisch, N., Remahne, F., Ilsemann, C., et al. (2023). La isla de calor urbana en condiciones de calor extremas: un estudio de caso de Hannover, Alemania. *Representante científico*, 13, 23017. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49058-5>
- Kakumanu, K., Paudel, S., & Hsu, K. (2020). Urban Heat Island Effect and the Impact of Urbanization on Land Surface Temperature in Bari, Italy. *Remote Sensing*, 12(15), 2467. <https://doi.org/10.3390/rs12152467>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Kirschner, V., Macků, K., Moravec, D., et al. (2023). Measuring the relationships between various urban green spaces and local climate zones. *Sci. Rep.*, 13, 9799. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36850-6>
- Landa, R., Magaña, V., y Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático (No. Sirsi a453952). Semarnat.
- Li, X., y Zhang, Y. (2019). Crecimiento urbano y estrés térmico en ciudades chinas: Un análisis de las tendencias recientes. *Environmental Research Letters*, 14(7), 073001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2f7d>
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J.P., et al. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, 11, 2647. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9>
- Lima, D. D. P., Oliveira, R. F., & da Silva, A. G. (2022). Urban vegetation and its influence on the microclimate in Campinas, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10498-0>
- Liu, S., Zhang, L., & Liu, X. (2016). Estimation of land surface temperature in Nanjing based on MODIS. *Chinese Journal of Ecology*, 35(4), 962-968.
- Liu, Y., Li, T., & Yu, L. (2020). Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>
- López Valencia, S. (2018). Iniciativas de espacios públicos verdes en el Municipio de Medellín (Master's thesis, Universidad de Medellín).
- Maldonado, L. M. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de Isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (11): 85-110.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359): 70-72. doi:10.1002/qj.49708435910
- Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Ghafarian Malamiri, H., Sadeghnejad, M., Krzyszczyk, J., & Ferreira, C.S.S. (2024). Modeling and Estimating the Land Surface Temperature (LST) Using Remote Sensing and Machine Learning (Case Study: Yazd, Iran). *Remote Sensing*, 16, 454. <https://doi.org/10.3390/rs16030454>
- Martín-Vide, J., Moreno García, M., Artola, V. M., & Corcobilla, M. J. (2016). Los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison y la intensidad de la isla de calor barcelonesa.
- Mathew, A., Mahendra, R. S., Ramachandra, T. V., & Vinay, S. (2019). Satellite remote sensing for detecting land use and land cover changes in Urban Heat Island analysis: A case study of Bangalore, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(6): 915-925.
- McPherson, E.G., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., & Rowntree, R. (1997). Cuantificación de la estructura, función y valor de los bosques urbanos: el Proyecto Climático del Bosque Urbano de Chicago. *Ecosistemas Urbanos*, 1(1): 49-61.
- Miao, C., Li, P., Huang, Y., et al. (2023). Coupling outdoor air quality with thermal comfort in the presence of street trees: a pilot investigation in Shenyang, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 34: 831-839. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01497-y>
- Mohammed, A., Khan, A., & Santamouris, M. (2023). Numerical evaluation of enhanced green infrastructures for mitigating urban heat in a desert urban setting. *Building Simulation*, 16: 1691-1712. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0940-x>
- Müller, J., Schmidt, A., & Wagner, K. (2021). Efecto de las olas de calor en la intensidad de la Isla de Calor Urbano en Hannover, Alemania (2018-2020). *Journal of Urban Climate*, 45: 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.juc.2021.1023>
- Nairui Liu, Morawska, L. (2020). Modeling the urban heat island mitigation effect of cool coatings in realistic urban morphology. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121560>
- Nichol, J., & Hang, J. (2012). Analysis of urban heat island (UHI) using MODIS data. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 113-122.
- NISHIZAWA, T., & SALES, J.A. (1983). The urban temperature in Rio de Janeiro, Brazil. \*Latin
- Nowak, D. J., Dwyer, J. F., & Childs, G. (1997). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe, 17-38.
- Núñez, M., & Oke, T.R. (1977). El balance energético de un cañón urbano. *Revista de Meteorología y Climatología Aplicadas*, 16(1): 11-19.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., et al. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Okyere, S. A., Diko, S. K., Abunyewah, M., & Kita, M. (2019). Toward citizen-led planning for climate change adaptation in Urban Ghana: Hints from Japanese 'Machizukuri' activities. The geography of climate change adaptation in Urban Africa, 391-419.
