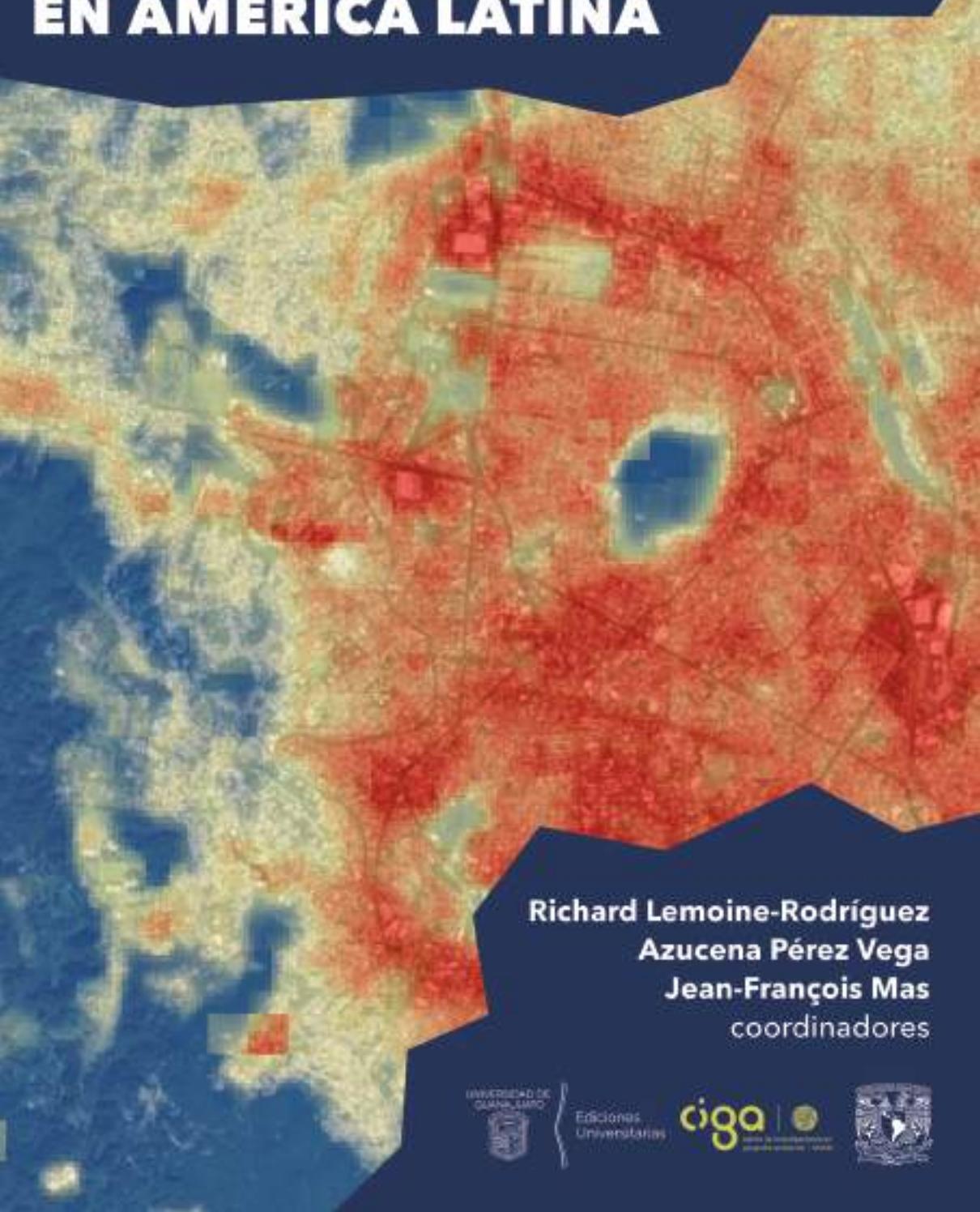


AVANCES EN EL ESTUDIO DE ISLAS DE CALOR URBANO EN AMÉRICA LATINA



Richard Lemoine-Rodríguez
Azucena Pérez Vega
Jean-François Mas
coordinadores



Ediciones
Universitarias



AVANCES EN EL ESTUDIO DE
ISLAS DE CALOR URBANO EN AMÉRICA LATINA

AVANCES EN EL ESTUDIO DE ISLAS DE CALOR URBANO EN AMÉRICA LATINA

Richard Lemoine-Rodríguez

Azucena Pérez Vega

Jean-François Mas

coordinadores

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS, CAMPUS GUANAJUATO
DEPARTAMENTO DE GEOMÁTICA E HIDRÁULICA

Catalogación en la publicación UNAM.

Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Lemoine-Rodríguez, Richard, editor. | Pérez Vega, Azucena, editor. | Mas Caussel, Jean-François, editor.

Título: Avances en el estudio de islas de calor urbano en América Latina / Richard Lemoine-Rodríguez, Azucena Pérez Vega, Jean-François Mas, coordinadores.

Descripción: Primera edición. | México : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental : Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Departamento de Geomática e Hidráulica, 2024.

Identificadores: LIBRUNAM 2230221 (libro electrónico) | ISBN (CIGA-UNAM) (libro electrónico) 978-607-30-9293-7 | ISBN (Universidad de Guanajuato) (libro electrónico) 978-607-580-080-6.

Temas: Isla de calor urbana. | Climatología urbana.

Clasificación: LCC QC981.7.U7 (libro electrónico) | DDC 551.525091732—dc23

La publicación presente se aprobó de conformidad con las normas editoriales del CIGA-UNAM, y de la Universidad de Guanajuato.. La elaboración del libro se llevó a cabo con el apoyo de la Universidad de Guanajuato a través de la División de Ingenierías y la Dirección de Apoyo a la investigación y al Posgrado. El libro se inició en el ámbito del proyecto PAPIIT IN112823 (Dirección General de Asuntos del Personal Académico, Universidad Nacional Autónoma de México).

Primera edición: enero de 2024

D. R. © 2023, Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria s/n, Alcaldía Coyoacán,
C. P. 04510, Ciudad de México, México
www.unam.mx

D. R. © Universidad de Guanajuato
Lascuráin de Retana núm. 5,
Centro Guanajuato, Gto., México
C. P. 36000
editorial@ugto.mx

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM)
Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, colonia Exhacienda de
San José de la Huerta, C. P. 58190, Morelia, Michoacán, México
www.ciga.unam.mx

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías
Av. Juárez No. 77, Zona Centro. C. P. 36000
Guanajuato, Gto., México
www.di.ugto.mx

Cuidado editorial: Israel Chávez Reséndiz y Mónica Braun
Corrección de estilo y diseño de interiores: Mónica Braun
Foto de portada: Richard Lemoine-Rodríguez
Diseño de forros: Guillermo Serrano

Todos los capítulos de este libro fueron arbitrados por pares académicos externos al CIGA.

ISBN PDF UNAM - 978-607-30-9293-7
ISBN PDF UG - 978-607-580-080-6

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular
de los derechos patrimoniales.

Este libro se distribuye gratuitamente en versión PDF.
Disponible en la página de publicaciones del CIGA:
<https://publicaciones.ciga.unam.mx/index.php/ec/>

Las versiones impresas son exclusivas de los autores de este libro.

Hecho en México

ÍNDICE

Acrónimos y siglas	7
Prólogo	11

SECCIÓN I

ISLAS DE CALOR URBANO EN CIUDADES UBICADAS EN DIVERSOS CONTEXTO GEOGRÁFICOS

Estimación de islas de calor urbano en la zona metropolitana de Monterrey, México

- Ulises Manzanilla-Quiñones, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes,
Patricia Delgado-Valerio, Pablo Marroquín-Morales 17*

Análisis de teledetección de la isla de calor urbano en climas semiáridos: una herramienta para el desarrollo sostenible de la ciudad de San Luis Potosí, México

- Ana Salomé Cabezas Yanchapaxi, Carlos Alfonso Muñoz Robles,
Johannes Hamhaber, Martha Bonilla Moheno 47*

Islas de calor y uso de suelo en Playa del Carmen, Quintana Roo, México
*Gabriel Sánchez-Rivera, Leticia Gómez-Mendoza,
Gladys Pérez-de La Fuente 83*

Efectos urbanos en la meteorología del Valle de Aburrá, Colombia:
isla de calor en un terreno complejo y sus variaciones microclimáticas
Gisel Guzmán 112

Evaluación del efecto isla de calor urbano y sus implicaciones en la vulnerabilidad social en Villahermosa, Tabasco, México
*Alejandro Alcudia-Aguilar, Pavel Ernesto Popoca-Cruz,
José Manuel Madrigal-Gómez, Miguel Eduardo Jácome-Flores,
Lucía Sanaphre-Villanueva, Ojilve Ramón Medrano-Pérez 140*

Islas de calor urbano atmosférico y superficial en Guadalajara, México <i>Luz Elena Moreyra-González, Adalberto Tejeda-Martínez</i>	
<i>Pablo Elías-López</i>	181
Variabilidad espaciotemporal de la isla de frescor urbano: Un estudio sobre las temperaturas rurales elevadas en el noreste de Brasil <i>Max Anjos, Gabriel Leitoles</i>	211

SECCIÓN II
PERSPECTIVAS REGIONALES Y NACIONALES
DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO

Tendencias de temperatura de la superficie terrestre en dos ciudades medias de México y sus periferias agrícolas durante el periodo 2003-2020 <i>Richard Lemoine-Rodríguez</i>	
<i>Azucena Pérez-Vega, Jean-François Mas</i>	235
Evolución de las islas de calor urbano superficial en ciudades del corredor industrial de El Bajío, México, para los últimos 20 años <i>Sandra Lizbeth Medina Fernández, Juan Manuel Núñez Hernández,</i>	
<i>Itzia Gabriela Barrera Alarcón</i>	267
Isla de calor en ciudades de Chile: una revisión. Intensidad, variabilidad, impactos y medidas de mitigación <i>Massimo Palme, Claudio Carrasco</i>	306
Cambio climático y evaluación prospectiva del riesgo por islas de calor urbano en ciudades chilenas <i>Cristian Henríquez, Pamela Smith,</i>	
<i>Nikole Guerrero, Jorge Quiñense</i>	329
Enfoque multiescalar de los climas urbanos y los problemas socioambientales en Santiago de Chile <i>Hugo Romero, Pablo Sarricolea,</i>	
<i>Flávio Henrique Mendes</i>	367

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

AGEB	área geoestadística básica
ALI	Advanced Land Imager (generador de imágenes terrestres avanzado)
ALOS	Advanced Land Observing Satellite (satélite avanzado de observación de la Tierra)
AMC	área metropolitana de Concepción
AMG	área metropolitana de Guadalajara
AMS	área metropolitana de Santiago
AMV	área metropolitana de Valparaíso
AMVA	área metropolitana del Valle de Aburrá
ANOVA	analysis of variance (análisis de varianza)
ARClim	Atlas de Riesgos Climáticos
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución)
BRIC	Baseline Resilience Indicators for Communities (indicadores básicos de resiliencia comunitaria)
CASEN	Encuesta de Caracterización Socioeconómica [de Chile]
CIGA	Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental [de la UNAM]
CLICOM	CLIMatic COMputing (computación climática)
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México, antes CONACYT]
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [de México]
COP	Conference of the Parties (Conferencia de las Partes)
DAAC	Distributed Active Archive Centers (Centros de Archivo Activo Distribuido de la NASA)
DMIC	Corredor industrial Delhi-Mumbai [India]
DROP	Disaster Resilience of Place (Resiliencia ante Desastres del Lugar)
EM	estaciones meteorológicas
EPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos)
ESA	European Space Agency (Agencia Espacial Europea)
ESRI	Environmental Systems Research Institute, Inc

ETM	Enhanced Thematic Mapper (sensor temático mejorado)
FVC	factor de visibilidad del cielo
GEE	Google Earth Engine
HDF	Hierarchical Data Format (formato de datos jerárquico)
IALE	International Association for Landscape Ecology (Asociación Internacional de Ecología del Paisaje)
ICU	isla de calor urbano
ICUN	isla de calor urbano negativa
ICUS	isla de calor urbano superficial
IFU	isla de frescor urbano
IIC	intensidad de la isla de calor
IICU	intensidad de la isla de calor urbano
IM	I de Moran (índice de Moran)
INE	Instituto Nacional de Estadística [de Chile]
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [de México]
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía [de México]
INMET	Instituto Nacional de Meteorología [de Brasil]
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
KMZ	Compressed Keyhole Markup Language (lenguaje de marcado Keyhole comprimido)
LCZ	Local Climate Zones (zonas climáticas locales)
LISA	Local Indicators of Spatial Autocorrelation (indicadores locales de asociación espacial)
LST	land surface temperature (temperatura de la superficie terrestre)
LULC	land use land cover (uso y cobertura del suelo)
MDE	Modelo Digital de Elevación
METAR	Meteorological Aerodrome Report (informe meteorológico de aeródromo)
MINSAL	Ministerio de Salud [de Chile]
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo [de Chile]
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada)
MSI	Multispectral Instrument (instrumento multiespectral)
MSS	Multispectral Scanner (escáner multiespectral)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos)
NDBI	Normalized Difference Built-up Index (índice de edificaciones de diferencia normalizada)
NDVI	normalized difference vegetation index (índice de vegetación de

	diferencia normalizada)
NDWI	normalized difference water index (índice de agua de diferencia normalizada)
NIR	near infrared (infrarrojo cercano)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos)
OA	Overall Accuracy (fiabilidad global)
OA_{bu}	fiabilidad global de las clases LCZ con edificaciones versus natural
OA_U	fiabilidad general de las clases urbanas de LCZ
OA_w	fiabilidad ponderada
IDEOCUC	Infraestructura de Datos Espaciales del Observatorio de Ciudades de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE)
OLI	Operational Land Imager (generador de imágenes terrestres operativo)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
ORCID	Open Researcher and Contributor ID (Identificador Abierto de Investigador y Colaborador)
PAC	proporción de área construida
PAI	proporción de área impermeable
PALSAR	Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar (radar de apertura sintética en banda L con matriz de fases)
PAPIIT	Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica [de la UNAM]
PAV	proporción de área con vegetación
PCA	Principal componentes analysis (análisis de componentes principales)
PLCC	Plan Local de Cambio Climático
PV	Proporción de la vegetación
RAMA	Red Automática de Monitoreo Ambiental
RBF	Radial Basis Function (función de base radial)
SAIC	Sistema Automatizado de Información Censal [del INEGI]
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social [de México]
SEGOB	Secretaría de Gobernación [de México]
SELPER	Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial
SEMADET	Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial [de Jalisco]
SHP	Shapefile (archivo de formas)
SIATA	Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá

