

Islas de calor urbanas superficiales en Toluca y Zinacantepec, estado de México en 2022

Surface urban heat islands in Toluca and Zinacantepec, state of Mexico in 2022

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i17.299>

MARTÍN DAVID ROSAS MARTÍNEZ*

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID: 0009-0006-5746-6110

Correo electrónico: mdrosasm@hotmail.com

*Autor de correspondencia

SALVADOR ADAME MARTÍNEZ

Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID:0000-0002-4499-0099

Correo electrónico: sadamem@uaemex.mx

Recepción: 3 de julio de 2024. Aceptación: 22 de agosto de 2024

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) en Toluca y Zinacantepec, México, durante 2022, para explicar su comportamiento y distribución en relación con el uso del suelo. Se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 para estimar la temperatura superficial. La metodología incluyó extracción y procesamiento de información, análisis espacial de las islas de calor y uso de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Los resultados muestran variaciones significativas en la intensidad de las ICUS según la estación, las que son más pronunciadas en verano y más moderadas en otoño. Las áreas industriales y las superficies con menor cobertura vegetal presentaron las temperaturas más altas, mientras que las de mayor vegetación mostraron temperaturas más bajas. Las limitaciones del estudio incluyen la falta de información detallada sobre la distribución de factores que influyen en las ICUS, la dependencia de imágenes satelitales con condiciones atmosféricas específicas, y la variabilidad temporal y espacial de las islas de calor, lo que

dificulta la generalización de los resultados. El aporte del trabajo es la identificación de los factores que contribuyen a la formación de las islas de calor urbanas en Toluca y Zinacantepec. Al señalar la influencia de la densidad de construcción, los materiales que retienen calor y la falta de vegetación, el estudio proporciona información esencial para desarrollar políticas urbanas y estrategias de planificación efectivas, para mejorar la calidad de vida al mitigar el impacto del calor extremo en las zonas urbanas.

Palabras clave: estructura urbana, percepción remota, temperatura superficial, uso de suelo, isla de calor urbana

ABSTRACT

This study aims to analyze surface urban heat islands (SUHI) in Toluca and Zinacantepec, Mexico, during 2022, to explain their behavior and distribution in relation to land use. Using remote sensing data and spatial analysis, Landsat 8 satellite images were processed to estimate surface temperature. The methodology included infor-



mation extraction and processing, spatial analysis of heat islands, and the use of geographic information system (GIS) tools. The results show significant variations in SUHI intensity according to the season, being more pronounced in summer and more moderate in autumn. Industrial areas and regions with less vegetation cover had the highest temperatures, while areas with more vegetation showed lower temperatures. The study's limitations include the lack of detailed information on the distribution of factors influencing SUHI, the dependence on satellite images with specific atmospheric conditions, and the temporal and spatial variability of heat islands, making it challenging to generalize the results. A significant contribution of the work is the precise identification of factors contributing to the formation of urban heat islands in Toluca and Zinacantepec. By detailing the influence of building density, heat-retaining materials, and lack of vegetation, the study provides essential information for developing effective urban policies and planning strategies, thus improving quality of life by mitigating the impact of extreme heat in urban areas.

Keywords: urban structure, remote sensing, surface temperature, land use, urban heat island

INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización acelerado ha traído consigo un fenómeno preocupante: las islas de calor urbanas superficiales (ICUS), que se caracterizan por temperaturas elevadas en comparación con sus alrededores; ello es un claro ejemplo del impacto de la actividad humana en el clima local, que afecta tanto la salud como al medio ambiente.

El fenómeno de la isla de calor urbana se caracteriza por la diferencia de temperatura entre áreas urbanas y rurales. Este fenómeno surge de dos procesos interrelacionados: 1) la transformación de suelos naturales en artificiales, con materiales de mayor inercia térmica, y 2) las actividades humanas asociadas a la producción y el consumo de energía. Estos procesos, junto con el

crecimiento poblacional y la expansión urbana, alteran el clima local y comprometen la seguridad de las ciudades (Córdova, 2011).

Según cómo se midan, las islas de calor urbanas se pueden categorizar en dos tipos: 1) las atmosféricas (ICUA), que se detectan a través de la temperatura del aire situada entre la cobertura del dosel y la capa límite de la ICU, y 2) las superficiales (ICUS), que se determinan a partir de las temperaturas de superficie terrestre por medio de la percepción remota. Aunque ambas presentan patrones espaciales parecidos, las ICUA suelen mostrar una mayor discrepancia térmica durante la noche, mientras que las ICUS lo hacen durante el día (Sarricolea y Romero, 2010).

Las ICUA se forman por la liberación de calor absorbido durante el día por los materiales urbanos, el cual se libera más lentamente durante la noche debido a su alta capacidad de almacenamiento térmico. Por otro lado, las ICUS se intensifican durante el día, debido a que los materiales de construcción urbanos, como el hormigón y el asfalto, absorben y almacenan más calor que las superficies naturales, lo que aumenta la temperatura de la superficie terrestre.

Además, es importante mencionar que estos fenómenos tienen diversas implicaciones para la calidad de vida en las ciudades, ya que pueden contribuir al calentamiento global, aumentar el consumo de energía (por ejemplo, para refrigeración), deteriorar la calidad del aire y afectar la salud humana, entre otros efectos.

Los impactos de las islas de calor se han estudiado ampliamente en las últimas décadas, y se han revelado implicaciones negativas en diversos aspectos. Las ICUS contribuyen al aumento de la demanda energética para la refrigeración, lo que a su vez incrementa las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire. Además, las temperaturas elevadas pueden tener graves consecuencias para la salud humana, como golpes de calor, enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso un aumento de la mortalidad por las olas de calor (Sarricolea y Romero, 2010).

Las intensas olas de calor que han afectado importantes ciudades de Norteamérica y Europa entre 2003 y 2010 han generado un renovado interés en el análisis de las islas térmicas urbanas por parte de las comunidades científicas que estudian el ambiente y el clima urbano. Este renovado interés se debe principalmente a que el impacto de las olas de calor se ve magnificado por la formación de la isla térmica en las áreas urbanas. Por lo tanto, se ha puesto énfasis en caracterizar la intensidad y la extensión de estas islas de calor en sus componentes vertical (atmosférica) y horizontal (superficial), así como se ha intentado comprender las interacciones entre el dosel urbano y la atmósfera (Córdova, 2011).

La necesidad de analizar a fondo este fenómeno radica en que las islas de calor urbanas exacerbaban los efectos negativos de las olas de calor en las ciudades, lo cual representa un riesgo significativo para la salud y el bienestar de los residentes urbanos durante estos eventos climáticos extremos.