- Oliver Yébenes, M. Cambio climático, criterios ESG y regulación reciente: retos y oportunidades.



- Organización Mundial de la Salud. (2021). Efectos del cambio climático en la salud: Adaptación y mitigación. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Economía euroasiática Rev (2024). <https://doi.org/10.1007/s40822-023-00251-x>
- Pace, R., De Fino, F., Rahman, M.A., et al. (2021). A single tree model to consistently simulate cooling, shading, and pollution uptake of urban trees. *International Journal of Biometeorology*, 65(2): 277–289. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02030-8>
- Paeth, H., Pollinger, F., & Cristóbal, Y. (2017). Detección y atribución de señales multivariadas de cambio climático mediante análisis discriminante y teorema bayesiano. *Journal of Climate*, 30(19): 7757–7776. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0850.1>
- Parsaee, M., Mastani Joybari, M., Mirzaei, P. A., & Haghghat, F. (2019). Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. *Environmental Technology and Innovation*, 14: 100341. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100341>
- Pedrozo Acuña, A. (2012). Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Campeche, México. México: Banco Mundial.
- Peng, J., Qiao, R., Wang, Q., et al. (2024). Diversified evolutionary patterns of surface urban heat island in new expansion areas of 31 Chinese cities. *NPJ Urban Sustainability*, 4(1): 14. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00152-1>
- Peng, J., Wang, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2024). Investigation of Urban Heat Island effects using Landsat 8 and Landsat 9 in Kayseri, Turkey (2013–2022). *Remote Sensing of Environment*, 275, 112965. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.112965>
- Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., ... & Rama, B. (2022). CIPF 2022: Cambio climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad: contribución del grupo de trabajo II al séptimo informe de evaluación del panel intergubernamental sobre cambio climático.
- Pritipadmaja, Garg, R.D., & Sharma, A.K. (2023). Assessing the Cooling Effect of Blue-Green Spaces: Implications for Urban Heat Island Mitigation. *Water*, 15(12), 2983. <https://doi.org/10.3390/w15162983>
- Quiñones, U. M. (2023). Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1): 13.
- Ramirez, A. G., Gómez, J. D., Monterroso, A. I., del Noroeste, C. R. U., & de Suelos, D. (2016). Escenarios de cambio climático y desarrollo rural. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(6): 15-26.
- Ramos, M. M., Vide, J. M., García, M. D. C. M., & i Bonastre, J. S. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la Isla de calor en Barcelona. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, (17), 51-77.
- Rivera Arriaga, E., Vega Serratos, B. E., Posada Vanegas, G., & Mangas Che, E. A. (2020). Adaptación de edificios a efectos extremos de lluvia en San Francisco de Campeche, México. *Atmósfera*, 33(2): 159-174.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.
- Rosenzweig, C., & Neofotis, P. (2013). Detección y atribución de impactos antropogénicos del cambio climático. *WIREs Climate Change*, 4: 121-150. <https://doi.org/10.1002/wcc.209>
- SAMPAIO, A.H.L. (1981). Correlaciones entre uso del suelo e ilha de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador; Depto. de G\* de Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas de Univ. de Sao Paulo.
- Sánchez Rodríguez, R., & CEPAL, N. (2013). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santos, J. A., Oliveira, A. R., & Lima, A. A. (2018). The use of remote sensing to analyze urban heat islands in Manaus, Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.006>
- Schatz, J., & Kucharik, C. J. (2015). Mapping urban land use and land cover in Phoenix, Arizona, using remote sensing and GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 53: 49-58.
- Schwalm, C.R., Glendon, S., & Duffy, P.B. (2020). RCP8.5 pistas de emisiones acumuladas de CO2. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 117(33): 19656-19657.
- Sheng, W., Lu, D., & Zhan, Z. (2017). Remote sensing retrieval of urban heat island effect based on a modified local climate zones scheme: A case study of Nanjing, China. *Remote Sensing*, 9(2), 113.