SIG	Sistema de información geográfica
SII	Servicio de Impuestos Internos [de Chile]
SIMAJ	Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco
SMN	Servicio Meteorológico Nacional [de México]
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado [de Chile]
SoVI	Social Vulnerability Index (índice de vulnerabilidad social)
SUHI	surface urban heat island (isla de calor urbano superficial)
SUN	Sistema Urbano Nacional [de México]
SWIR	short wave near infrared (infrarrojo de onda corta)
TCAU	Tasa de crecimiento anual urbanizada
TIRS	Thermal Infrared Sensor (sensor infrarrojo térmico)
TM	Thematic Mapper (sensor temático)
TOA	top of atmosphere (parte superior de la atmósfera)
TST	temperatura de la superficie terrestre
UACJ	Universidad Autónoma de Ciudad Juárez [México]
UCI	urban cool island (isla de frescor urbano)
UHI	urban heat island (isla de calor urbano)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNIATMOS	Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales [de la UNAM]
URCH	Unidades de Respuesta Climática Homogénea
USGS	United States Geological Service (Servicio Geológico de Estados Unidos)
UTC	Coordinated Universal Time (tiempo universal coordinado)
UTCI	Universal Thermal Climate Index (índice climático térmico universal)
UTM	Universal Transverse Mercator (proyección universal transversa de Mercator)
VNIR	Visible and near-infrared (visible e infrarrojo cercano)
WRF	Weather Research and Forecasting (Investigación y Pronóstico Meteorológico)
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools (Base de datos urbanos mundiales y portal de acceso a sus herramientas)
z_0	rugosidad aerodinámica en metros
zd	altura del plano de desplazamiento en metros
zH	altura de los edificios en metros
ZMM	zona metropolitana de Monterrey
ZMSLP	zona metropolitana de San Luis Potosí

PRÓLOGO

Hace ya treinta años que el premio nobel de química Ilya Prigogine se refirió a la ciudad como un sistema disipativo lejos del equilibrio, incluso proponiendo en su libro *Order out of Chaos* (*Orden desde el caos*, 1984) un modelo simplificado de urbanización basado en este principio. El estado lejos del equilibrio al que se refiere Prigogine es desde luego en el aspecto térmico, donde no hay homogeneidad en la temperatura interna de las ciudades, lo que produce un alto dinamismo interno con la consecuente disipación de calor hacia el exterior. Este es un principio básico que establece una relación entre complejidad y heterogeneidad térmica interna válida para todo sistema organizado, sean organismos vivos u otro tipo de estructuras complejas, incluyendo estrellas, planetas y ciudades. En efecto, cuando un sistema presenta homogeneidad térmica interior significa que no posee estructuras complejas que disipen calor hacia el exterior pues está en equilibrio térmico con su entorno, en un estado interno aleatorio que no permite la configuración de orden y jerarquías internas. En un universo térmicamente homogéneo no existirían estrellas ni tampoco seres humanos ni ciudades. Por esta razón, desde el punto de vista termodinámico, la variada heterogeneidad térmica que presentan los tejidos urbanos es una predicción teórica del principio básico de Prigogine: las ciudades son sistemas altamente complejos, disipativos y en estados lejos del equilibrio, lo que produce una amplia heterogeneidad térmica al interior de sus tejidos. El estado del arte de la ciencia del clima urbano muestra claramente que, más que islas de calor como fenómeno singular y como fuera caracterizado durante mucho tiempo, estamos en presencia de archipiélagos de calor y frescor, altamente dinámicos espacio-temporalmente y que reflejan esta alta heterogeneidad térmica anticipada por Prigogine como resultado del intercambio energético urbano determinado por su capacidad disipativa y por lo tanto regida irrenunciablemente por las leyes de la termodinámica.

Este particular comportamiento termodinámico es de tal magnitud y alcance espacial que produce un cambio profundo y característico en las

condiciones climáticas, localizado espacialmente sobre el ambiente urbano, y que generó una disciplina científica propia avocada al estudio de esta heterogeneidad térmica: el clima urbano. Estas características climáticas han sido largamente observadas, descritas y analizadas en la literatura científica publicada en inglés por varias décadas, constituyendo hoy un cuerpo de conocimiento científico robusto y consolidado. El estudio del clima urbano tiene no solo un alto valor teórico, sino también práctico, considerando los tremendos desafíos a los que se enfrentan las ciudades del siglo XXI. Las ciudades son sistemas físicos altamente dinámicos que se expanden y aumentan su tamaño y peso a velocidades muy altas, que sobrepasan el ritmo de la mayoría de los procesos que ocurren a escala del paisaje. En América Latina, los vectores de expansión urbana alcanzan los 300 metros lineales por año, mientras que, en comparación, un bosque templado se expande apenas unos 50 metros por año. La mayoría de los procesos geológicos a gran escala productores del paisaje ocurren a velocidades anuales medidas en centímetros por año. En cambio, las ciudades en América Latina se expanden a velocidad promedio de 20 metros cuadrados por minuto, lo que produce profundos cambios no solo en sus relaciones ecológicas con los ecosistemas nativos, sino fundamentalmente en las condiciones climáticas al interior de sus tejidos, los cuales poseen una composición ecológica diferente, constituida por edificaciones e infraestructuras antropogénicas altamente concentradas en espacios muy reducidos.

Las particularidades del clima urbano se intensifican producto de las fluctuaciones impuestas por el cambio climático, agravando las profundas inequidades ambientales a las que se ven expuestas las personas. El cambio climático, como se ha destacado en la literatura científica y también en este libro, es una dimensión de cambio global que se sobrepone a la climatología particular que crean las ciudades. La pérdida de servicios ecosistémicos producto de un desarrollo urbano ignorante de la contribución de la naturaleza al bienestar humano afecta dramáticamente las opciones de adaptación a un clima menos benigno que se avecina. El conocimiento científico acumulado en la ciencia del clima urbano puede ser un gran aporte en la batalla contra estos tremendos desafíos ecológicos. Sin embargo, es imprescindible superar las brechas en el traspaso de conocimiento producido en inglés y el que está disponible en nuestro idioma.

El presente libro constituye una ambiciosa recopilación del conocimiento sobre clima urbano en nuestra lengua castellana y refleja el estado del arte en el primer cuarto del siglo XXI en América Latina. Es una compilación sistemática y de acceso libre que constituye desde ya un aporte relevante al conocimiento científico disponible en nuestra región. Los editores han sido capaces de compilar un abanico diverso y rico de trabajos realizados en nueve ciudades en cuatro países de Latinoamérica, reuniendo a una comunidad que incluye a treinta y nueve autores que han investigado el clima urbano en la región, describiendo sus características y consecuencias algunos desde hace décadas. Los estudios de caso representan solo algunos ejemplos de investigaciones que ilustran con calidad y alcance internacional la realidad del clima urbano en la región, facilitando el acceso al estado del arte a través de esta colección de capítulos. El desafío que sortea este libro no solo es relevante en el sentido de compilar un abanico interesante de estudios, sino también en términos de nomenclatura y definiciones científicas en castellano al tratarse de denominaciones utilizadas para describir el fenómeno climático que no están necesariamente normalizadas en nuestra lengua y que por lo tanto han sido también parte de los desafíos que los editores han enfrentado en estas páginas. Efectivamente, avanzar en protocolos de nomenclatura que definan terminologías estándar como isla de calor urbano (ICU) es un paso necesario en la consolidación de un lenguaje propiamente científico que sea no solo apropiado sino también aceptado y utilizado por la comunidad académica.

En sus doce capítulos, el libro revisa las características fundamentales de las islas de calor urbano, tanto en diversos contextos geográficos en la sección uno, como a diferentes escalas en la sección dos. Los estudios de casos incluyen las ciudades de Santiago de Chile, San Luis Potosí, Playa del Carmen, Villahermosa, Monterrey y Guadalajara en México, Valle de Aburrá en Colombia y el nordeste de Brasil. A una escala distinta y con miradas más regionales y nacionales, los capítulos de la sección dos analizan las características climatológicas de ciudades mexicanas, sus periferias agrícolas y del corredor industrial del Bajío, junto a las características de varias ciudades de Chile.

El libro presenta un espectro de casos concretos que dibujan un mapa climático urbano actual, con claras consecuencias ambientales a futuro, las

cuales se interceptan con las tendencias de desarrollo urbano insostenible observadas en América Latina y que han sido caracterizadas por una pérdida sistemática de biodiversidad y servicios ecosistémicos. Lo anterior ha llevado a un deterioro paulatino de las condiciones ambientales y a una creciente inequidad ambiental e informalidad urbana, todo esto cruzado por una planificación y gobernanza en general débiles, con escasos recursos y capacidad técnica para enfrentar estos desafíos. No obstante, América Latina cuenta hoy con una generación de jóvenes investigadores con muy alto nivel de preparación académica y que están produciendo innovadores resultados de la mano de tecnologías de investigación y monitoreo de última generación.

De cara hacia el futuro existen todavía importantes desafíos metodológicos y conceptuales. Para avanzar en una caracterización más robusta del clima urbano se requiere una adecuada inclusión del tiempo como variable urbano-climática fundamental; es decir, no solo desde el punto de vista estándar que divide día y noche en los análisis de islas de calor, sino también en estudios que consideren mayores horizontes temporales que permitan observar los cambios térmicos en las islas de calor, sus tendencias y patrones, y poder entender de mejor forma cómo proyectar su futura presencia y magnitudes, o cómo mitigarlas cuando esto sea necesario.

Desde el punto de vista conceptual y de cara a una perspectiva de investigación de mucho más largo plazo, es importante considerar que el balance energético producto de la demanda de energía para alimentar los procesos urbanos presenta desafíos que parecen insuperables. La energía que utilizamos del sol es solo una fracción infinitesimal de toda la energía que alcanza la superficie terrestre, y constituye desde luego nuestro seguro energético para el futuro, capaz de satisfacer hasta las más inverosímiles demandas. La magnitud disponible de dicha energía es descomunal y supera en varios órdenes de magnitud nuestras necesidades humanas, siendo capaz de sostener el desarrollo urbano de manera físicamente ilimitada (las restricciones actuales para el mejor aprovechamiento de la energía solar disponible son tecnológicas y también de políticas, pero no físicas). Sin embargo, tan grande disponibilidad energética produce el mayor de los problemas para las ciudades del futuro: la disipación de esa energía que entra al sistema urbano. Los actuales modelos de clima urbano consideran

únicamente de manera marginal los efectos de la energía metabolizada; es decir, aquella utilizada para sostener procesos y funciones urbanas, pues son efectivamente insignificantes. Sin embargo, al aumentar el consumo interno de energía y como producto de la segunda ley de la termodinámica, esta energía debe disiparse al exterior, tanto de edificios como al exterior de la ciudad misma. Si la demanda y consumo de energía aumenta de manera exponencial, de la misma forma lo harán las necesidades de disipación de esa energía hacia el exterior del sistema urbano. Sin embargo, esta necesidad termodinámica presenta una tremenda limitación física. A diferencia de la Tierra, que posee un espacio circundante infinito a casi cero grados kelvin donde disipar el calor que el planeta emite, las ciudades no cuentan con un reservorio donde emitir el calor resultante de sus procesos internos. Esta realidad física significa que, probablemente, el peor y más grande desafío de las ciudades del futuro es el termodinámico: cómo poder mantener el confort térmico y la habitabilidad del tejido urbano en un contexto de creciente demanda y consumo de energía que es internamente disipada, y que, por lo tanto, requerirá de mejores estructuras urbanas que permitan gestionar el calor excesivo. Es un desafío altamente complejo que requiere agendas de investigación transdisciplinarias que integren el conocimiento de clima urbano con el existente en la ecología industrial y el metabolismo urbano, a fin de poder anticiparnos y, eventualmente, mejorar nuestra capacidad de reacción a un futuro urbano definitivamente más caluroso. Pero esa es otra historia.

*Luis Inostroza
Brno, octubre de 2023*

SECCIÓN I

**ISLAS DE CALOR URBANO
EN CIUDADES UBICADAS EN
DIVERSOS CONTEXTOS
GEOGRÁFICOS**

Estimación de islas de calor urbano en la zona metropolitana de Monterrey, México

**Ulises Manzanilla-Quiñones¹, Aldo Rafael Martínez-Sifuentes²,
Patricia Delgado-Valerio³, Pablo Marroquín-Morales⁴**

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez”, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-7577>. ulises.manzanilla@umich.mx

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. Durango, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1157-8647>. im_aldo09@hotmail.com.

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología “Presidente Juárez”, Michoacán, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3975-8105>. dvalerio@umich.mx.

⁴ Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Ciencias Agrícolas, Chiapas, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4266-1136>. marroquin_34@hotmail.com.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue analizar datos de temperatura máxima promedio mensual de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales Landsat 8 OLI para identificar las islas de calor urbano (ICU) en la zona metropolitana de Monterrey (ZMM). Utilizando registros de temperatura máxima promedio mensual del periodo 1965-2015 de tres estaciones meteorológicas se calculó la temperatura máxima promedio durante la canícula en la ZMM. A los datos de temperatura se les aplicó la prueba de Mann-Kendall con la finalidad de examinar la existencia de tendencias en la serie climática. Posteriormente se descargaron imágenes satelitales Landsat 8 OLI para 2013-2020, las cuales permitieron calcular la temperatura terrestre superficial durante la canícula en la ZMM. La identificación de ICU se realizó al agregar un valor de +3 °C a la temperatura máxima

promedio histórica registrada por las estaciones meteorológicas. El análisis climático de estaciones de 1965-2015 estimó un promedio histórico de 35 °C, mientras que la prueba de Mann-Kendall presentó una tendencia significativa de aumento ($p<0.01$) en la temperatura máxima durante la canícula. Las ICU identificadas durante 2013-2020 presentaron una temperatura máxima promedio de 38 a 43.9 °C y fueron un total de 123; la mayoría localizadas en los municipios de Monterrey (33), San Nicolás de los Garza (26) (zona centro) y Apodaca (31) (zona oriente). Para la mitigación de las ICU se recomienda el uso de superficies reflectantes, como implementación de pintura blanca en azoteas de edificios y en calles, así como la protección de las áreas verdes urbanas de la ZMM.

Palabras clave: áreas urbanas, análisis espacial, canícula, geografía urbana, percepción remota.