La descripción detallada del fenómeno de la isla de calor urbana requiere una red sofisticada de estaciones climáticas, radiómetros y sondeos atmosféricos verticales que facilitan la simulación de las variaciones atmosféricas en las zonas urbanas. Sin embargo, en los países latinoamericanos estas técnicas no son comúnmente utilizadas, por la falta de redes adecuadas y el alto costo de otras alternativas de detección. En estas situaciones, la utilización de sensores remotos con banda térmica se ha convertido en una opción científica factible para examinar la formación de la isla de calor urbana de superficie y calcular su alcance espacial y su intensidad (Voogt y Oke, 2003).

Los episodios de calor, que se intensifican con la formación de la isla de calor urbana, suelen ocurrir durante el verano en las latitudes subtropicales, o durante la temporada de sequía en las latitudes tropicales. El incremento de la radiación solar, asociado a las condiciones meteorológicas de la temporada de sequía o verano (altas presiones, cielos despejados), provoca también un aumento del calor superficial, lo que intensifica el estrés hídrico en la vegetación, la deshidratación del suelo y la sequedad del aire.

METODOLOGÍA

Esta investigación presenta una metodología para detectar y calcular la intensidad de las islas de calor urbanas superficiales, detallando los recursos y fuentes de información empleados.

La metodología propuesta busca superar las limitaciones actuales en la evaluación de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS), considerando las variables que las generan. Se basa en la premisa de que es posible estimar la intensidad de las ICUS mediante el análisis del entorno urbano. El estudio se centra en Toluca y Zinacantepec, municipios que han experimentado un crecimiento urbano acelerado y cambios en el uso del suelo. Se utilizan imágenes satelitales y datos geográficos para analizar la relación entre el aumento de la temperatura superficial y la expansión urbana.

La elección de técnicas de percepción remota y análisis espacial se basa en su capacidad para proporcionar datos precisos y detallados sobre la temperatura superficial a través de grandes áreas geográficas. Las imágenes satelitales Landsat 8 fueron seleccionadas por su disposición, resolución espacial y temporal, lo que permite el monitoreo continuo de los cambios en la temperatura superficial urbana. Además, el uso de sistemas de información geográfica (SIG) facilita la integración y el análisis de diversos datos geoespaciales, y permite la mejor comprensión de la relación entre la superficie artificial (área urbana) y las islas de calor. Estas técnicas son cruciales para el objetivo del estudio, que es identificar y caracterizar las islas de calor urbano superficial (ICUS) en Toluca y Zinacantepec y evaluar su impacto en la gestión urbana y ambiental.

La expansión de las ciudades implica la sustitución de la vegetación natural por superficies artificiales, lo que reduce la capacidad del suelo para retener agua y, por consiguiente, el proceso de enfriamiento natural, por lo que la intensidad de las islas de calor depende de diversos factores, a saber: la densidad de construcción, la orientación de los edificios, las propiedades térmicas de los materiales utilizados y la disponibilidad

y configuración de los espacios abiertos y áreas verdes (Olalla y Calera, 2005).

El fenómeno de las islas de calor urbano superficial se manifiesta cuando las ciudades son más cálidas en comparación con las zonas rurales circundantes, debido a la transformación de superficies cubiertas de vegetación por materiales con alta capacidad térmica. Las superficies duras y artificiales, como el asfalto, el concreto y los tejados oscuros, tienen una gran capacidad para absorber el calor solar.

El proceso para determinar la intensidad de las islas de calor en la superficie urbana implica evaluar estos factores y su impacto en la temperatura. Sin embargo, la información detallada sobre la distribución de estos factores en la zona de estudio en diferentes momentos de análisis no está disponible, lo que limita la interpretación completa de los valores estimados.

La metodología consta de cinco etapas principales:

4. Extracción y procesamiento de información de percepción remota: Se obtienen imágenes satelitales Landsat 8 para las cuatro estaciones del año. Estas imágenes se seleccionaron para garantizar condiciones atmosféricas anticiclónicas y cielos despejados, lo que permite un análisis preciso de la temperatura superficial.
5. Generación y análisis de información de cambio de uso de suelo: Se utilizan polígonos de áreas geoestadísticas básicas (AGEB) y nomenclaturas de cobertura del suelo (CORINE Land Cover) para mapear el uso del suelo en la zona de estudio. Se clasifican las áreas en diferentes categorías, como áreas urbanas, comerciales, industriales y espacios verdes.
6. Análisis espacial e intensidad de las islas de calor: Se derivan las temperaturas de la superficie terrestre a partir de las imágenes satelitales Landsat 8. Se aplican correcciones atmosféricas y se utilizan métodos como el de valores mínimos del histograma y el método NEM para obtener estimaciones precisas de la temperatura. Luego, se calcula la intensidad de la isla de calor restando la tempera-

tura de una estación rural de referencia a la temperatura de cada píxel en las imágenes.

7. Análisis de resultados: Se establece una relación entre las categorías de uso de suelo y la intensidad de las islas de calor. Se asignan pesos cualitativos a cada categoría de uso de suelo según su grado de antropización (modificación humana).
8. Conclusiones: Sobre la base de los resultados del análisis, se extraen conclusiones sobre la relación entre la zona urbana y la formación de islas de calor en la ZMT. Se discuten las implicaciones de estos hallazgos para la planeación urbana y el desarrollo sostenible.

Los materiales utilizados en esta investigación incluyen:

- Imágenes satelitales Landsat 8: Proporcionan datos de temperatura de la superficie terrestre y permiten la identificación de islas de calor.
- Datos de estaciones meteorológicas: Solo se utilizó información sobre las condiciones atmosféricas, para validar los resultados del análisis de las imágenes satelitales.
- Mapas de uso de suelo: Muestran la distribución espacial de las diferentes categorías de uso de suelo en la zona de estudio.
- Software ArcGIS: Se utiliza para procesar y analizar los datos geográficos y generar mapas temáticos.

INFORMACIÓN SOBRE EL ESTADO ATMOSFÉRICO

Se analizó la presencia de la isla de calor en los municipios estudiados durante las cuatro estaciones del año. Los meses más característicos de cada estación en el hemisferio norte son: enero (invierno), marzo (primavera), junio (verano) y octubre (otoño).

Es importante destacar que la manifestación del fenómeno de la isla de calor en esta área depende de ciertas condiciones específicas. Para que este efecto se manifieste con su máxima intensidad es necesario que las condiciones atmosféricas incluyan un período de anticiclón con

ausencia de vientos y cielos despejados, lo que favorece un mayor aislamiento en la superficie (López y otros, 1993).

Para garantizar que se cumplan las condiciones de cielos despejados, es necesario elegir imágenes satelitales que presenten alrededor del 3% de nubosidad en toda la escena y un 0% de nubosidad en el área específica de estudio, lo que proporcionará resultados más precisos.

Así, pues, se consideraron las condiciones atmosféricas de anticiclón y los meses representativos del año para establecer la fecha del análisis. De esta manera, se definieron las fechas de estudio (enero 29, marzo 26, junio 30 y octubre 12).