- Small, G., Gaston, I., Jimenez, I., Salzl, M., & Shrestha, P. (2020). Urban Heat Island Mitigation Due To Enhanced Evapotranspiration In An Urban Garden In Saint Paul, Minnesota, Usa. *Wit Transactions on Ecology and the Environment*, 1. Retrieved from <https://par.nsf.gov/biblio/10208756>. <https://doi.org/10.2495/UA200041>
- Smith, J., Brown, M., & Lee, C. (2023). Urban Heat Islands: Strategies for adaptation and mitigation in modern cities. *Journal of Urban Climate*, 47: 104324. <https://doi.org/10.1016/j.juc.2023.104324>
- Soltani, A., Sharif, E., et al. (2017). Variación diaria del efecto isla de calor urbano y sus correlaciones con la vegetación urbana: un estudio de caso de Adelaida. *Fronteras de la investigación arquitectónica*, 6(4): 529-538.
- Song, Y., Wang, Y., Lei, Y., et al. (2003). Methods and prospects for the studies on urban heat island in China. *Advances in Earth Science*, 18(2): 231-237.
- Soumendu Chatterjee, Ansar Khan, Apurba Dinda, Sk Mithun, Rupali Khatun, Hashem Akbari, Hiroyuki Kusaka, Chandana Mitra, Saad Saleem Bhatti, Quang Van Doan,



- Yupeng Wang, *et al.* (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of The Total Environment*, 663, 610-631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900.
- Taylor, K., Evans, B., & Martinez, L. (2021). Emerging methodologies in Urban Heat Island mapping: Remote sensing, GIS, and UAVs. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112450. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112450>
- Terjung, W. H., & Louie, S. S. (1973). Radiación solar e Islas de calor urbanas. *Anales de la Asociación de Geógrafos Americanos*, 63(2): 181-207.
- Tian, X., Dong, C., & Li, D. (2021). Assessment of the impact of land use/land cover changes on land surface temperature in Beijing based on MODIS data. *Science of the Total Environment*, 753, 142064.
- Torres Quintana, J. L. (2020). Estrategias de mitigación de Islas de calor urbano en Toluca.
- Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. In Estudio aplicado al caso de Madrid. Congreso Internacional Sustainable Building. Madrid. España (pág. 15).
- Vélez, S. G. (2021). Estado actual y retos en el marco de políticas públicas en materia de Isla urbana de calor en la CDMX.
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24.
- Vo, T. T., Hu, L. et al. (2021). Diurnal evolution of urban tree temperature at a city scale. *Scientific Reports*, 11(1), 10491. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89972-0>
- Walther, G. R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pyšek, P., Kühn, I., & Settele, J. (2009). Especies exóticas en un mundo más cálido: riesgos y oportunidades. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(12), 686-693.
- Wang, J., Zhou, W., & Zhao, W. (2023). Higher UHI Intensity, Higher Urban Temperature? A Synthetical Analysis of Urban Heat Environment in Urban Megaregion. *Remote Sensing*, 15, 5696. <https://doi.org/10.3390/rs15245696>
- Weng, Q., Deng, J., & Wang, K. (2014). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89, 86-103.
- Xiang, C., & Tao, L. (2023). The Design of Façade-Integrated Vertical Greenery to Mitigate the Impacts of Extreme Weather: A Case Study from Hong Kong. *Buildings*, 13(11), 2865. <https://doi.org/10.3390/buildings13112865>
- Xiang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Seasonal Variation of Urban Heat Island Effect and its Influencing Factors in Dalian, China. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102886. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102886>
- Yang, J., Jin, C., & Li, H. (2018). Spatio-temporal patterns of urban heat island intensity influenced by land use and land cover change in a megacity. *Science of the Total Environment*, 610, 229-240.
- Zermeño Díaz, D. M. (2008). Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/65965>
- Zhang, C., Li, W., & Chen, H. (2015). The effects of urbanization on the temporal and spatial distribution of surface urban heat island. *Journal of Geographical Sciences*, 25(9), 1085-1102.
- Zhang, J., Mohegh, A., Li, Y., Levinson, R., & Ban-Weiss, G. (2018). Ciencia y tecnología ambiental, 52(19), 11188-11197. doi: 10.1021/acs.est.8b00732
- Zhang, Y., Ren, G., & Wang, G. (2019). Changes in urban heat island intensity and associated changes in the surface energy budget in Shanghai, China. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2065-2082.
- Zhou, D. (2018). Evaluation of urban heat island from Landsat data: A case study in the Pearl River Delta region, China. *Remote Sensing*, 10.