ABSTRACT

The aim of this research was to analyze monthly average maximum temperature data from meteorological stations and Landsat 8 OLI satellite images to identify urban heat islands (UHI) in the Monterrey Metropolitan Zone (MMZ). Using monthly average maximum temperature records for the period 1965-2015 from three meteorological stations, the average maximum temperature during the heat wave in the MMZ was calculated. The Mann-Kendall test was applied to the temperature data in order to examine the existence of trends in the climate series. Subsequently, Landsat 8 OLI satellite images were downloaded for 2013-2020, which allowed calculating the Land Surface Temperature during the canicula in the MMZ. UHI was identified by adding a value of +3 °C to the historical average maximum temperature recorded by weather stations. The climatic analysis of stations from 1965-2015 estimated a historical average of 35 °C, while the Mann-Kendall test presented a significant trend of increase ($p<0.01$) in maximum temperature during the canicula. The UHI identified during 2013-2020 presented an average maximum temperature of 38 to 43.9 °C and were a total of 123; the majority located in the municipalities of Mon-

terrey (33), San Nicolás de los Garza (26) (central zone) and Apodaca (31) (eastern zone). To mitigate UHI, the use of reflective surfaces such as white paint on the roofs of buildings and streets is recommended, as well as the protection of urban green areas in the MMZ.

Keywords: urban areas, spatial analysis, canicula, urban geography, remote sensing.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la creciente expansión de la mancha urbana que experimentan las grandes ciudades en el mundo ha derivado en la generación de múltiples problemas ambientales para los habitantes de dichas metrópolis (Castro, 2005; Díaz et al., 2015), como una menor calidad del aire, reducción de los servicios ecosistémicos, alteraciones en el clima local (Arnfield, 2003; Ballinas & Barradas, 2016; Blancarte-Siqueiros et al., 2020) y una menor calidad ambiental (Manzanilla-Quiñones, Manzanilla-Quijada & Delgado-Valerio, 2021).

Estos acelerados procesos de urbanización han propiciado la creación de islas de calor urbano (ICU) (Landsberg, 1981; Soto-Estrada, 2019), las cuales se consideran como un problema serio para las actividades de planeación y desarrollo urbano de las metrópolis de todo el mundo (Arnfield, 2003; Tan et al., 2010; Henríquez & Romero, 2019; Zavaleta-Palacios et al. 2020).

De acuerdo con Oke (1995) y Oke et al. (2017), una ICU representa una mayor concentración de calor en las ciudades de todo el mundo. El término se emplea para describir las áreas que presentan temperaturas mayores (Landa et al., 2008) en comparación con las áreas circundantes que la rodean (Landsberg, 1981; Oke, 1995; Oke et al., 2017; Henriquez & Romero, 2019). Este aumento en la temperatura se debe mayormente a los materiales como pavimentos, concretos y estructuras metálicas utilizados en la construcción, los cuales tienden a absorber y retener una mayor cantidad de radiación solar (Oke et al., 2017; Soltani & Sharifi, 2017).

La aparición de ICU en las grandes ciudades suele repercutir en la calidad de vida de sus habitantes, generando un mayor estrés térmico y propiciando

una mayor presencia de golpes de calor; estos últimos pueden llegar a ocasionar la muerte de los habitantes (Díaz et al., 2015; Qaid et al., 2016; Beker et al., 2018) y sus efectos suelen ser mayores en la temporada de verano (Morris et al., 2001), durante la temporada de canícula en México (Zhao et al., 2020).

En México la mayoría de las investigaciones efectuadas sobre el estudio de las ICU utilizan datos obtenidos a partir de sensores térmicos y de estaciones climáticas (Fuentes Pérez, 2014; Colunga et al., 2015; Ballinas & Barradas, 2016; Salas-Esparza & Herrera-Sosa 2017; Flores de la O et al., 2018), mientras que los estudios que implementan técnicas de percepción remota en la identificación de ICU son pocos (Navarro-Tec et al., 2018; Manzanilla-Quiñones, 2022).

Actualmente las imágenes satelitales (Landsat, Spot, Sentinel, etc.) son empleadas como una herramienta auxiliar en la evaluación de los recursos naturales de una región o área de interés (Muñoz-Ruiz et al., 2014; Peralta-Carreta et al., 2019). A través del uso de técnicas de percepción remota es factible procesar y analizar la información contenida en las bandas multiespectrales de las imágenes satelitales bajo diversos enfoques (España-Boquera & Champo-Jiménez, 2016; Caballero Criz & Treviño Garza, 2018). La aplicación de estas técnicas ha demostrado tener una gran utilidad en la estimación de las propiedades reflectivas de las longitudes de onda del espectro electromagnético de los objetos de interés (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006; Wang et al., 2010).

A pesar de que el estudio de ICU se ha convertido en un fenómeno muy bien estudiado a escala global, en México ha sido poco analizado. Estudios realizados por Colunga et al. (2015) reportan la presencia de ICU durante la temporada de verano, las cuales tienen una diferencia en temperatura de hasta 5 °C en la Ciudad de México. En esa misma ciudad y temporada, Ballinas & Barradas (2016) hallaron ICU con diferencias de hasta +7.1 °C. Mientras que para el sureste del país, Zavaleta-Palacios et al. (2020) encontraron para Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, ICU con una diferencia en temperatura de hasta +5 °C. Para el norte de México, los diversos estudios efectuados indican una diferencia en la temperatura de las ICU de +4 °C para Hermosillo, Sonora (Mercado Maldonado & Marincic Lovriha, 2017); de +6 °C para Ciudad Juárez, Chihuahua (Contreras Cardosa et al., 2008); y de 4.9 °C para Tampico, Tamaulipas (Fuentes Pérez, 2014).

La zona metropolitana de Monterrey (ZMM) es la segunda área metropolitana más poblada y con mayor desarrollo económico, social e industrial en México (Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, 2017), siendo únicamente superada por la zona metropolitana del Valle de México. De acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2020, en la ZMM se concentra una población de 4 916 831 habitantes (INEGI, 2021).

Desafortunadamente, los acelerados procesos de urbanización y el crecimiento demográfico e industrial experimentado durante las últimas décadas (INEGI, 2017; Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, 2017) han ocasionado problemas ambientales serios como inundaciones, contaminación del aire y reducción de los servicios ecosistémicos (Camacho García & Flamand, 2008; Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey, 2012). Aunado a esto, las posibles alteraciones (tendencias de aumento) en la temperatura máxima de los meses de verano y su retención térmica por las superficies metálicas y de concreto estarían propiciando la formación de ICU (Landsberg, 1981; Tan et al., 2010; Soto-Estrada, 2019) en la ZMM.

Bajo este contexto, la presente investigación tiene como objetivo principal analizar datos de temperatura máxima promedio mensual de estaciones meteorológicas (EM) y realizar estimaciones de temperatura de la superficie terrestre (TST) mediante imágenes satelitales Landsat 8 OLI con la finalidad de delimitar las ICU dentro del área urbana de la ZMM.

Los objetivos específicos fueron 1) analizar registros de temperatura máxima promedio mensual de EM durante la temporada de canícula de 1965-2015, 2) examinar la tendencia climática de la temperatura máxima promedio mensual, 3) estimar la TST de 2013-2020 y 4) delimitar las ICU en la ZMM.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La región de estudio abarca el área urbana de la ZMM, ubicada en las coordenadas $25^{\circ} 21' 5.2''$ y $25^{\circ} 57' 9''$ latitud norte y los $99^{\circ} 55' 12.2''$ y $100^{\circ} 38' 21.7''$

longitud oeste. El área comprende una superficie de 87 324 ha (INEGI, 2016) distribuidas en los municipios de Monterrey, Santiago, Santa Catarina, Caderreyta de Jiménez, Juárez, San Pedro Garza García, García, San Nicolás de los Garza, General Escobedo, Guadalupe, Apodaca y Carmen (Figura 1).

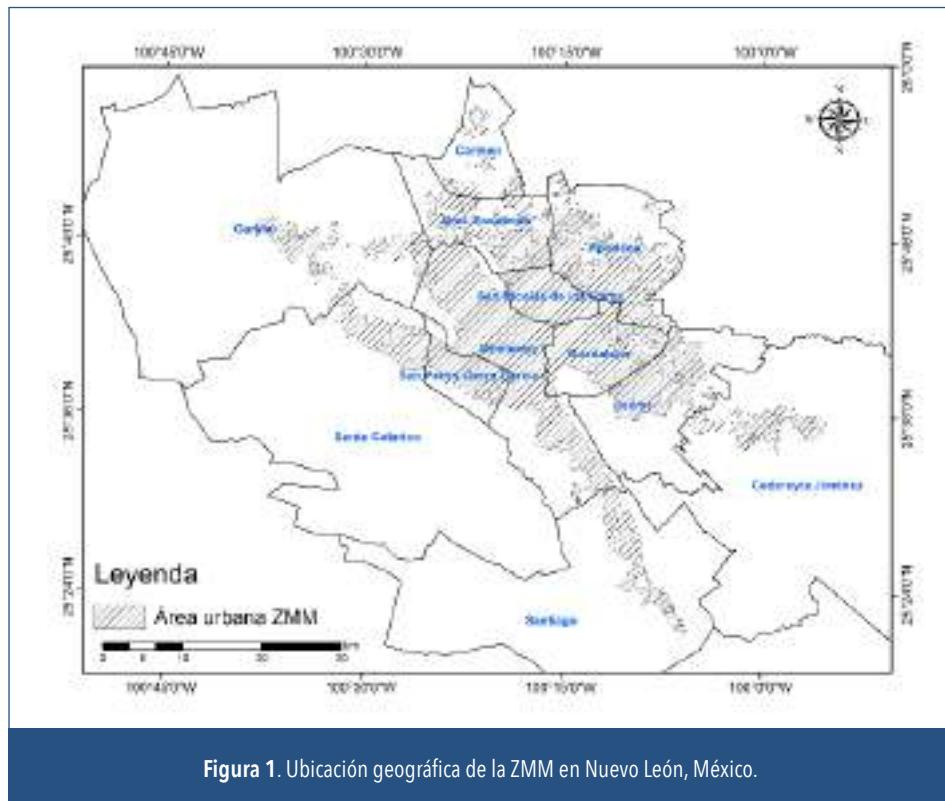


Figura 1. Ubicación geográfica de la ZMM en Nuevo León, México.

2.2 Clima

De acuerdo con García (1998), los climas dominantes en el área urbana de la ZMM corresponden a los tipos BS1hw semiárido semicálido (42.17 % del área de estudio), AC(wo)x' semicálido subhúmedo (27.11 %) y AC(wo) semicálido subhúmedo (14.13 %); y en menor proporción: BS1(h')w semiárido cálido (5.56 %), BSohw árido semicálido (4.68 %), BWhw muy árido semicálido (4.21 %) y AC(w1) semicálido subhúmedo (2.14 %). Estos

tipos de climas presentan una temperatura promedio anual que oscila de 19.4 a 22.2 °C, con precipitaciones anuales de 288 a 1005 mm (Cuervo-Robayo et al., 2014).

2.3 Datos climáticos

Los registros de temperatura máxima promedio de los meses de julio y agosto (temporada de canícula en México) de las EM ubicadas en el área de estudio fueron descargados de la plataforma CLICOM (2021) correspondiente a datos del territorio nacional mexicano.

2.4 Análisis y depuración de datos

Debido a que cada estación meteorológica presentó una escala temporal distinta (Tabla 1) fue necesario establecer un periodo temporal común (Manzanilla-Quiñones, Pozo-Montuy, Delgado-Valerio, Martínez-Sifuentes & Aguirre-Calderón, 2021) que contuviera el 95 % de los registros completos entre estaciones. Los datos faltantes fueron estimados mediante la aplicación de promedios móviles de orden n=5 (Schulz, 1973), es decir, los registros vacíos se estiman a través del valor promedio calculado a partir de los cinco datos anteriores al registro faltante. Al final de este proceso se obtuvo una base climática regional, la cual está compuesta por los datos promedio de temperatura máxima mensual de julio-agosto de tres EM durante la temporada de canícula de 1965-2015 en la ZMM.

TABLA 1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS TRES ESTACIONES METEOROLÓGICAS LOCALIZADAS EN LA ZMM

Estación	Clave Conagua	Coordenadas		Altitud (m)	Periodo de actividad
Apodaca	19004	N 25° 47' 37"	0 100° 11' 11"	421	1964-2016
Monterrey	19049	N 25° 40' 57"	0 100° 16' 16"	502	1929-2002
Topo Chico	19061	N 25° 43' 5"	0 100° 19' 19"	533	1958-2005

N: latitud norte O: longitud oeste

2.5 Prueba de tendencias climáticas

Las pruebas de tendencias se utilizan en la detección de cambios en la varianza de las series climáticas analizadas a través del tiempo (McCuen & Snyder, 1986; Manzanilla-Quiñones, Pozo-Montuy, Delgado-Valerio, Martínez-Sifuentes & Aguirre-Calderón, 2021). Este análisis se efectuó con ayuda de la prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1938) en el programa R versión 4.0 (Core Team, 2020). Dicha prueba se efectuó con la finalidad de analizar las tendencias de la temperatura máxima promedio mensual de 1965-2015 durante la temporada de canícula en el área de estudio.

2.6 Análisis satelital

Dado a que se pretende identificar las ICU de años recientes en la ZMM, se optó por emplear las imágenes satelitales Landsat 8 OLI. Por lo que se descargaron las imágenes satelitales de la plataforma del Servicio Geológico

TABLA 2. METADATOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 OLI PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Fecha de adquisición día/mes/año	Hora (formato 24 h)
06/08/2013	17:12:23*
25/08/2014	17:10:27
28/08/2015	17:10:10
13/07/2016	17:10:19
17/08/2017	17:10:26
20/08/2018	17:09:51
23/08/2019	17:10:33
09/08/2020	17:10:21

*17: horas, 12: minutos y 23: segundos.

de los Estados Unidos, a una resolución espacial de 30 m de tamaño de píxel y con una cobertura de nubes menor al 30 %.

En la Tabla 2 se describen los metadatos de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI descargadas para el área de estudio, siendo prácticamente el mismo número de ruta (28) y de fila (42) para todas las imágenes satelitales.

2.7 Procesamiento satelital

Debido a que las bandas multiespectrales presentan errores al momento de su captura por parte del sensor del satélite, fue necesario realizar correcciones de tipo atmosférico a las bandas roja (B4), infrarroja cercana (B5) y térmica infrarroja (B10), esto con la finalidad de eliminar los objetos oscuros y los efectos derivados de la dispersión atmosférica (Riaño et al., 2000). Para realizar estas correcciones se empleó el método de eliminación de superficies oscuras en el programa QGIS versión 3.2.3 (QGIS, 2018), el cual es ampliamente utilizado en las correcciones atmosféricas de las bandas multiespectrales (Riaño et al., 2000; Schroeder et al., 2006; Caballero Cruz & Treviño Garza, 2018). Por último, las bandas espectrales fueron recortadas al tamaño del área de estudio.