DATOS Y PROCESOS PARA LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL

Datos satelitales: Se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 para las cuatro estaciones del año. Estas imágenes, que pertenecen al nivel 1T (con correcciones geométricas y radiométricas), se seleccionaron para asegurar condiciones atmosféricas anticiclónicas y cielos despejados, lo que garantiza un análisis preciso de la temperatura superficial. La banda 10 como banda térmica, y las bandas 4 y 5 se utilizan para este propósito.

Procedimiento de estimación: El procedimiento de estimación de la temperatura superficial se basa en la medición de la radiación electromagnética emitida por la superficie terrestre (Chuvieco, 2002). Dado que la radiación detectada por el sensor del satélite incluye tanto la radiación del suelo como la de la atmósfera, se requiere un preprocesamiento para corregir la influencia atmosférica. Se utiliza el método de valores mínimos del histograma propuesto por Chávez (1996) para realizar esta corrección.

Derivación de la temperatura superficial: La metodología sigue los siguientes pasos para derivar la temperatura superficial:

1. **Conversión a radiancia:** Los niveles digitales (ND) de las imágenes se convierten a radiancia espectral utilizando factores de reescalado específicos del satélite Landsat 8.
2. **Determinación de la temperatura de brillo:** Se utiliza la ecuación de Planck para calcular

la temperatura de brillo (temperatura radiante) a partir de la radiancia espectral.

3. **Corrección de emisividad:** Se aplica el método NEM (Gillespie, 1985) para corregir la emisividad de la superficie y obtener una estimación más precisa de la temperatura superficial. Este método utiliza un valor inicial de emisividad y lo ajusta iterativamente para cada píxel y cada banda térmica.
4. **Cálculo de la intensidad de la ICUS:** La intensidad de la isla de calor se calcula restando la temperatura de una estación rural de referencia a la temperatura de cada píxel en las imágenes.

Clasificación de la intensidad: Finalmente, los valores de intensidad de la isla de calor se clasifican según la diferencia de temperatura entre la zona urbana y la zona rural circundante:

- Débil: 1°C a 3°C
- Moderada: 3°C a 5°C
- Fuerte: 5°C a 7°C
- Muy fuerte: > 7°C

Los valores por debajo de cero se clasifican como islas frías.

CASOS DE ESTUDIOS DE ISLAS DE CALOR A ESCALAS INTERNACIONAL Y NACIONAL

Las islas de calor urbanas (ICU) representan un problema significativo y creciente mundial y nacional. Estas áreas urbanas experimentan temperaturas más altas que sus alrededores rurales por la urbanización, los cambios en el uso del suelo y otros factores antropogénicos. A continuación se presentan varios estudios de caso que ilustran la situación de las ICU en diferentes ciudades del mundo y en México.

Caso Quito, Ecuador. En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), el estudio de Baño (2017) analizó la ICU utilizando imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS entre 2006 y 2016. El objetivo fue entender cómo la urbanización y los cambios en el uso del suelo han afectado la

temperatura de la superficie terrestre (LST) y la calidad térmica del aire. Los resultados mostraron que las ICU son más intensas en áreas rurales con uso mixto de suelo en comparación con áreas urbanas. Se observaron aumentos de temperatura en las parroquias de Tababela, Calderón y Guayllabamba, mientras que en La Concepción e Iñaquito hubo una disminución. El estudio concluye que la relación entre la temperatura de la superficie y el uso del suelo es crucial para caracterizar las ICU y destaca la importancia de la planificación urbana y de estrategias de mitigación.

Caso Bangkok, Tailandia. Keeratikasikorn y otros (2018) analizaron la isla de calor superficial urbana (SUHI) en Bangkok utilizando imágenes Landsat 8 entre 2014 y 2016. El estudio abarcó diez categorías de uso del suelo, según el plan de zonificación de Bangkok. Se encontraron intensidades medias de SUHI más altas en el centro de la ciudad, y en zonas con mayor vegetación, como áreas agrícolas y de conservación rural, las intensidades fueron más bajas. El estudio identificó también islas de frescor urbano superficial (SUCI) en áreas verdes, y puntos calientes (HSS) en superficies impermeables. Los resultados son útiles para desarrollar estrategias de mitigación del SUHI y promover un desarrollo urbano más sostenible.

Caso Medellín, Colombia. Soto (2019) estudió la isla de calor superficial (ICS) en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), utilizando para ello imágenes Landsat adquiridas entre 1986 y 2016. Los resultados mostraron que la temperatura superficial promedio en el área urbana fue de 25.85°C; esto es, 4.81°C más cálida que en las áreas rurales circundantes. La densidad de vegetación se mantuvo relativamente estable, aunque algunas áreas experimentaron una pérdida significativa debida al crecimiento urbano. Se concluye que el fenómeno de la ICU es evidente en el valle de Aburrá, y se concentra en el centro de la ciudad. Se recomienda que las acciones de mitigación se centren en esta área y en los barrios con mayor pérdida de vegetación.

Caso Tampico, Tamaulipas, México. Fuentes (2014) investigó las ICU en Tampico, México, utilizando datos climáticos históricos y mediciones de

temperatura. Los resultados revelaron la existencia de múltiples islas de calor intensificadas durante el verano. Estas islas de calor tienen un impacto negativo en la calidad del hábitat, causan estrés térmico y aumentan el riesgo de enfermedades. El estudio sugiere medidas de mitigación como aumentar la vegetación y los cuerpos de agua, evitar grandes extensiones de asfalto y promover un desarrollo urbano más compacto y vertical.

Caso zonas desérticas en México. Marincic (2022) exploró las ICU en ciudades desérticas de México, y detalló las causas y consecuencias del fenómeno. Las ciudades desérticas presentan características distintivas en el comportamiento de la ICU. Durante el día pueden experimentar un “efecto oasis”, y ser más frías por la sombra y la evapotranspiración de la vegetación. Sin embargo, durante la noche liberan el calor almacenado y se convierten en islas de calor. El estudio destaca la importancia de la vegetación en la mitigación de la ICU, y sugiere estrategias como el uso de materiales reflectantes y la gestión eficiente del agua.

Caso Ciudad de México, México. Barrera Alarcón *et al.* (2022) analizaron la ICUS en la Ciudad de México, y utilizaron imágenes satelitales para identificar zonas vulnerables. Las temperaturas nocturnas más altas se encontraron en áreas cercanas al centro de la ciudad, correlacionadas con mayor densidad de viviendas y unidades económicas. Las áreas con vegetación registraron temperaturas nocturnas más bajas. El estudio destaca la importancia de considerar la densidad de población, el uso del suelo y la cobertura vegetal en la planificación urbana para mitigar los efectos de la ICUS y proteger las poblaciones vulnerables.

Estos estudios de caso proporcionan una visión integral de las ICU en diferentes contextos urbanos y geográficos. La relación entre la urbanización, el uso del suelo y las temperaturas de superficie es crucial para entender y mitigar el fenómeno de las ICU. Las estrategias de mitigación incluyen aumentar la vegetación, mejorar la gestión del agua y promover un desarrollo urbano sostenible. Implementar estas estrategias es esencial para mejorar la calidad de vida de los habitantes y contribuir a la lucha contra el calentamiento global.