2.8 Estimación de la temperatura de la superficie terrestre (TST)

La estimación de la TST de una región geográfica es un proceso minucioso, el cual consiste en la ejecución de varios geoprocesos. Por ello, para efectuar dicha estimación primero se debe calcular la temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera mediante la aplicación de la siguiente ecuación (Schroeder et al., 2006):

$$\text{Temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Donde:

M_L = Factor de reescalamiento multiplicativo de la banda 10

Q_{cal} = Banda 10 de Landsat 8

A_L = Factor de reescalamiento aditivo de la banda 10

La conversión de valores de radiación espectral a valores de reflectancia de temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera permitió corregir el efecto de la distancia espacial entre el Sol y la Tierra, la cual se deriva por las distintas fechas de adquisición de cada imagen satelital (Chander et al., 2009).

El segundo paso consistió en transformar la temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera a valores de temperatura de brillo mediante la aplicación de la siguiente ecuación (Jiménez-Muñoz et al., 2010):

$$\text{Temperatura de brillo} = (K_2 / (\ln(K_1/TBA) + 1)) - 273.15 \quad (2)$$

Donde:

K_1 y K_2 = constantes de conversión térmica de la banda 10

TBA = Temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera

- 273.15 °C = cero absoluto (punto en el cual se detiene cualquier movimiento atómico)

La temperatura de brillo hace referencia a la temperatura en grados Celsius existente en la superficie de una región geográfica (Riaño et al., 2000).

El tercer paso consistió en calcular el índice de vegetación de diferencia normalizada por medio de la siguiente ecuación (Rouse et al., 1974):

$$\text{Índice de vegetación de diferencia normalizada} = B5 - B4/B5 + B4 \quad (3)$$

Donde:

$B5$ = Banda infrarroja cercana

$B4$ = Banda roja

La salida de este índice representa un conjunto de valores que oscilan de -1 a 1, donde valores negativos representan cuerpos de agua, valores de 0 a 0.2 señalan áreas desprovistas o con escasa vegetación, y valores cercanos a 1 sugieren la presencia de zonas de densa vegetación como bosques y selvas (Rouse et al., 1974; Sobrino et al., 2012).

El cuarto paso consistió en calcular la proporción de la vegetación mediante la siguiente ecuación (Carlson & Ripley, 1997):

$$\text{Proporción de la vegetación} = \left[\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \right]^2 \quad (4)$$

Donde:

NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada

NDVI_{\min} = valor mínimo del NDVI

NDVI_{\max} = valor máximo del NDVI

El uso de esta ecuación permitió aislar la emisividad de las diferentes cubiertas, tomando como referencia los valores mínimos y máximo de las coberturas vegetales del índice de vegetación de diferencia normalizada (Carlson & Ripley, 1997; Martínez-Barbáchano, 2020).

El quinto paso consistió en calcular la emisividad a través de la aplicación de la siguiente ecuación (Sobrino et al., 2004):

$$\text{Emisividad} = 0.004 * PV + 0.986 \quad (5)$$

Donde:

PV = Proporción de la vegetación

Desviación estándar = 0.004

Constante = 0.986

El cálculo de la emisividad representa la cantidad de energía infrarroja emitida por una superficie u objeto de acuerdo con su temperatura (Sobrino et al., 2004). Los valores de emisividad oscilan de 0 (objetos que reflejan toda la radiación) a 1 (cuerpos oscuros que absorben toda la radiación), asimismo las hojas de las plantas tienden a absorber valores de emisividad de 0.97 a 0.986 (Rubio et al., 2003; Sobrino et al., 2004).

Por último, se procedió a estimar la temperatura superficial de la tierra por medio de la aplicación de la siguiente ecuación (Artis & Carnahan, 1982):

$$\text{Temperatura superficial de la tierra} = \left(TB / \left(1 + (0.00115 * BT / 1.4386) * \ln(E) \right) \right) \quad (6)$$

Donde:

TB = Temperatura de brillo

E = Emisividad

Constantes = 0.00115 y 1.4388

La estimación de la TST permitió calcular la variabilidad de la temperatura máxima promedio de la temporada de canícula ocurrida durante 2013-2020 en la ZMM. Asimismo, se identificó el año más caluroso y el menos caluroso en la zona de estudio.

2.9 Identificación de ICU

El proceso de identificación y delimitación de las ICU se efectuó en cinco etapas: primero, se estimó la temperatura máxima promedio histórica registrada durante la canícula de 1965-2015 por las tres estaciones meteorológicas de la ZMM; esta estimación fue catalogada como temperatura de referencia (promedio histórico de julio-agosto de 1965-2015) y se empleó para realizar comparaciones entre las estimaciones de los datos meteorológicos históricos (comportamiento histórico promedio de la temperatura) y la TST estimada mediante el uso de bandas multiespectrales de imágenes de satélite (Colunga et al., 2015); segundo, se promediaron con ayuda de la calculadora ráster del programa ArcMap Ver. 10.3 (ESRI, 2014) las estimaciones anuales realizadas de la TST satelital para la ZMM; tercero, la identificación y delimitación de las ICU se realizó al aplicar un valor de +3°C al resultado de temperatura máxima promedio de referencia, el cual, de acuerdo con las proyecciones de escenarios de cambio climático del IPCC (2014), se considera como un aumento de temperatura significativo, que tendría serias repercusiones en la salud de la población mundial. La aplicación de dicho valor (+3 °C) de temperatura máxima sirvió como umbral en la identificación de las zonas con temperaturas mayores y menores a ese umbral; cuarto, se transformó la reclasificación de valores de temperatura máxima de formato ráster (TIFF) a vectorial (SHP) con la finalidad de estimar las superficies de las ICU, las cuales, para fines de este estudio, fueron definidas como aquellas áreas urbanas con una temperatura mayor (+3 °C) al valor promedio histórico registrado durante la temporada de canícula por las EM de la zona de estudio. Es importante mencionar que solamente

se conservaron los polígonos con una superficie ≥ 1 hectárea, la cual se consideró como superficie mínima de ICU; y quinto, se estimó la superficie y número totales de ICU en la ZMM y por municipio. Por último, la elaboración y edición de mapas de este estudio se realizó en el programa ArcMap Ver. 10.3 (ESRI, 2014).

3 RESULTADOS

3.1 Temperatura máxima

De acuerdo con el análisis de los datos de temperatura máxima promedio mensual de las tres EM evaluadas en el área urbana de la ZMM, estas presentaron más del 95 % de los registros completos para los meses de julio-agosto y registraron una temperatura máxima promedio histórica durante la temporada de canícula de julio-agosto de 35°C durante el periodo 1965-2015, con una temperatura mínima de 31.10, una temperatura máxima de 38.69 y una desviación estándar de 2.05 °C.

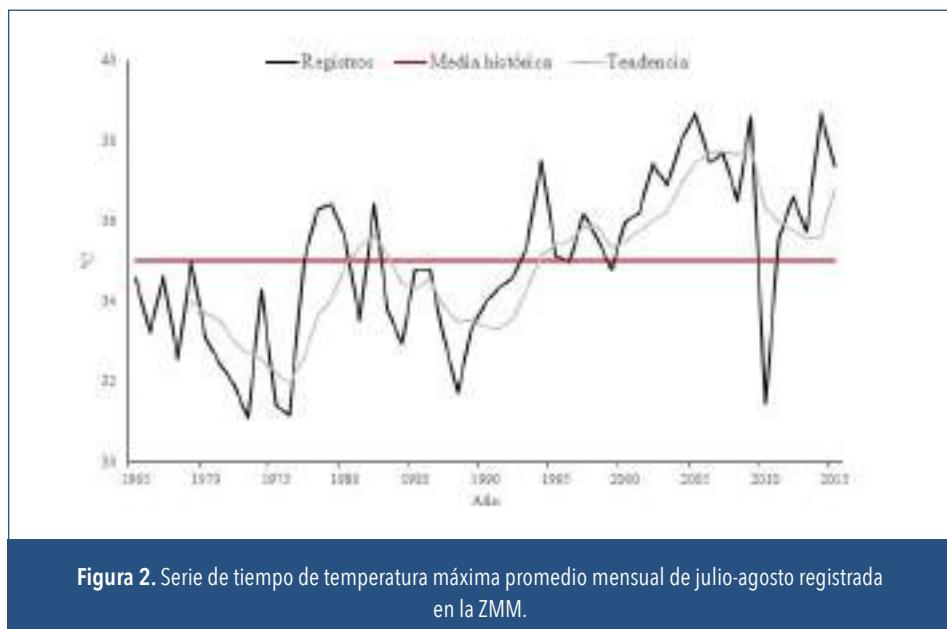


Figura 2. Serie de tiempo de temperatura máxima promedio mensual de julio-agosto registrada en la ZMM.

3.2 Prueba de tendencias

Los resultados de la prueba de tendencias de Mann-Kendall encontraron una trayectoria significativa de aumento ($\tau = 0.482$; $p < 0.01$) en los registros de la temperatura máxima promedio de julio-agosto de 1965-2015 en la ZMM. Además, se observó que a partir de 1994 la temperatura máxima promedio se incrementó 1.49°C con respecto al valor promedio histórico de la temperatura máxima de 1965-2015 en la ZMM (Figura 2).

3.3 Temperatura de la superficie terrestre (TST) en la ZMM

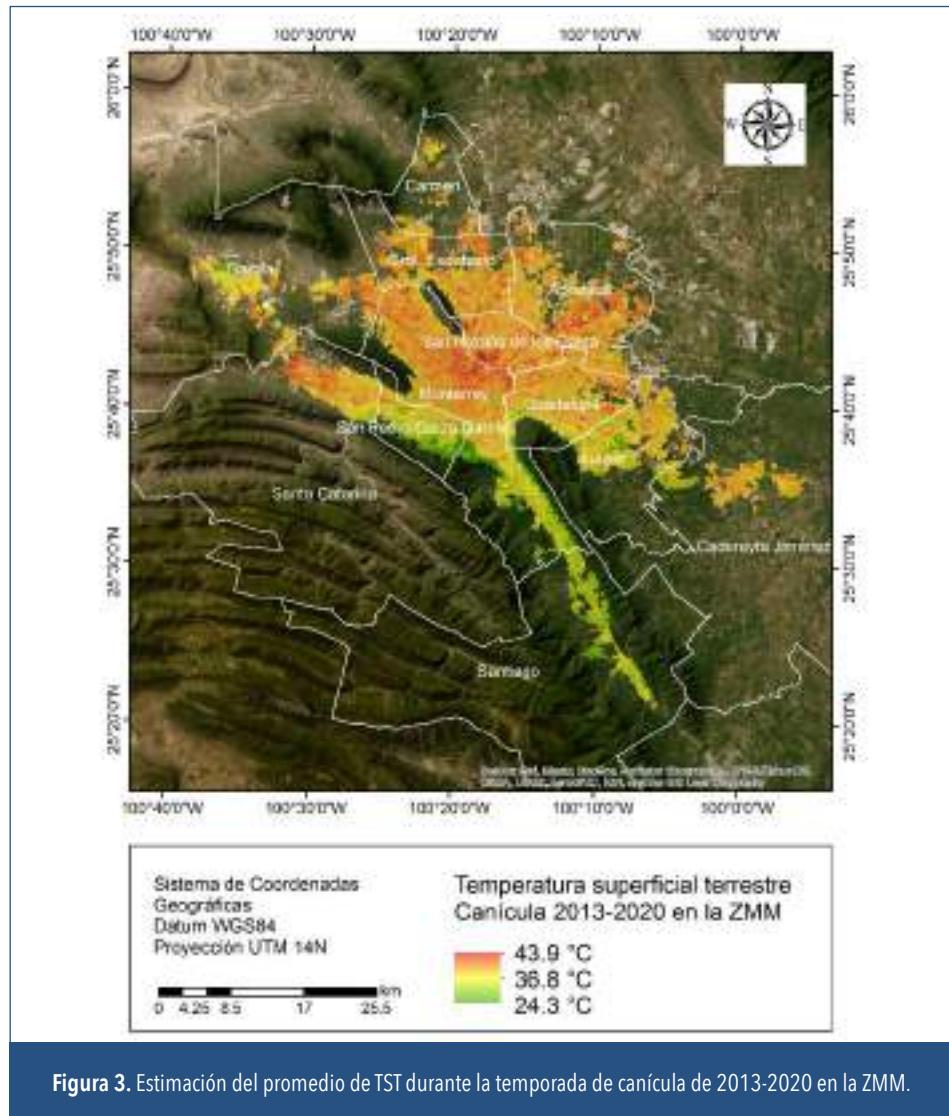
De acuerdo con las estimaciones de TST efectuadas mediante el uso de bandas multiespectrales de las imágenes satelitales Landsat 8, en la ZMM se registraron temperaturas máximas de 42.04 a 50.09 (Tabla 3).

**TABLA 3. TEMPERATURAS MÁXIMAS REGISTRADAS
POR AÑO Y MUNICIPIOS DONDE SE PRESENTARON**

Año	Temperatura máxima (°C)	Municipio
2013	45.05	García, Guadalupe y Juárez
2014	44.26	García, Guadalupe y Apodaca
2015	50.09	García, San Nicolás de los Garza, Guadalupe y Apodaca
2016	46.95	Guadalupe
2017	44.00	Santa Catarina
2018	43.33	San Nicolás de los Garza, Guadalupe y Apodaca
2019	42.31	García y Guadalupe
2020	42.04	Santa Catarina y Monterrey

Asimismo, la oscilación de la temperatura máxima promedio registrada durante la canícula del periodo de 2013-2020 fue de 36.8°C , con una máxima de 43.9°C , una mínima de 24.3°C y una desviación estándar de 2.66°C .

La zona centro, correspondiente a los municipios de Monterrey, San Nicolás de los Garza y Guadalupe, y la región oriente, localizada en el municipio de Apodaca, fueron las áreas más calurosas de la ZMM, mientras que las partes cercanas a los cerros y laderas, localizadas al sur de Monterrey y en San Pedro Garza García, registraron temperaturas ($\leq 28^{\circ}\text{C}$) menos cálidas (Figura 3).



3.4 Identificación de ICU

Los resultados obtenidos del análisis de temperatura máxima promedio durante la temporada de canícula de 2013-2020 permitieron identificar y

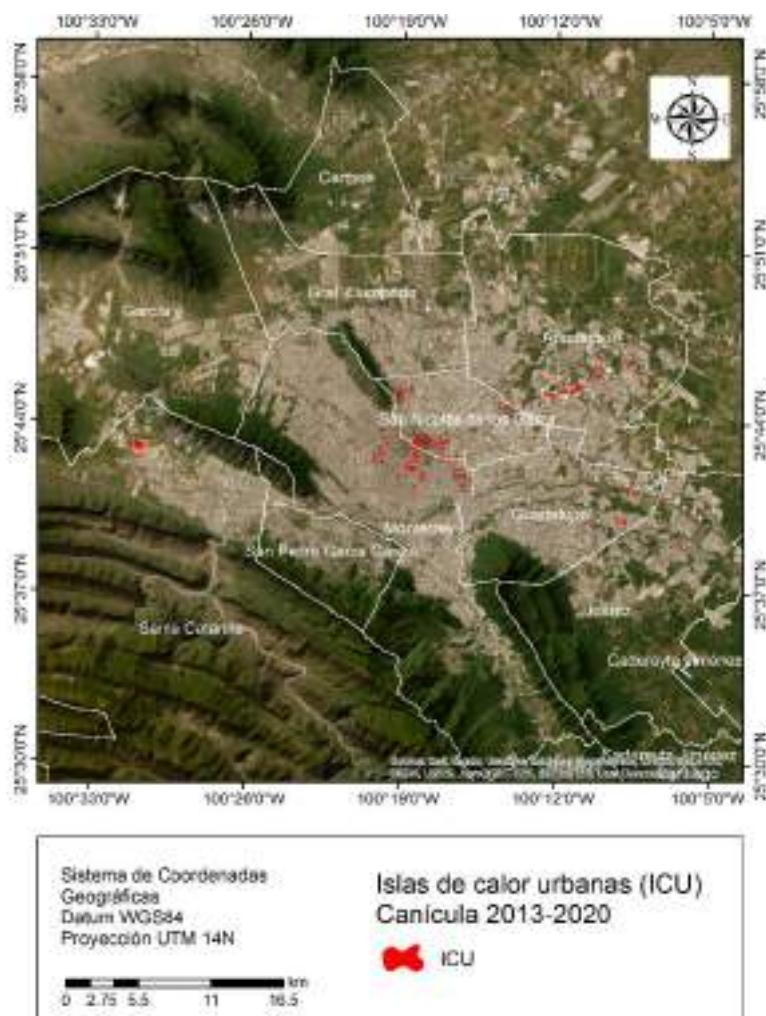


Figura 4. Distribución de las ICU identificadas durante el periodo 2013-2020 en la ZMM, las cuales corresponden, en su mayoría, a zonas industriales, edificios y fraccionamientos.

delimitar un total de 123 ICU en la ZMM (Figura 4), las cuales abarcaron una superficie estimada de 633.25 ha, que representa el 0.72 % del total de la superficie de la ZMM (Tabla 4). Las ICU presentaron una temperatura máxima promedio de 38 a 43.9 °C y una superficie máxima de 38.04 ha.

TABLA 4. DISTRIBUCIÓN DE LAS SUPERFICIES ESTIMADAS DE ICU DURANTE EL PERÍODO 2013-2020 EN LOS MUNICIPIOS DE LA ZMM

Municipio	Superficie (ha)	Número de ICU
Monterrey	184.38	33
Apodaca	159.52	31
San Nicolás de los Garza	141.68	26
Guadalupe	52.50	13
Santa Catarina	48.18	3
García	17.79	6
General Escobedo	15.73	7
Juárez	13.47	4

Las zonas donde se concentraron la mayoría de las ICU fueron las partes centro y oriente de la ZMM. En la zona centro, correspondiente a los municipios de Monterrey y San Nicolás de los Garza, se identificaron 59 ICU, abarcando una superficie de 326.06 ha (Figura 5), y representan el 51.49 % del total de las ICU identificadas en la ZMM. Por otra parte, en la zona oriente, ubicada en el municipio de Apodaca, se identificaron 31 ICU, las cuales ocuparon una superficie de 159.52 ha (Figura 6), que representa el 25.19 % del total de ICU en la ZMM.



Sistema de Coordenadas
Geográficas
Datum WGS84
Proyección UTM 14N

Islas de calor urbanas (ICU)
Canícula 2013-2020
Zona centro ZMM



Figura 5. Distribución de las ICU identificadas en la zona centro de la ZMM, las cuales corresponden, en su mayoría, a zonas industriales, edificios y fraccionamientos.

También se observó que en la zona de mayor concentración de ICU (centro) de la ZMM, la diferencia de temperatura entre áreas verdes urbanas e ICU durante la canícula de 2013-2020 fue de hasta 11.4 °C.

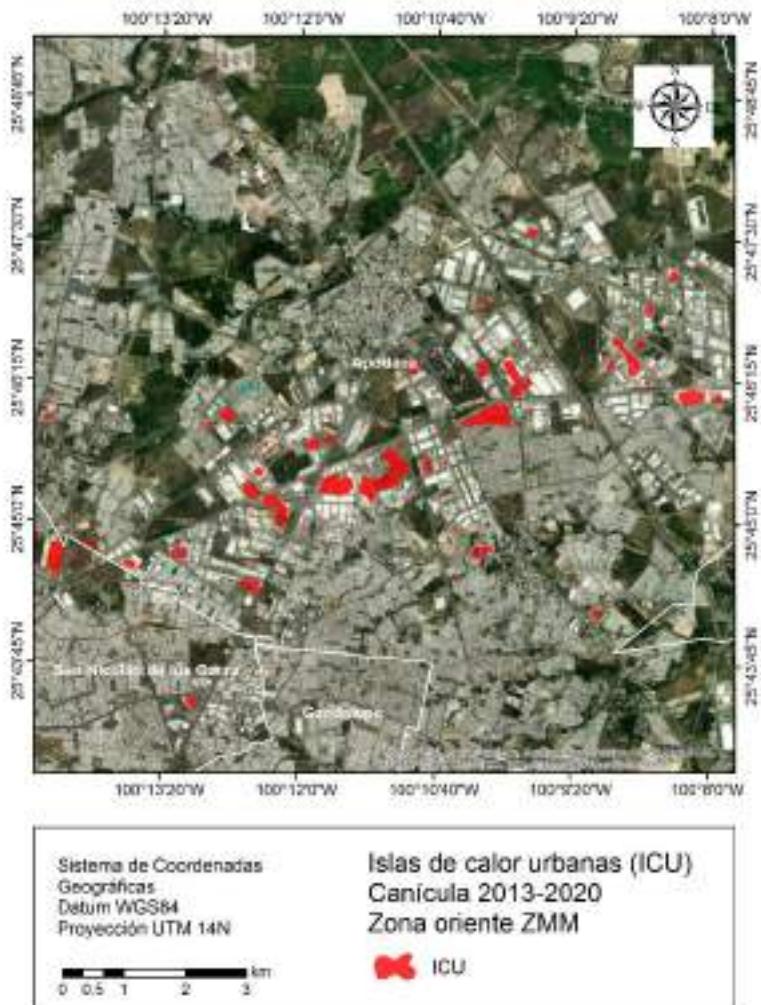


Figura 6. Distribución de las ICU identificadas en la zona oriente de la ZMM, las cuales corresponden, en su mayoría, a zonas industriales, edificios y fraccionamientos.

4 DISCUSIÓN

4.1 Análisis climático

Los datos meteorológicos analizados de la temperatura máxima promedio registrada durante los meses de julio-agosto del periodo 1965-2015 presentaron más del 95 % de los registros completos, lo cual permitió acotar un periodo de actividad climática común (Manzanilla-Quiñones, Pozo-Montuy, Delgado-Valerio, Martínez-Sifuentes & Aguirre-Calderón, 2021) entre las tres estaciones meteorológicas evaluadas (Apodaca, Monterrey y Topo Chico) y, por consiguiente, poder determinar el comportamiento histórico de la temperatura máxima promedio de 1965-2015 para la ZMM.

El resultado obtenido de temperatura máxima promedio mensual durante la temporada de canícula de 1965-2015 en la ZMM fue de 35 °C. Resultados similares han sido reportados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021) para 2020 en los estados de Nuevo León (34.8 °C), Tamaulipas (35.6 °C), Coahuila (35.6 °C) y Chihuahua (34.4 °C). De acuerdo con la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales de la UNAM (UNIATMOS, 2021) las temperaturas máximas promedio históricas registradas durante los meses de canícula del periodo 1902-2015 presentaron una oscilación de 15.5 a 39.2 °C en Nuevo León, siendo las zonas centro y norte del estado las más cálidas (>34 °C). Hastenrath (1967) y Zhao et al. (2020) encontraron que durante la interrupción de la temporada de lluvias de los meses de mayo a octubre se generaron episodios de calor intenso, cuyas temperaturas superaron los 33 °C en muchas regiones del territorio mexicano (SMN, 2021; UNIATMOS, 2021) y cuyos efectos produjeron sequías intensas, las cuales tuvieron una mayor duración e intensidad en los estados del norte del país (Martínez-Sifuentes et al., 2020).

4.2 Prueba de tendencias climáticas

Los resultados de la prueba de Mann-Kendall evidenciaron una tendencia significativa de aumento ($p<0.01$) en la temperatura máxima promedio mensual durante la canícula de julio-agosto de 1965-2015. Estos resultados

indicaron que a partir de 1994 la ZMM se ha convertido en un lugar más caluroso ($+1.49^{\circ}\text{C}$) durante la temporada de canícula. Hallazgos similares sobre el aumento en los patrones de temperatura de diversas EM han sido reportados para el estado de Chiapas por De la Mora Orozco et al. (2016). De igual manera, se ha observado que esta tendencia de aumento en temperatura se mantiene en la región norte del país (Santillán-Espinoza et al., 2011; Martínez-Austria et al., 2014; Kachok & Ivanova, 2019).

De acuerdo con lo reportado en estos estudios y con lo obtenido en esta investigación, se puede decir que existe una tendencia actual de calentamiento regional, es decir, existe un aumento en la temperatura de la ZMM y para el sureste de México (De la Mora Orozco et al., 2016) que coincide con las tendencias globales y regionales mencionadas por el IPCC (2014), por lo que a futuro es muy probable que esta tendencia se mantenga y que los incrementos en la temperatura sean más notorios (Sáenz-Romero et al., 2010; Magaña et al., 2012), ocasionando un mayor estrés térmico para los habitantes de las ciudades de México (Fuentes Pérez, 2014; Díaz et al., 2015; Flores de la O et al., 2018; SMN, 2021).

4.3 Temperatura de la superficie terrestre (TST) de la ZMM

La estimación de la TST mediante el uso de imágenes de satélite ha proporcionado datos precisos, de escala y distribución espacial más fina (Sobrino et al., 2004; Jiménez-Muñoz et al., 2010; Martínez-Barbáchano, 2020). Aunado a esto, el uso de los registros instrumentales provenientes de las estaciones meteorológicas suele ser un buen amalgamiento para obtener estimaciones más robustas y confiables (Colunga et al., 2015).

Los resultados de la TST registrada durante la temporada de canícula de 2013-2020 fueron 36.8°C (promedio), 43.9°C (máxima) y 24.3°C (mínima) en la ZMM. 2015 fue el año más caluroso (50.09°C) registrado en la zona de estudio, el cual estuvo influenciado por un evento intenso tipo *La Niña*, que ocasionó que la canícula de ese año fuera más intensa en el norte de México (Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica, 2021). Aunado a esto, los materiales utilizados en la construcción absorbieron y retuvieron una mayor cantidad de radiación solar durante el verano (Soltani & Sharifi, 2017; Zhao et al., 2020), ocasionando que la

temperatura terrestre superficial de la ZMM fuese hasta +13.29 °C más cálida con respecto al promedio de 2013-2020 y hasta +15.09 °C más calurosa que el promedio histórico registrado por las EM de la zona. Esto demuestra el efecto que tiene la urbanización en el clima local, que ocasiona que las zonas urbanas sean más cálidas, agobiantes y de un microclima más caluroso (Fuentes Pérez, 2014; Colunga et al., 2015; Ballinas & Barradas, 2016; Salas-Esparza & Herrera-Sosa 2017) para los habitantes de las grandes ciudades.

4.4 Islas de calor urbano (ICU)

Las ICU son un fenómeno climático urbano inherente a las grandes ciudades, y se generan por los procesos de expansión de la mancha urbana en sitios con poca superficie de áreas verdes y con una mala planeación de desarrollo urbano (Arnfield, 2003; Ballinas & Barradas, 2016; Qaid et al., 2016; Flores de la O et al., 2018). Diversos estudios coinciden en que la formación de las ICU está directamente asociada con el desarrollo urbano de las metrópolis, provocando efectos importantes sobre la calidad de vida de sus habitantes como estrés térmico (golpes de calor), menor calidad del aire (mayor cantidad de gases contaminantes en la atmósfera) y una mayor tasa de mortalidad cuando se superan los 36 °C (Camacho García & Flamand, 2008; Tan et al., 2010; Díaz et al., 2015; Blancarte-Siqueiros et al., 2020).

Pese a que el surgimiento de las ICU es uno de los fenómenos urbanos mejor documentados a escala mundial (Colunga et al., 2015; Soltani & Sharifi, 2017; Henríquez & Romero, 2019; Soto-Estrada, 2019), estas no habían sido analizadas, identificadas ni delimitadas en la ZMM. En esta se identificaron un total de 123 ICU, las cuales representan el 0.72 % de la superficie total de la ZMM, misma que se ubica en zonas industriales, edificios y fraccionamientos, en los cuales se registran temperaturas máximas promedio por arriba de los 38 °C durante la temporada de canícula. Este aumento en la temperatura superficial registrada en esas áreas se debe en gran medida a los materiales (concretos, hormigón, ladrillos, etc.) y estructuras metálicas empleados en la construcción (Oke et al., 2017). Resultados similares han sido reportados en México por Zava-

leta-Palacios et al. (2020) en la zona metropolitana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde las ICU presentaron valores de +5 °C en la temperatura promedio. Fuentes Pérez (2014) encontró un valor de +4.9 °C en las ICU de Tampico, Tamaulipas. Ballinas & Barradas (2016) hallaron valores de hasta +7.1 °C en las ICU de la Ciudad de México. Colunga et al. (2015) encontraron que las ICU de la ciudad de Querétaro presentaron valores de +4.2 °C por arriba de la temperatura promedio. También se observó que en la zona centro (Monterrey y San Nicolás de los Garza) fue donde se concentraron la mayoría de las ICU de la ZMM, presentándose una diferencia de temperatura entre áreas verdes urbanas (32.5 °C) e ICU (43.9 °C) de hasta 11.4 °C durante la canícula de 2013-2020, lo cual se debe a las características geomorfológicas de la región en forma de valle (Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey), lo que genera un efecto de domo urbano (Oke et al., 2017) en el cual se atrapan y se concentran temperaturas mayores en las áreas urbanas, principalmente en las zonas industriales, edificios y fraccionamientos de las zonas centro y oriente de la ZMM.