RESULTADOS

En el interior de las zonas urbanizadas las condiciones naturales varían considerablemente en comparación con las áreas circundantes, lo que da lugar a un microclima único: el clima de la capa de aire superficial de distintas partes de la zona urbana. La disminución de áreas verdes en las ciudades, sustituidas por asfalto y edificaciones, aumenta la temperatura y crea un microclima urbano más cálido.

En la actualidad no existe un acuerdo unánime sobre cuándo se producen las islas de calor y cuándo alcanzan su pico de intensidad. Las islas de calor se forman y evolucionan en función del tiempo y el espacio, y dependen de aspectos específicos del entorno físico y social, como la ubicación geográfica, las características urbanas y las condiciones climáticas. Además, las diferentes estaciones del año influyen significativamente en los niveles de intensidad registrados, ya que elementos como la radiación, la cobertura del suelo y las condiciones atmosféricas generan variaciones notables.

ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES EN PRIMAVERA (26 DE MARZO)

Las islas de calor urbanas superficiales durante la primavera, así como en otras estaciones del año, son el producto de factores vinculados con la urbanización y las particularidades de las ciudades. Entre estos factores se encuentran la densidad de las edificaciones, el uso de materiales que acumulan calor, la escasez de vegetación y

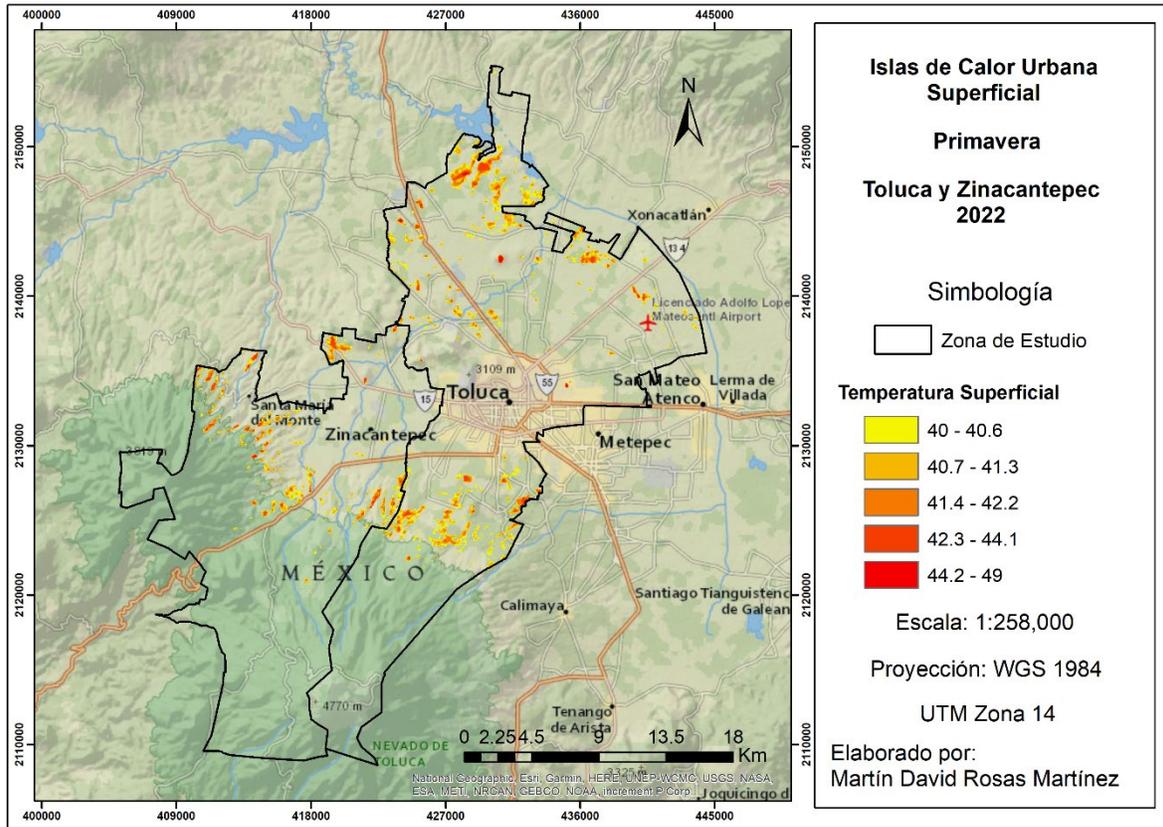
las emisiones de calor generadas por actividades humanas, entre otros elementos.

Durante la primavera el fenómeno de la isla de calor urbana puede ser especialmente perceptible, debido al aumento de las temperaturas y la intensidad de la radiación solar, así como al uso intensivo de sistemas de calefacción o aire acondicionado que se mantienen desde el invierno o se anticipan al verano, respectivamente. Además, la primavera es un periodo de cambio en el cual la vegetación urbana puede estar aún en proceso de recuperación del invierno, lo que disminuye temporalmente su habilidad para atenuar el calor (Sarricolea y otros, 2008).

Estas islas representan un fenómeno climático que se distingue por presentar temperaturas superiores en zonas urbanas, en contraste con las áreas rurales circundantes. Este efecto se agudiza en la primavera, una estación de cambio que ve un incremento progresivo de las temperaturas. La primavera es especialmente significativa para el análisis de las ICUS, debido a diversos factores que influyen en su creación y sus efectos durante este periodo.

En los municipios de Zinacantepec y Toluca las islas de calor se manifiestan con variados tamaños e intensidades, y su comportamiento cambia en función de la estación del año y del tipo de temperatura que se analice. Según se muestra en la figura 1, la intensidad de la isla de calor en primavera se consideró moderada-alta, por la extensión y la ubicación de la isla. Aunque existen intensidades más altas, estas se distribuyen de manera dispersa, formando micro islas.

FIGURA 1
Isla de calor superficial en primavera (26 de marzo)



Fuente: Elaboración propia.

Este fenómeno se intensifica en primavera debido a varios factores:

1. Aumento de temperaturas y radiación solar: La primavera trae un aumento gradual de las temperaturas y la radiación solar, lo que contribuye a la formación de ICU.
2. Uso intensivo de sistemas de climatización: El uso de calefacción en invierno y aire acondicionado al acercarse el verano genera calor adicional en las áreas urbanas.
3. Recuperación de la vegetación urbana: En primavera, la vegetación urbana aún se está recuperando del invierno, lo que reduce su capacidad para mitigar el calor a través de la sombra y la evapotranspiración.

El estudio revela que la intensidad de las ICU en primavera es moderada-alta en ambos municipios, aunque existen microislas de mayor intensidad dispersas. Esta intensidad moderada se atribuye a la extensión y la ubicación de las islas de calor.