Por otra parte, diversos estudios demuestran el papel relevante que tienen las áreas verdes urbanas en la regulación del clima local (Qaid et al., 2016; Salas-Esparza & Herrera-Sosa, 2017; Flores de la O et al., 2018). Desafortunadamente, las superficies de las áreas verdes urbanas en la ZMM son insuficientes para mitigar los efectos de las ICU y estas presentan una tendencia hacia la disminución (Manzanilla-Quiñones, Manzanilla-Quijada & Delgado-Valerio, 2021). Por ello, para mitigar los efectos de las ICU, diversos estudios coinciden y recomiendan el uso de superficies reflectantes, jardines en las azoteas de los edificios y protección de las superficies de áreas verdes urbanas, acciones que ayudarían a mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ZMM (Colunga et al., 2015; Soltani & Sharifi, 2017; Blancarte-Siqueiros et al., 2020). De acuerdo con proyecciones de crecimiento global urbano, para 2050 la proporción de personas que vivirán en las zonas urbanas será del 70 %, lo cual incrementará la demanda de viviendas y de servicios básicos y ambientales necesarios para poder subsistir en un ambiente urbano (Castro, 2005; Marans, 2015; Henríquez & Romero, 2019).

5 CONCLUSIONES

Los análisis climáticos efectuados en la zona de estudio indicaron que el área presenta una tendencia significativa de aumento (cambio climático a nivel local) en la temperatura máxima promedio durante los meses de julio-agosto del periodo 1965-2015, por lo que a futuro este incremento en la temperatura podría provocar veranos más calurosos e intensos que afectarán la salud de los habitantes de la ZMM. A su vez, los acelerados procesos de urbanización experimentados en las últimas décadas han favorecido la creación de las ICU, donde la mayoría de estas se concentraron en los municipios de Monterrey, San Nicolás de los Garza y Apodaca, por lo que, de continuar con esta tendencia de calentamiento, las ICU se podrían expandir hacia las periferias de la ZMM.

La mitigación y control de las ICU en las grandes ciudades es un proceso sumamente complejo (desde el punto de vista económico y ecológico) debido a las características geomorfológicas de la ZMM. Lo recomendable para aminorar los efectos de las ICU durante el verano sería la implementación de jardines en las azoteas, pintar de blanco las calles (lo cual ayudaría a evitar que la radiación solar sea retenida por el asfalto) y, por último, conservar y tratar de incrementar las superficies de áreas verdes urbanas, las cuales ayudarían a disipar el exceso de calor superficial de la ZMM.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (antes CONACYT) por los apoyos de beca de doctorado (2016-2019) y posdoctorado (2020-2022) al primer autor.

REFERENCIAS

- Arnfield, J. (2003). Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.

- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329.
- Ballinas, M. & Barradas, V. L. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 157-166.
- Beker, B. M., Cervellera, C., De Vito, A. & Musso, C. G. (2018). Human Physiology in Extreme Heat and Cold. *International Archives of Clinical Physiology*, 1(1), 1-8.
- Blancarte-Siqueiros, R. H., Pérez-Verdín, G. & Cortes-Ortiz, A. (2020). La relación entre la calidad de vida, sentido de pertenencia y áreas verdes en ambientes urbanos en la ciudad de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 97-111.
- Caballero Cruz. P. & Treviño Garza, E. J. (2018). Análisis de la pertinencia de plantaciones forestales en Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 401-414.
- Camacho García, M. O. & Flamand, L. (2008). Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas: Una evaluación. *Gestión y Política Pública*, 17(2), 261-313.
- Carlson, T. & Ripley, D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
- Castro, S. (2005). Evaluación de un índice para valorar las áreas verdes urbanas: su aplicación y análisis en la localidad del barrio Dent y Altos del Escalante con una perspectiva geográfica. *Reflexiones*, 84(1), 107-125.
- Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica (2021). *Generador de mapas*.
- Chander, G., Markham, B. L. & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903.
- CLICOM (2021). Registros climáticos disponibles para toda la República Mexicana. Valores anuales y mensuales de precipitación y temperatura. Climatic Computing Project.
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A. & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, México. *Atmósfera*, 28(3), 205-218.
- Contreras Cardosa, A., Salas Plata Mendoza, J. A., Velásquez Angulo, G. & Quevedo Urías, H. (2008). Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo. *Cultura Científica y Tecnológica*, 5(26), 1-16.

- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J. & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2427-2437.
- De la Mora Orozco, C., Ruíz Corral, J. A., Flores López, H. E., Zarazúa Villaseñor, P., Ramírez Ojeda, G., Medina García, G., Rodríguez Moreno, V. M. & Chávez Durán, A. A. (2016). Índices de cambio climático en el estado de Chiapas, México, en el periodo 1960-2009. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13 (publicación especial).
- Díaz, J., Carmona, R., Mirón, I. J., Ortiz, C. & Linares, C. (2015). Comparison of the effects of extreme temperatures on daily mortality in Madrid (Spain), by age group: The need for a cold wave prevention plan. *Environmental Research*, 143(A), 186-191.
- España-Boquera, M. L. & Champo-Jiménez, O. (2016). Proceso de deforestación en el municipio de Cherán, Michoacán, México (2006-2012). *Madera y Bosques*, 22(1), 141-153.
- ESRI (2014). ArcGis Desktop: 10.3. Software diseñado para análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica. *Environmental Systems Research Institute*.
- Flores de la O, J. L., Villanueva-Solis, J. & Quiroa-Herrera, J. A. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 123-140.
- Fuentes Pérez, C. A. (2014). Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), 495-515.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1998). Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México, D.F., México. Archivo vectorial Shapefile: Tipos de climas.
- Hastenrath, S. L. (1967). Rainfall Distribution and Regime in Central America. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 15(3), 201-241.
- Henríquez, C. & Romero, H. (eds.) (2019). *Urban climates in Latin America*. Springer.
- INEGI (2016). Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI (capa unión). Archivo vectorial Shapefile: Uso del suelo y vegetación.
- INEGI (2017). Anuario Estadístico y Geográfico de Nuevo León. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- INEGI (2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Conjunto de datos: población total.
- IPCC (2014). Resumen para responsables de políticas. En C. B. Field et al. (eds.),

- Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Organización Meteorológica Mundial / Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, pp. 1-32.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Cristóbal, J., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X., Hidalgo, V., Franch, B., Romaguera, M., Oltra-Carrió, R., Julien, Y. & Mattar, C. (2010). Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica LANDSAT. *Revista de Teledetección*, 33(1), 53-63.
- Kachok, R. & Ivanova, A. (2019). Índices de cambio climático en la Reserva de la Biosfera el Vizcaíno, Baja California Sur, México (1960-2012). *Revista Brasileira de Climatología*, 24, 67-93.
- Kendall, M. G. (1938). A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30, 81-93.
- Landa, R., Magaña, V. & Neri C. (2008). *Aqua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic Press.
- Magaña, V., Zermeño, D. & Neri, C. (2012). Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*, 51(2), 171-184.
- Manzanilla-Quiñones, U. (2022). Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México. *Desde el Herbario CICY*, 14, 178-186.
- Manzanilla-Quiñones, U., Manzanilla-Quijada, G. E. & Delgado-Valerio, P. (2021). Análisis espacio-temporal de las áreas verdes urbanas de la Zona Metropolitana de Monterrey, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1).
- Manzanilla-Quiñones, U., Pozo-Montuy, G., Delgado-Valerio, P., Martínez-Sifuentes, A. R. & Aguirre-Calderón, O. A. (2021). Escenarios climáticos (CMIP-5) para la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* (Núm. Esp. I).
- Marans, R. W. (2015). Quality of urban life and environmental sustainability studies: Future linkage opportunities. *Habitat International*, 45(1), 47-52.
- Martínez-Austria, P. F., Patiño-Gómez, C. & Tamayo-Escobar, J. E. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 135-149.
- Martínez-Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico.

- co para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 65(2), 17-32.
- Martínez-Sifuentes, A. R., Villanueva-Díaz, J. & Estrada-Ávalos, J. (2020). Runoff reconstruction and Climatic influence with tree rings, in the Mayo river basin, Sonora, Mexico. *Iforest*, 13, 98-106.
- McCuen, R. H. & Snyder, W. M. (1986). *Hydrological modelling: statistical methods and applications*. Prentice-Hall.
- Mercado Maldonado, L. & Marincic Lovriha, I. (2017). Morfología de isla de calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Revista Ciencias Biológicas y de la Salud*, 19(3), 27-33.
- Morris, C. J., Simmonds, I. & Plummer, N. (2001). Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *Journal of Applied Meteorology*, 40, 169-182.
- Muñoz-Ruiz, M. Á., Valdez-Lazalde, J. R., De los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G. & Monterroso-Rivas, A. I. (2014). Inventario y mapeo del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. *Agrociencia*, 48(8), 847-862.
- Navarro-Tec, S., Orozco-del-Castillo, M. G., Valdiviezo-Navarro, J. C., Ordaz-Bencomo, D. R., Moreno-Sabido, M. R. & Bernejo-Sabbagh, C. (2018). Análisis del crecimiento urbano y su relación con el incremento de temperaturas en la ciudad de Mérida utilizando imágenes satelitales. *Research in Computing Science*, 147(7), 285-294.
- Oke, T. R. (1995). The heat island of the urban boundary layer: characteristic, causes and effects. En J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate & D. X. Viegas (eds.), *Wind Climate in Cities*. Springer, pp. 81-107.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Peralta-Carreta, C., Gallardo-Cruz, J. A., Solórzano, J. V. & Hernández-Gómez, M. (2019). Clasificación del uso de suelo y vegetación en áreas de pérdida de cobertura arbórea (2000-2016) en la cuenca del río Usumacinta. *Madera y Bosques*, 25(3).
- Pérez Gutiérrez, C. & Muñoz Nieto, A. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey 2013-2025 (2012). Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey.
- Qaid, A., Bin Lamit H., Remaz Ossen D. & Raja Shahminan, R. N. (2016). Urban heat

- island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, 133(1), 577-595.
- QGIS (2018). QGIS Versión 3.2. *Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto*.
- R Core Team (2020). R: a language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Viena, Austria. Versión 4.0.
- Riaño, D., Salas J. & Chuvieco, E. (2000). Corrección atmosférica y topográfica, información multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustibles con imágenes Landsat-TM. En I. Aguado & M. Gómez (eds.), *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá de Henares, pp. 222-239.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En S. C. Freden, E. P. Mercanti & M. Becker (eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*. Scientific and Technical Information Office, NASA, pp. 309-317.
- Rubio, E., Caselles, V., Coll, C., Valor, E. & Sospedra, F. (2003). Thermal-infrared emissivities of natural surfaces: improvements on the experimental set-up and new measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 24(24), 5379-5390.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Duval, P., St-Amant, R., Beau lieu, J. & Richardson, B. A. (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060, and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate change impacts on the vegetation. *Climatic Change*, 102(3), 595-623.
- Salas-Esparza, M. G. & Herrera-Sosa, L. C. (2017). La vegetación como sistema de control para las islas de calor urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 14-23.
- Santillán-Espinoza, L. E., Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., García-Hernández, J. L., Cerano-Paredes, J., Delgadillo-Ruiz, O. & Valdez-Cepeda, R. D. (2011). Tendencias de temperaturas extremas en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(publicación especial), 207-219.
- Schroeder, T. A., Cohen, W. B., Song, C., Canty, M. J. & Yang, Z. (2006). Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 16-26.
- Schulz, E. F. (1976). Problems in applied hydrology. En *Elementary statistical proper-*

- ties.* Water Resources Publications, pp. 31-73.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León (2017). Estrategia de Desarrollo Urbano del Estado.
- SMN (2021). Resúmenes mensuales de temperaturas y lluvia: Temperatura máxima promedio mensual nacional de 2020. Servicio Meteorológico Nacional.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440.
- Sobrino J., Oltra, C., Jiménez, J., Julien Y., Soria G., Franch B. & Mattar C. (2012). Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 141-147.
- Soltani, A. & Sharifi, E. (2017). Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4), 529-538.
- Soto-Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 421-434.
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A. J. & Li, F. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International journal of biometeorology*, 54(1), 75-84.
- UNIATMOS (2021). Temperatura máxima promedio mensual (1902-2015) en México. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales.
- Wang, K., Franklin, S. E., Guo, X. & Cattet, M. (2010). Remote Sensing of Ecology, Biodiversity and Conservation: A Review from the Perspective of Remote Sensing Specialists. *Sensors*, 10, 9647-9667.
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H. & Narciso de Lima, G. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2).
- Zhao, Z., Holbrook, N. J., Oliver, E. C. J., Ballesteros, D. & Vargas-Hernández, J. M. (2020). Characteristic atmospheric states during mid-summer droughts over Central America and Mexico. *Climate Dynamics*, 55, 681-701.

Análisis de teledetección de la isla de calor urbano en climas semiáridos: una herramienta para el desarrollo sostenible de la ciudad de San Luis Potosí, México

**Ana Salomé Cabezas Yanchapaxi¹, Carlos Alfonso Muñoz Robles²,
Johannes Hamhaber³, Martha Bonilla Moheno⁴**

¹ Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, y TH Köln – University Of Applied Sciences, Köln, Alemania. ORCID: 0009-0007-4381-162X. anisalo3@hotmail.com

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. ORCID: 0000-0003-4744-3602. carlos.munoz@uaslp.mx

³ TH Köln – University of Applied Sciences, Köln, Alemania. ORCID: 0000-0002-8026-0456. johannes.hamhaber@th-koeln.de

⁴ Red de Ambiente y Sustentabilidad, Instituto de Ecología, A.C., Veracruz, México. ORCID: 0000-0002-2403-2002. bonilla.moheno@gmail.com

RESUMEN

Las ciudades son territorios dinámicos con rápido crecimiento urbano donde las superficies impermeables reemplazan a la vegetación natural y a los suelos, cambiando las condiciones locales. Estas modificaciones pueden reflejarse en alteraciones en el clima local, como la formación del fenómeno de la isla de calor urbano (ICU), el cual se ha estudiado ampliamente en las regiones templadas, pero cuya investigación es escasa en zonas áridas y semiáridas, como es el caso del área metropolitana de San Luis Potosí, México. Por ello, este estudio analiza la dinámica espaciotemporal de la isla de calor urbano superficial (ICUS) y evalúa su relación con

la vegetación y las superficies edificadas en la ciudad semiárida de San Luis Potosí. A través de series temporales de Landsat de verano e invierno se obtuvo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice de edificaciones de diferencia normalizada (NDBI) y la temperatura de la superficie terrestre (TST). Para el análisis de ICUS se llevó a cabo un muestreo espacial basado en la delimitación de las áreas urbanas y circundantes. La intensidad de las ICUS se determinó utilizando la prueba no paramétrica Mann Whitney y la relación entre TST, NDVI y NDBI fue evaluada mediante análisis de correlación. Los resultados revelaron una ICUS negativa durante el día en verano e invierno; el área urbana mostró una temperatura más baja en comparación con el entorno semiárido adyacente no urbanizado. Se encontraron relaciones significativas entre TST, NDVI y NDBI. Dentro del área urbana, se identificaron puntos críticos en las periferias y en la zona industrial. Nuevas investigaciones sobre la ICU podrían apoyar la planificación, diseño de ciudades y estrategias para aumentar la eficiencia de enfriamiento de acuerdo con los entornos semiáridos.

Palabras clave: ciudad semiárida, isla de calor urbano superficial (IUCS), isla de calor urbano negativa (ICUN), temperatura de la superficie terrestre (TST), zona metropolitana.

ABSTRACT

Cities are dynamic territories with rapid urban growth where impervious surfaces replace the natural vegetation and soils, changing the local conditions. These modifications can be reflected through alterations in the local climate, such as the formation of the urban heat island phenomenon, which has been studied broadly in temperate regions, but research is scarce in arid and semi-arid climates, as is the case in the metropolitan area of San Luis Potosí, Mexico. Therefore, this study analyses the spatio-temporal dynamics of surface urban heat island (SUHI) and evaluates its relationship with vegetation and built-up surfaces in the semi-arid city of San Luis Potosí. Landsat time series of summer and winter were used to obtain the normalized difference vegetation index (NDVI), the Normalized Differ-

ence Built-up Index (NDBI), the land surface temperature (LST). Spatial sampling approach based on the delimitation of the urban and surrounding areas was conducted for the urban heat island analysis. The intensity of urban heat island was determined using the non-parametric test Mann Whitney and the relationship between LST, NDVI and NDBI was evaluated using correlation analysis. Mann-Kendall test was undertaken to examine temporal LST trends. The results revealed a negative surface urban heat island during the day in summer and winter seasons, in which the urban area showed a lower LST compared to the adjacent, non-urbanized semi-arid environment. Significant relationships were found between LST, NDVI and NDBI. Within the urban area, hotspots were identified in the peripheries and industrial zone. Further research on urban heat island could support the planning and design of cities, including strategies to increase cooling efficiency suitable for semi-arid environments.

Keywords: land surface temperature (LST), semi-arid city, surface urban heat island (SUHI), negative urban heat island, Metropolitan zone.

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial trae cambios profundos en el tamaño y la distribución espacial de las áreas urbanas. La urbanización se produce con la sustitución del entorno original por edificios, carreteras e infraestructura, convirtiendo superficies anteriormente permeables en impermeables y secas (Kim & Baik, 2005). Este proceso modifica el entorno natural y el intercambio de flujos entre las superficies urbanas y la atmósfera, lo que genera variaciones en el balance energético y por ende en el clima local.

Las superficies impermeables se caracterizan por absorber calor, provocando un aumento de la temperatura del aire (Voogt & Oke, 2003). La variación en el balance energético creado en áreas urbanas provoca un fenómeno de calor asociado a la diferencia de temperatura entre la ciudad y sus alrededores, definido como intensidad de la isla de calor urbano (Kim & Baik, 2005). Por lo general, este efecto se caracteriza por el aumento de

la temperatura en las áreas urbanas en comparación con la de las áreas no urbanas adyacentes, lo que se conoce como isla de calor urbano (ICU) (Oke, 1987). Del mismo modo, este fenómeno se puede invertir, creando una isla de calor urbano negativa (ICUN), donde el área urbana tiene menor temperatura que las áreas adyacentes.

Las ICU se clasifican en función de la temperatura del aire y de la superficie. La temperatura del aire incluye la temperatura de la capa del dosel urbano y la capa límite superior del clima urbano. La primera está formada por el aire que se encuentra por debajo del nivel de los tejados, entre elementos heterogéneos como los edificios y las copas de los árboles; y la segunda comprende el espacio por encima de la capa de dosel urbano (Weng et al., 2004). Para su medición se utilizan sensores *in situ* que obtienen la temperatura del aire. Mientras que la temperatura de la superficie es determinada por un fenómeno de equilibrio energético que comprende todas las superficies urbanas y que contiene conjuntos de microescala sensibles a la orientación de los elementos de la superficie al sol de día y al cielo de noche, así como a sus características térmicas y radiativas (Voogt & Oke, 2003; Roth, 2013). Para su medición se suelen utilizar instrumentos infrarrojos térmicos aerotransportados o por satélite para obtener la temperatura de la superficie terrestre (TST).

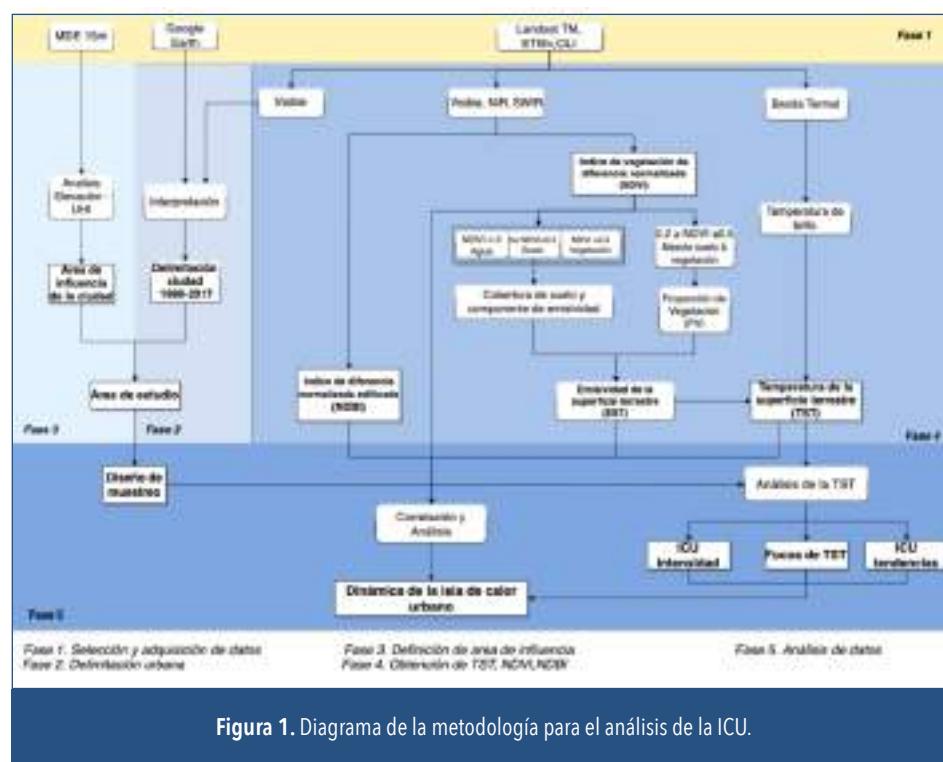
La ICU se ha estudiado ampliamente en las regiones templadas. La mayor parte del conocimiento se ha derivado de estudios realizados en Europa y América del Norte (Arnfield, 2003). Sin embargo, existe una escasa comprensión de los climas áridos y semiáridos (Frey et al., 2005; Nassar et al., 2016).

La zona metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP), ubicada en el centro-oeste de México, se asienta en una llanura desértica y una escarpada cordillera con mesetas, y se expande en terrenos anteriormente ocupados por la agricultura y pastos (INEGI, 2009). La ZMSLP ha experimentado un continuo crecimiento en su población y extensión tras la incorporación de zonas industriales que fomentaron la inversión económica (Hernández Cerdá & Ávila Galarza, 2017). Esta zona incluye el área urbana del municipio colindante de Soledad de Graciano Sánchez y otras localidades periféricas rurales-urbanas, algunas de ellas asentadas en terrenos no aptos para urbanización. El patrón de paisaje urbano de la ciudad está condicio-

nado por la distribución y proporción de áreas urbanizadas, áreas libres, espacios públicos y áreas verdes, que ocurre de manera heterogénea. Por ejemplo, aunque las áreas verdes pueden incrementar la calidad del aire, reducir la contaminación, retener y absorber agua, y reducir las altas temperaturas (Makhelouf, 2009), la ZMSLP tiene escasez de parques urbanos y áreas verdes, con una distribución desigual y marcadas diferencias en su accesibilidad (Moreno Mata et al., 2016).

En este contexto, este estudio analiza la dinámica espaciotemporal de la isla de calor urbano superficial (ICUS), identifica su intensidad durante la temporada de verano e invierno, y evalúa su relación con la vegetación y las superficies edificadas en la zona metropolitana semiárida de San Luis Potosí de 1986 a 2018.

Esta investigación brinda una exploración de la dinámica de la temperatura superficial en la ZMSLP, contribuyendo a una mejor comprensión



de este fenómeno, especialmente en ciudades ubicadas en regiones áridas y semiáridas donde este no ha sido ampliamente explorado.

2 MÉTODOS

La metodología de este estudio incluye cinco fases: 1) selección y adquisición de datos, 2) delimitación urbana, 3) definición de la zona de influencia, 4) obtención de la temperatura superficial terrestre, NDVI y NDBI y 5) análisis de datos (Figura 1).

2.1 Selección y adquisición de datos

Las imágenes Landsat se seleccionaron del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) a través de la plataforma Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Se estableció el periodo de estudio de 32 años, desde 1986 al 2018, tomando en cuenta las estaciones de verano e invierno en cada año, con lo que se preseleccionaron 67 imágenes satelitales. Las escenas fueron captadas por los sensores de Landsat-5 Thematic Mapper (TM), Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Landsat-8 Operational Land Imager e infrarrojo térmico (OLI/TIRS) con base en los siguientes criterios: 1) imágenes correspondientes a la temporada de verano entre abril y junio y a la de invierno entre diciembre y enero, 2) imágenes con menos del 2 % de cobertura de nubes. En total, 24 imágenes satelitales fueron consideradas para verano y 21 para invierno, que cubren la ZMSLP-Soledad de Graciano Sánchez y sus alrededores (Tabla 1).

2.2 Definición del área de estudio

Las escenas adquiridas se recortaron al área de estudio, que incluye la ZMSLP, así como sus alrededores (Fase 1-3, Figura 1). Para ello, 1) se delimitó el área urbana por periodo, y 2) se definió el área circundante por medio de un área de influencia (amortiguador) basada en los cambios de elevación sobre el nivel del mar.

**TABLA 1. IMÁGENES SATELITALES LANDSAT SELECCIONADAS DE VERANO
E INVIERNO POR SENSOR**

Verano		Invierno	
Fecha	Satélite	Fecha	Satélite
06.04.1986	L4-5	27.01.1990	L4-5
03.05.1990	L4-5	03.01.1993	L4-5
11.05.1993	L4-5	05.12.1993	L4-5
30.05.1994	L4-5	08.12.1994	L4-5
17.05.1995	L4-5	12.01.1996	L4-5
19.05.1996	L4-5	29.12.1996	L4-5
06.05.1997	L4-5	16.12.1997	L4-5
09.05.1998	L4-5	19.12.1998	L4-5
12.05.1999	L4-5	22.12.1999	L4-5
06.05.2000	L7	31.01.2000	L7
25.05.2001	L7	16.12.2000	L7
26.04.2002	L7	04.01.2002	L7
15.05.2003	L7	22.12.2002	L7
12.05.2005	L4-5	25.12.2006	L4-5
31.05.2006	L4-5	14.12.2008	L4-5
18.05.2007	L4-5	13.01.2014	L8
04.05.2008	L4-5	15.12.2014	L8
23.05.2009	L4-5	19.01.2016	L8
18.05.2013	L8	05.01.2017	L8
21.05.2014	L8	07.12.2017	L8
22.04.2015	L8	27.01.2019	L8
24.04.2016	L8		
13.05.2017	L8		
14.04.2018	L8		

2.2.1 Delimitación del límite urbano

La definición del límite urbano se realizó para los años 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2018; estos años se establecieron con base en la velocidad de la expansión urbana y conformaron seis períodos.

Se utilizaron seis imágenes Landsat para delinear el límite urbano de cada año con el apoyo de las imágenes del Digital Globe de Google Earth, así como los bloques del INEGI y los límites administrativos, que se utilizaron solo como referencia. Aplicando la metodología utilizada por Lemoine-Rodríguez et al. (2019), se consideraron varios criterios para definir el límite urbano. Las áreas urbanas se digitalizaron en función del grado de agregación entre las edificaciones y considerando la distancia, continuidad y conectividad de los componentes urbanos a través de vías asfaltadas. Además, los edificios debían presentar una agrupación espacial formada por al menos tres de ellos que estuvieran estrechamente agrupados. Esto debía identificarse visualmente en las imágenes digitales.

Por ejemplo, el límite urbano para el año 2018 se definió utilizando varias imágenes Landsat del periodo de 2016 a 2018 y con el apoyo de Google Earth Digital Globe de mayor resolución para cumplir con los criterios de delimitación (Figura 2). Este proceso se realizó para cada uno de los seis

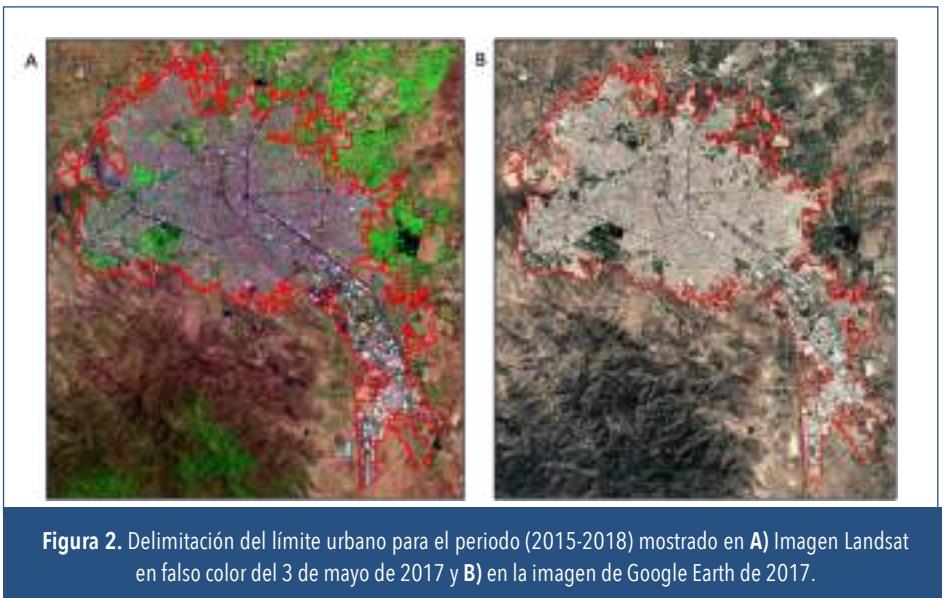


Figura 2. Delimitación del límite urbano para el periodo (2015-2018) mostrado en **A)** Imagen Landsat en falso color del 3 de mayo de 2017 y **B)** en la imagen de Google Earth de 2017.