Factores que condicionan la aparición de ICU en primavera:

- Bajos niveles de humedad del suelo: La primavera es una época seca en la región, lo que reduce la humedad del suelo y disminuye su capacidad para regular la temperatura.
- Escasa vegetación: La falta de vegetación limita la sombra y la evapotranspiración, procesos naturales que ayudan a enfriar el ambiente.

- **Materiales de construcción:** Los materiales urbanos, como el asfalto y el cemento, absorben y retienen el calor, lo cual eleva las temperaturas en las ciudades.

Distribución espacial de las ICU:

Las ICU se distribuyen de manera heterogénea en ambos municipios, con diferentes intensidades y ubicaciones. Se observan en áreas industriales, como el parque Industrial San Cayetano, y en empresas como Genomma Lab, donde las temperaturas oscilan entre 41°C y 43°C. También se encuentran en zonas con baja reflectividad (albedo) como Puerta México, con temperaturas de 42°C a 45°C.

En áreas residenciales, como el fraccionamiento Paseos San Martín, la falta de vegetación y los materiales de construcción contribuyen a la formación de ICU. En el sur de Toluca, localidades como El Refugio, Santiago Tlacotepec y San Felipe Tlalmimilolpan experimentan ICU con temperaturas de 40°C a 42°C, debidas a cambios en el uso del suelo y al desarrollo urbano.

En Zinacantepec, las ICU de mayor intensidad se encuentran en Santa María del Monte, El Cóporo y San Juan de las Huertas, con temperaturas de 42°C a 49°C. Estas áreas presentan una combinación de estructuras urbanas y cultivos, lo que sugiere que la actividad agrícola también puede influir en la formación de ICU.

Cabe mencionar que las ICU no se limitan a las zonas urbanas, sino también pueden estar

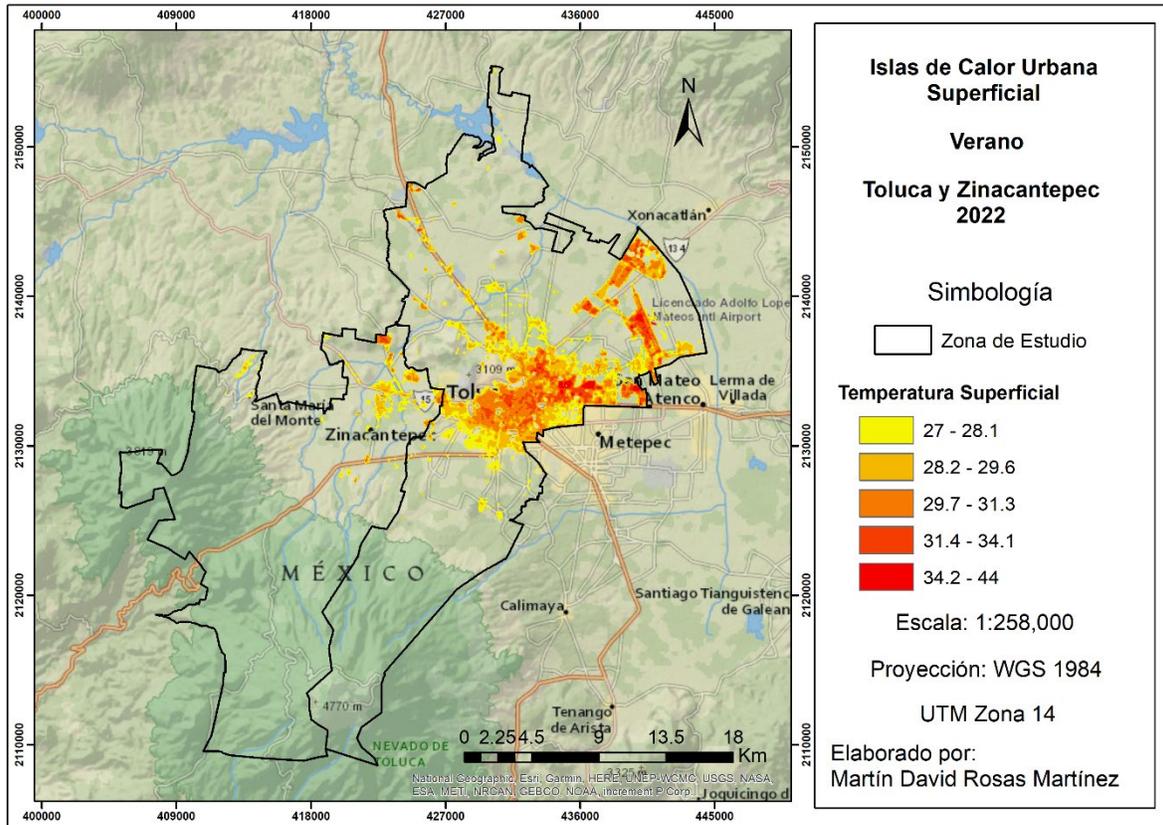
presentes en áreas de cultivo. Factores como la transformación del uso del suelo, la falta de vegetación y las propiedades térmicas de los materiales agrícolas contribuyen a este fenómeno. La deforestación, la exposición del suelo, el uso de plásticos en invernaderos y la reducción de la evapotranspiración son algunos de los factores que aumentan las temperaturas en áreas de cultivo (Olalla y Calera, 2005).

El análisis de las ICU en primavera en Zinacantepec y Toluca revela la compleja interacción de factores climáticos, urbanos y agrícolas que contribuyen a este fenómeno. La comprensión de estas dinámicas es crucial para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación que promuevan entornos urbanos más sostenibles y resilientes al cambio climático.

ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES EN VERANO (30 DE JUNIO)

Las islas de calor que se forman en el verano llegan a una intensidad elevada (figura 2). El patrón en esta estación se comprende de acuerdo con lo informado por Jáuregui (1992), quien indica que las islas de calor en ciudades tropicales se manifiestan con mayor fuerza en la temporada húmeda que en la seca. En particular, las islas diurnas alcanzan su desarrollo máximo en el hemisferio norte en julio (como sucede con los municipios estudiados), impulsadas por la altura solar, que favorece el enfriamiento por evaporación de áreas rurales con vegetación.

FIGURA 2
Isla de calor superficial en verano (30 de junio)



Fuente: Elaboración propia.

En verano, las ICUS alcanzan su máxima intensidad, clasificada como “muy fuerte”, aunque también se observan micro islas de intensidad débil a fuerte, como en la zona del aeropuerto de Toluca. Estas islas de calor se atribuyen a varios factores:

- Alta radiación solar: La mayor radiación solar en verano aumenta la temperatura de las superficies urbanas.
- Absorción lenta de calor por materiales urbanos: Los materiales de construcción en las ciudades absorben y liberan calor lentamente.
- Sombra de edificios de mediana altura: La sombra proyectada por estos edificios reduce la radiación solar directa.
- Escasa vegetación: La falta de vegetación en áreas urbanas limita la sombra y la evapotranspiración.

El patrón de intensidad de las ICUS en verano se explica por la época de lluvias en la región. Durante el día, gran parte del calor se utiliza en la evaporación del suelo en áreas rurales, mientras que las zonas urbanas se secan más rápido, lo que permite que la radiación caliente su superficie.

Las ICUS se concentran principalmente en el centro de Toluca y Zinacantepec, coincidiendo con las áreas de mayor densidad poblacional y de edificación. Zonas como el centro histórico de Toluca, la zona industrial y áreas residenciales densamente pobladas muestran las temperaturas más altas, que superan los 34.2°C. Se observa un gradiente de temperatura decreciente desde el centro urbano hacia las zonas periféricas, donde las áreas rurales y menos desarrolladas presentan temperaturas más bajas, entre 27°C y 29.6°C.

Factores que contribuyen a las ICUS en áreas específicas:

- Parque industrial Toluca 2000, San Blas Otzacatipan y aeropuerto internacional de Toluca: Estos sitios presentan altas temperaturas superficiales (31°C a 44°C), por la modificación del paisaje natural debida a la urbanización, la actividad humana y el uso de materiales de construcción que absorben y retienen el calor.
- Galerías Toluca, Robert Bosch Toluca y General Motors Toluca: En estas zonas, las temperaturas varían entre 38°C y 44°C, por la concentración de edificios, el uso de asfalto y concreto y la falta de áreas verdes.
- Zinacantepec (noreste): Localidades como Rancho San Jorge y Ojuelos presentan temperaturas de 27°C a 30°C, debidas a cambios en el uso del suelo y a la expansión urbana.
- Zinacantepec (oeste): Una zona boscosa, en esta parte se registran temperaturas de 29°C a 40°C, lo que podría atribuirse a la alteración de ecosistemas y cambios en la composición de la vegetación.
- Zinacantepec (suroeste y sur): La Peñuela, parque ecoturístico La Ciénega, Raíces y Par-

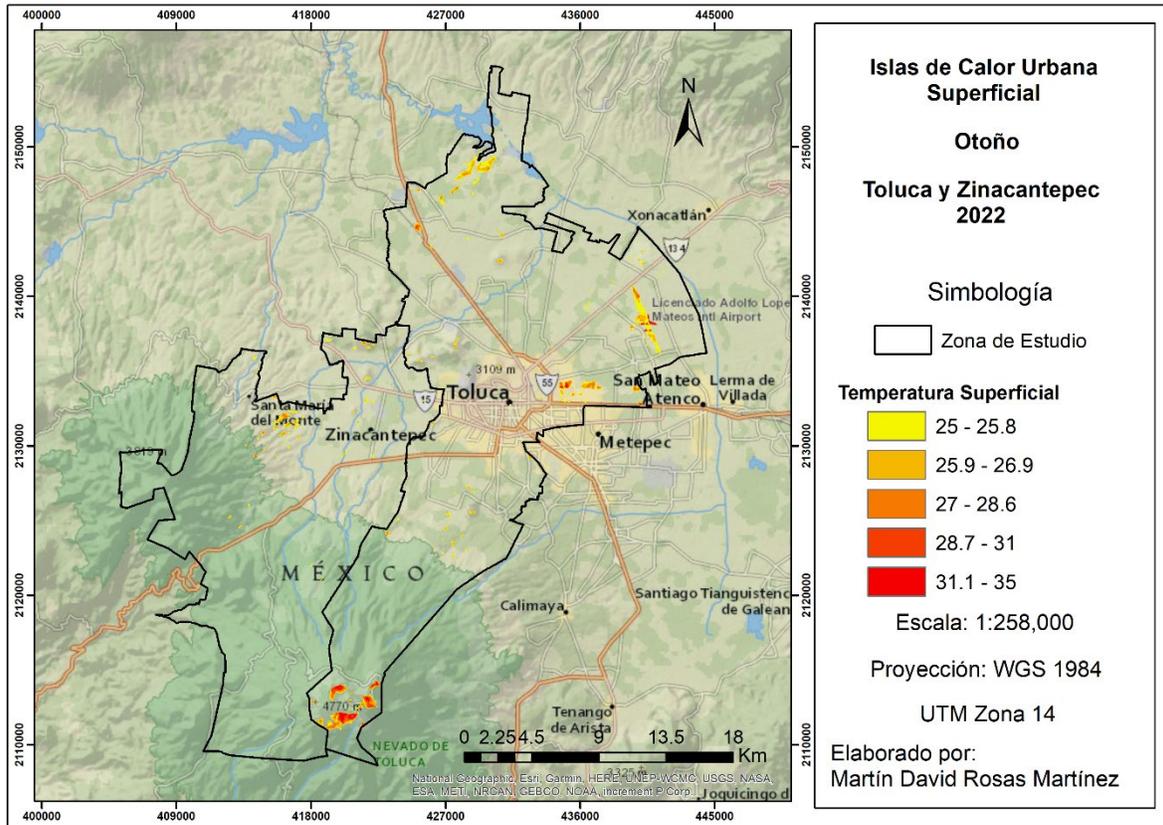
que de los Venados presentan temperaturas de 27°C a 30°C, por cambios en el uso del suelo, como la urbanización, la deforestación y la agricultura.

En resumen, el análisis de las ICUS en verano en Toluca y Zinacantepec revela cómo la urbanización, la actividad humana y los cambios en el uso del suelo contribuyen a este fenómeno. La comprensión de estos factores es esencial para implementar estrategias de mitigación y planificación urbana que promuevan un entorno más sostenible y reduzcan los impactos negativos de las islas de calor.

ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES EN OTOÑO (12 DE OCTUBRE)

El análisis de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS) durante el otoño de 2022 en Toluca y Zinacantepec revela una intensidad débil en comparación con otras estaciones (figura 3). En Zinacantepec, las ICUS de baja intensidad se concentraron principalmente en el sureste, con temperaturas de 25°C a 27°C. Estas islas se asociaron con cambios en el uso del suelo, como la urbanización y la expansión de áreas agrícolas.

FIGURA 3
Isla de calor superficial en otoño (12 de octubre)



Fuente: Elaboración propia.

En el noroeste de Zinacantepec, se observaron anomalías térmicas en zonas agrícolas y áreas urbanas en desarrollo, como el barrio de La Rosa, El Curtidor, El Cópore y la Universidad Tecnológica de Zinacantepec. Estas anomalías, con temperaturas de 25°C a 35°C, se atribuyeron al calentamiento de tierras cultivables y a los cambios de uso de suelo.

En Toluca, las ICUS de mayor intensidad se ubicaron en el noroeste y noreste, con temperaturas de 23°C a 25°C. Estas áreas se caracterizaron por escasa vegetación, lo que aumenta la exposición a la radiación solar, reduce la evapotranspiración y contribuye a la formación de islas de calor. El centro de Toluca, en particular, es susceptible al exceso de calor, debido a la densidad de edificios y la alta transferencia de calor.

En el sur de Toluca se encontraron ICUS en el parque ecológico ejidal de Cacalomacán y Mirador Don Viko Ranger, con temperaturas de 23°C a

24°C. Estas áreas, a pesar de tener más vegetación, también experimentaron el efecto de isla de calor, aunque en menor medida.

Factores que influyen en la formación de ICUS en otoño:

- Reducción de la radiación solar: La disminución de la radiación solar en otoño conduce a temperaturas más bajas en general, lo que puede influir en la intensidad de las ICUS.
- Cambios en la vegetación: La caída de hojas y la disminución de la evapotranspiración en otoño pueden afectar la capacidad de la vegetación para regular la temperatura.
- Variaciones estacionales: El enfriamiento natural del clima en otoño reduce la diferencia de temperatura entre áreas urbanas y rurales, lo cual disminuye la intensidad de las ICUS.
- Cambios en la dinámica atmosférica: Los cambios en los patrones de viento y la cobertura

de nubes pueden influir en la distribución de la temperatura y la formación de ICUS.

- Influencia de masas de aire: Las masas de aire frío provenientes de latitudes más altas pueden disminuir las temperaturas en áreas urbanas, lo que afecta la intensidad de las ICUS.
- Efectos de la urbanización: La presencia de áreas verdes y cuerpos de agua en áreas urbanas puede mitigar el efecto de isla de calor, lo que podría explicar las temperaturas más bajas en algunas zonas de Toluca y Zinacantepec.

El análisis de las ICUS en otoño de 2022 revela una intensidad débil en comparación con otras estaciones. Los factores que contribuyen a esta baja intensidad incluyen la reducción de la radiación solar, los cambios en la vegetación, las variaciones estacionales, los cambios en la dinámica atmosférica, la influencia de masas de aire frío y los efectos de la urbanización. Es importante destacar que, a pesar de la baja intensidad general, se observaron variaciones significativas en la distribución espacial de las ICUS, lo que sugiere que factores locales, como la densidad de cons-

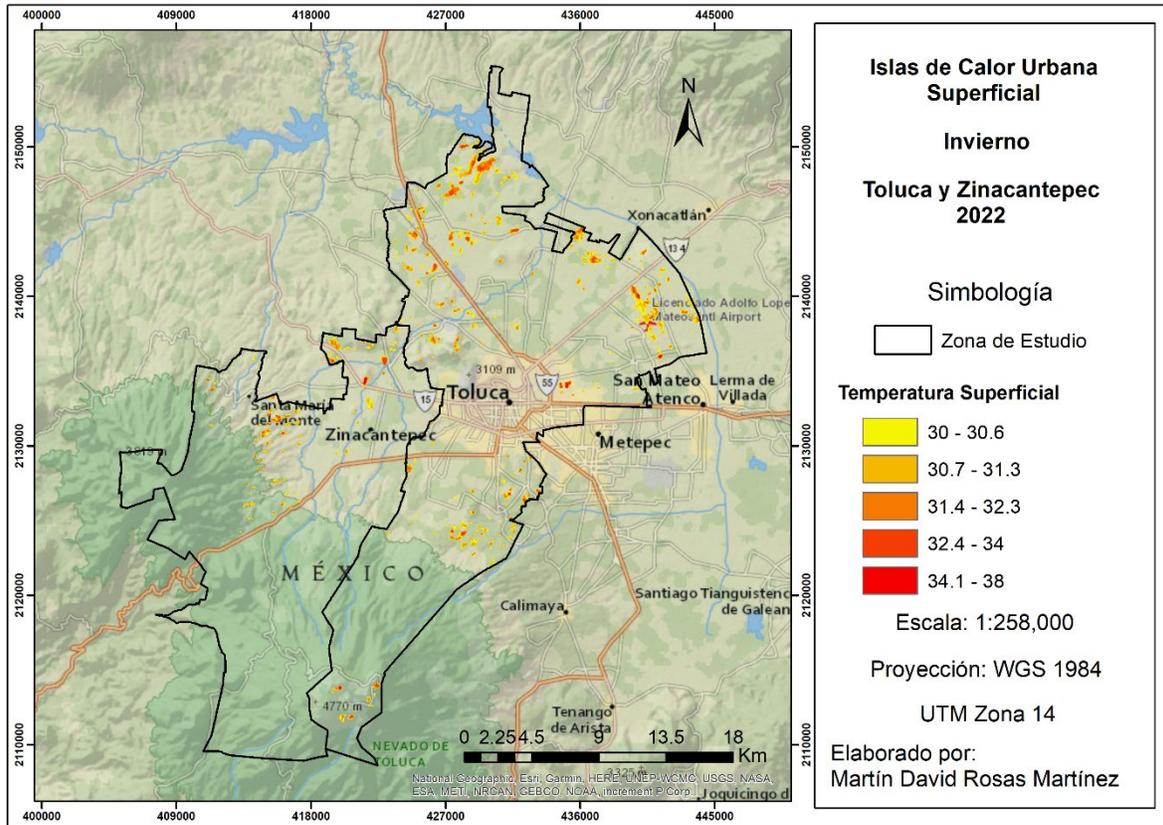
trucción, la vegetación y la presencia de cuerpos de agua, son importantes en la formación y la intensidad de las islas de calor.

Al comprender los factores que contribuyen a la formación de ICUS en diferentes estaciones, se pueden implementar medidas para reducir los impactos negativos del calor urbano en la salud, el bienestar y el medio ambiente (Zhang y Wang, 2008).

ISLAS DE CALOR URBANAS SUPERFICIALES EN INVIERNO (29 DE ENERO)

El análisis de las islas de calor urbanas superficiales durante el invierno de 2022 en Toluca y Zinacantepec revela un comportamiento de intensidad fuerte (figura 4), en contraste con la intensidad débil observada en otoño. En Toluca, las ICUS de mayor intensidad se concentraron en áreas clave, como aeropuerto internacional, zonas industriales (parque industrial San Cayetano, planta Tía Rosa), carreteras principales y conjuntos urbanos, con temperaturas superficiales que oscilaron entre los 30°C y los 38°C.

FIGURA 4
Islas de calor urbana superficial en invierno (29 de enero)



Fuente: Elaboración propia.

Factores que contribuyen a la intensidad de las ICUS en invierno:

1. Disipación de energía térmica: La liberación de calor generado por la calefacción de edificios y los procesos industriales en el espacio urbano.
2. Densidad de habitantes: La actividad humana consume energía que se libera en forma de calor, e intensifica las ICUS en áreas densamente pobladas.
3. Propiedades térmicas de superficies: Superficies oscuras, como el asfalto y el concreto, almacenan energía, debido a su bajo albedo.

En Zinacantepec, la diferencia térmica entre la zona urbana y la periferia alcanzó los 8°C, con temperaturas que variaron entre 28°C y 36°C. Se observó la formación de una ICUS al noreste del municipio, en áreas de nuevos conjuntos urba-

nos, como Sándara Residencial, conjunto urbano Privadas de la Hacienda y El Porvenir. Estos conjuntos, construidos con materiales como asfalto y concreto, retienen el calor y lo liberan lentamente durante la noche, lo cual contribuye a la formación de ICUS.

Factores adicionales que influyen en la formación de ICUS en invierno:

1. Configuración urbana: La densidad de edificios y la geometría de las ciudades pueden atrapar el calor y reducir la circulación del aire, manteniendo temperaturas más altas.
2. Efectos de la radiación solar: Aunque menos intensa en invierno, la radiación solar aún es absorbida y reemitida como calor por las superficies urbanas.
3. Topografía y condiciones climáticas: La ubicación geográfica y las condiciones climáticas específicas de cada ciudad también pueden influir en la intensidad de las ICUS.

El análisis de las ICUS en invierno de 2022 revela una intensidad fuerte en comparación con el otoño. Los factores que contribuyen a esta intensidad incluyen la disipación de energía térmica, la densidad de habitantes, las propiedades térmicas de las superficies, la configuración urbana, los efectos de la radiación solar y la topografía. Zhao y otros (2014) señalan que es importante destacar que la intensidad de las ICUS puede variar significativamente entre estaciones y dentro de una misma ciudad, lo que subraya la necesidad de considerar factores locales y estacionales en la planificación urbana y en el desarrollo de estrategias de mitigación.

CONCLUSIONES

La fluctuación de la temperatura superficial a través de las diferentes estaciones del año y durante el ciclo diario es un fenómeno intrincado que está determinado por varios factores. Entre estos, sobresalen la posición del sol, los procesos de transferencia de calor en las superficies y la influencia del ambiente atmosférico.

Conclusiones del estudio:

- *Primavera:* Las ICUS en primavera son notables, debido al aumento de las temperaturas y la intensidad de la radiación solar. El efecto es particularmente evidente en áreas con baja humedad del suelo, escasa vegetación y materiales de construcción que retienen calor.
- *Verano:* Las ICUS alcanzan su máxima intensidad en verano, especialmente en julio en el hemisferio norte. Esto se debe a la combinación de alta radiación solar, altura solar y rápida evaporación en áreas urbanas, en comparación con las rurales.
- *Otoño:* Las temperaturas de las ICUS disminuyen en otoño, debido a la reducción de la radiación solar, los cambios en la vegetación, las variaciones estacionales y la influencia de masas de aire frío.
- *Invierno:* Las ICUS en invierno son causadas por la retención de calor en materiales de construcción, la falta de vegetación, la generación de calor por actividades humanas y la

configuración urbana que limita la ventilación. La intensidad de las ICUS puede variar según la estación y las condiciones climáticas, pero pueden ser significativas incluso en invierno.

Las islas de calor superficiales (ICU) son un fenómeno climático que se caracteriza por un aumento de las temperaturas en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes. Este efecto se debe a la combinación de varios factores, como la densidad de construcción, el uso de materiales que retienen calor, la falta de vegetación y las emisiones de calor antropogénicas.

OBSERVACIONES ADICIONALES:

- Las ICUS no se limitan a zonas urbanas, sino pueden ocurrir también en áreas rurales y de cultivo, debido a cambios en el uso del suelo, falta de vegetación y propiedades térmicas de los materiales utilizados en la agricultura.
- El impacto de las ICUS puede extenderse más allá de las ciudades y afectar áreas agrícolas y boscosas cercanas.
- La comprensión de los factores que contribuyen a la formación de ICUS es crucial para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación, como el aumento de áreas verdes, el uso de materiales de construcción más reflectantes y la implementación de prácticas agrícolas sostenibles.

Los hallazgos de este estudio tienen importantes implicaciones para la planificación urbana y la gestión ambiental. La identificación y la caracterización de las ICUS pueden informar estrategias de mitigación, como la incorporación de más áreas verdes y el uso de materiales de construcción con mayor reflectividad para reducir la absorción de calor. Teóricamente, este estudio contribuye a la comprensión de las dinámicas de las ICUS en diferentes contextos urbanos y climáticos, y proporciona una base para futuros estudios comparativos.

Para futuras investigaciones, se recomienda:

- Ampliar el análisis a otras ciudades con diferentes características climáticas y de desarrollo urbano para evaluar la generalizabilidad de los hallazgos.

- Investigar el impacto de diversas estrategias de mitigación en la reducción de las ICUS y su eficacia en diferentes contextos urbanos.
- Explorar la relación entre las ICUS y otros factores ambientales, como la calidad del aire y la salud pública, para desarrollar enfoques integrados de gestión urbana sostenible.

REFERENCIAS

- Baño Saltos, D. P. (2017). *Estudio de la isla de calor urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de percepción remota*. Repositorio Digital Universidad Internacional SEK. Disponible en: <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2144>
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G. & Montejano Escamilla, J. A. (2022). The Surface Urban Heat Island and its Manifestation in the Urban Structure of Mexico City. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3), e227. Disponible en: <https://doi.org/10.37636/recit.v5n3e227>
- Chavez, P. S. (1996). Image-based Atmospheric Corrections. Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel. Barcelona.
- Córdova Sáez, K. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre-2009, marzo-2010. *Terra*, 27(42), 95-122. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892011000200005
- Fuentes Pérez, C. A. (2015). Islas de calor urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), 495-515. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000100024&lng=es&tlng=es
- Jáuregui, E. (1992). La isla de calor urbano de la ciudad de México a finales del siglo XIX. *Boletín Investigaciones Geográficas, UNAM*, 26, 31-40.
- Keeratikasikorn, C. & Bonafoni, S. (2018). Urban Heat Island Analysis over the Land Use Zoning Plan of Bangkok by Means of Landsat 8 Imagery. *Remote Sensing*, 10, 440. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/rs10030440>
- López, A., Fernández, F., Arroyo, F., Martín, J. & Cuadrat, J. M. (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Cátedra.
- Marincic Lovriha, I. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (12), 9-25. Disponible en: <https://doi.org/10.32870/rvcs.voi12.196>
- Olalla, F. & Calera, A. (2005). Uso de la teledetección en el seguimiento de los cultivos de regadío. En *Agua y agronomía*. Mundi Prensa Libros.
- Sarricolea Espinoza, P. & Romero Aravena, H. (2010). Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117841>
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P. & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71-84.
- Soto-Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 421-434. Disponible en: <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.13>
- Struchkova, G. P., Krupnova, T. G., Rakova, O. V., Tikhonova, S. A., Shein, N. S. & Kapitonova, T. A. (2023). Identification of Thermal Anomalies in Yakutsk using Satellite Data. *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 28(3), 415-424.
- Voogt, J. A. & Oke, T. R. (2003). Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Zhang, J. & Wang, Y. (2008). Study of the Relationships between the Spatial Extent of Surface Urban Heat Islands and Urban Characteristic Factors based on Landsat ETM+ data. *Sensors*, 8(11), 7453-7468. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s8117453>
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B. & Oleson, K. (2014). Strong Contributions of Local Background Climate to Urban Heat Islands. *Nature*, 511(7508), 216-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/nature13462>