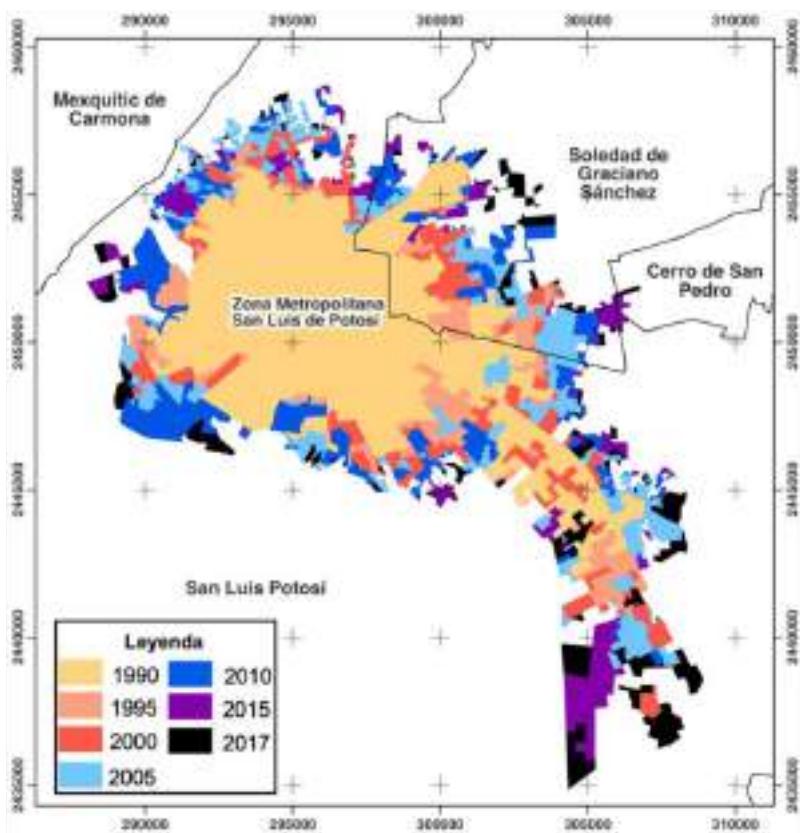


Figura 3. Expansión de áreas urbanas que conforman la ZMSLP de 1990 a 2018. El mapa incluye los municipios adyacentes a la ZMSLP, representados con sus límites administrativos.

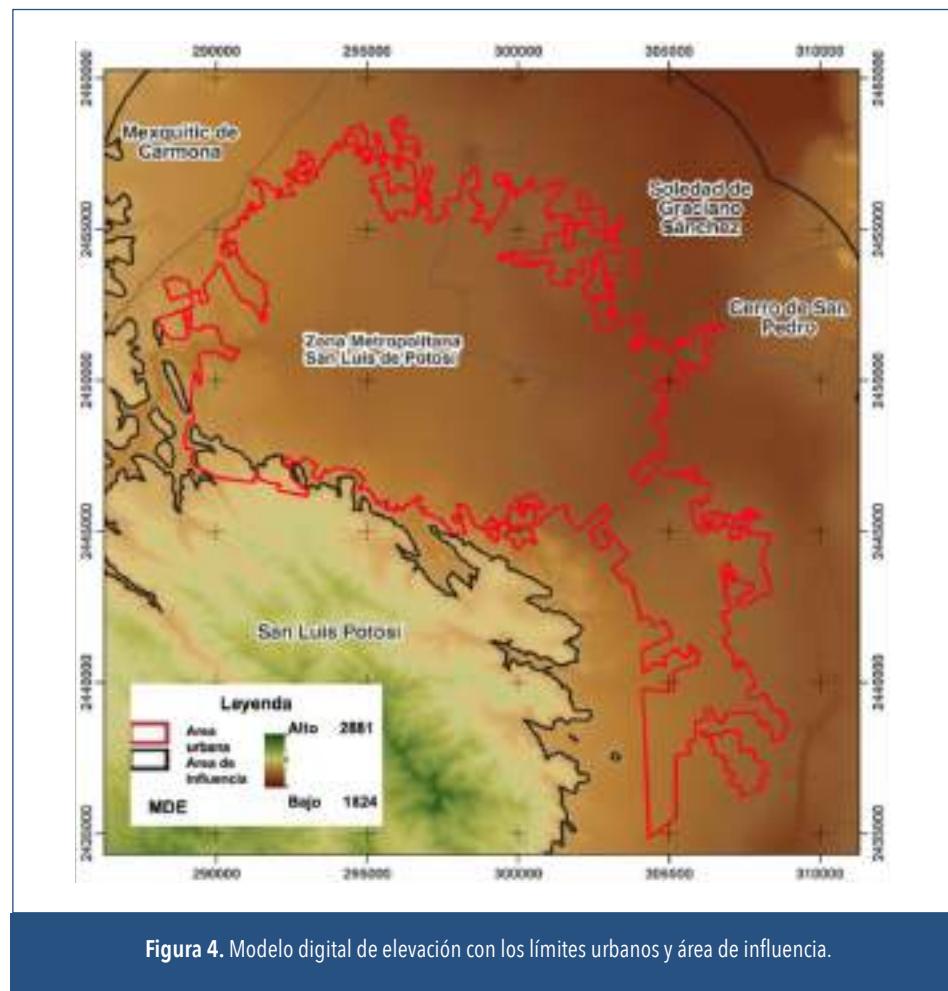
periodos del límite urbano para 1990, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2018, como se muestra en la Figura 3.

2.2.2 Definición del área circundante

El área no urbana circundante se definió mediante un amortiguador alrededor del área urbana. Considerando que la ZMSLP está ubicada sobre un valle, la opción de amortiguamiento lineal basada solo en la distancia es menos adecuada conforme a las diferentes alturas alrededor de la ciudad.

Por lo tanto, la elevación del terreno se consideró debido a su influencia en la temperatura (Gallo et al., 1993; Khandelwal et al., 2018).

El modelo digital de elevación implementado tiene una resolución de 15 m y fue adquirido en la plataforma INEGI (2013), de la cual se extra-jo la altitud de la ciudad y sus alrededores, dando un promedio de 1 873 m.s.n.m. en el área urbana, que disminuye hacia el este y aumenta hacia el suroeste, alcanzando un valor máximo de 2 500 m.s.n.m. en el área no urbana circundante. Con estos valores se estableció un máximo de 2 000 m.s.n.m. como rango altitudinal adecuado.



Además, la parte este del área de estudio se extendía considerablemente sobre un área plana con pendientes bajas, por lo que la zona de amortiguamiento también considera una distancia de 5 km dentro del rango de elevación, como se muestra en la Figura 4.

2.3 Cálculo de índices espectrales

2.3.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice expresa la relación entre las bandas visibles del rojo y del infrarrojo cercano NIR, lo que permite evaluar las condiciones de la vegetación en términos de verdor y contenido de humedad. A partir de la ecuación 1, los valores del NDVI se obtienen en el rango de -1.0 a 1.0, donde los valores positivos indican áreas con vegetación, los valores bajos indican ausencia de vegetación o poca reflexión de la luz infrarroja, y los valores negativos significan características de la superficie con poca vegetación o sin ella, como agua, estéril, nubes y nieve (Yuan & Bauer, 2007). Los productos NDVI se obtuvieron a partir de los índices espectrales de los productos Landsat de nivel 2.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

Donde:

R_{NIR} = Banda del infrarrojo cercano

R_{Red} = Banda visible de color rojo

2.3.2 Índice de edificaciones de diferencia normalizada (NDBI)

Este índice multiespectral permite identificar las superficies edificadas e impermeables. El NDBI se basa en la relación entre una mayor reflectancia en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) y el infrarrojo cercano (NIR) (Adeyeri et al., 2017). El NDBI se estimó utilizando la ecuación 2 de Zha et al. (2003). Las bandas de reflectancia de superficie Landsat SWIR y NIR se implementaron para obtener NDBI, bandas 5 y 4 para Landsat TM / ETM +, y bandas 6 y 5 para Landsat OLI / TIRS.

$$NDBI = \frac{R_{SWIR} - R_{NIR}}{R_{SWIR} + R_{NIR}} \quad (2)$$

Donde:

R_{NIR} = Banda del infrarrojo cercano

R_{SWIR} = Banda infrarroja de onda corta

2.4 Estimación de la temperatura de la superficie terrestre

Los sensores termales detectan la energía infrarroja térmica emitida por todos los objetos que tienen una temperatura superior al cero absoluto (Jensen et al., 2007). En la estimación de la TST es necesario considerar: 1) los efectos atmosféricos (absorción, emisión atmosférica ascendente, emisión atmosférica e irradiancia atmosférica descendente reflejada en la superficie), 2) los efectos angulares, y 3) la emisividad (Dash et al., 2002; Srivastava et al., 2009).

En la Figura 5 se muestran los pasos realizados para la estimación de la TST, la cual se ajustó con el valor calculado de emisividad de la superficie terrestre.

2.4.1 Emisividad de la superficie terrestre

La emisividad es la relación entre la energía térmica infrarroja radiada por un objeto y la de un cuerpo negro en las mismas condiciones (NASA, 2017). Debido a su operatividad se ha implementado el método NDVI^{THM} para su estimación. El método de los umbrales del NDVI propuesto por Sobrino y Raissouni (2000) tiene en consideración umbrales de NDVI para distinguir entre píxeles de suelo ($NDVI < NDVI_S$), de vegetación densa ($NDVI < NDVI_V$) y píxeles mixtos ($NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V$). Además, requiere calcular la proporción de vegetación para su estimación.

Proporción de vegetación (PV)

La PV se obtuvo mediante el método propuesto por Carlson y Ripley (1997), que incluye valores del NDVI para su cálculo según la Ecuación 3. Para aplicar este método en condiciones globales, los valores de NDVI son ($NDVI_V = 0.5$) para píxeles con vegetación completa y ($NDVI_S = 0.2$)

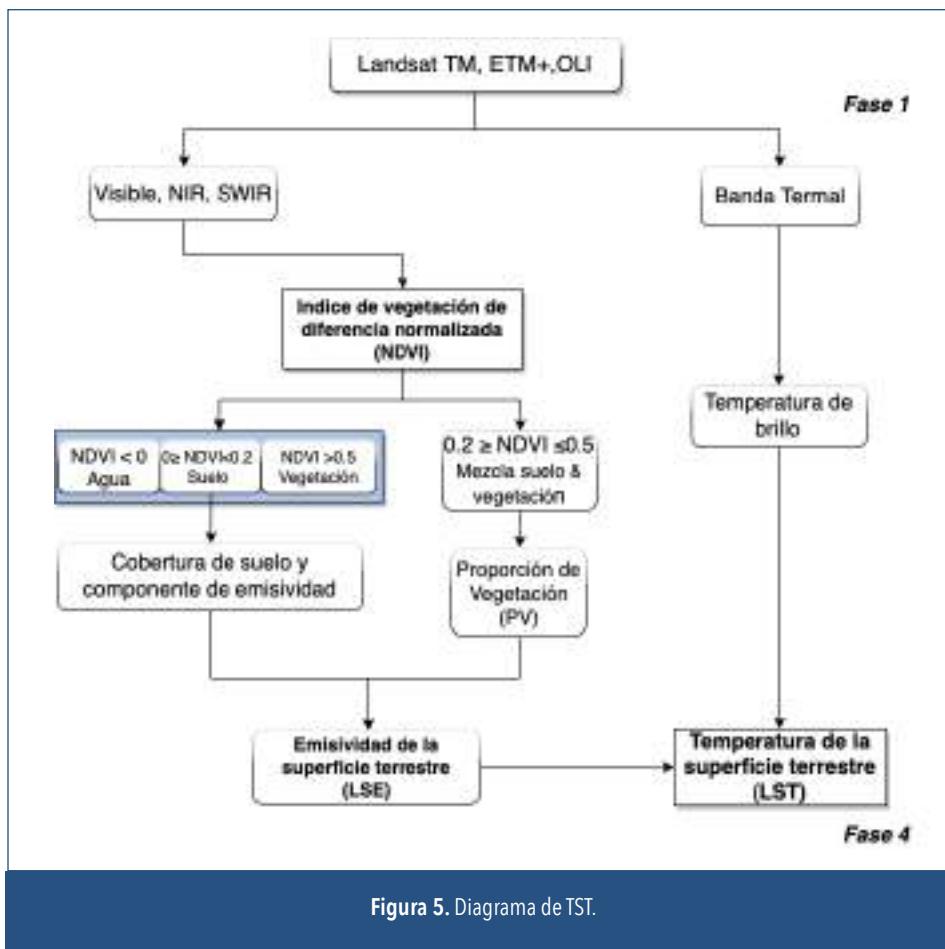


Figura 5. Diagrama de TST.

para suelo desnudo (Sobrino et al., 2004). Dado que los NDVI y NDVI_V dependerán de las condiciones atmosféricas, el NDVI puede calcularse a partir de la reflectancia en la superficie en lugar de la reflectancia TOA (Jiménez-Muñoz et al., 2009).

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVIs}{NDVIv - NDVIs} \right)^2 \quad (3)$$

En este estudio, el NDVI adquirido de los productos Landsat se derivó de las escenas de reflectancia de la superficie, por lo que podría implementarse

directamente para el cálculo de PV. Además, para obtener valores consistentes, PV debe establecerse en cero como valor mínimo y en uno como máximo (Sobrino et al., 2008).

Método simplificado de umbrales NDVI

Para obtener la emisividad de la superficie terrestre se aplicó un método de umbrales NDVI simplificado utilizando la Ecuación 4. Para ello fue necesario conocer la emisividad del suelo y la vegetación. En el caso del suelo desnudo, en los valores de emisividad la variación es mayor que para la vegetación, por lo que una de las alternativas es utilizar el valor de emisividad media de la biblioteca espectral ASTER de 49 suelos. Para la banda TM 6, la emisividad del suelo \mathcal{E}_S es igual a 0.973 ± 0.004 y la emisividad de la vegetación \mathcal{E}_V es 0.99 (Sobrino et al., 2004). Además, para otras superficies como el agua, el valor de emisividad se asigna directamente a los píxeles con $NDVI < 0$ (Sobrino et al., 2008).

$$E\lambda = \begin{cases} E_s\lambda + \left(\frac{E_v\lambda - E_s\lambda}{E_v\lambda} \right) P_V, & NDVI < NDVI_S \\ NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V, & \text{suelo húmedo o pixels de mezcla} \\ NDVI > NDVI_V, & \text{vegetación} \end{cases} \quad (4)$$

La siguiente tabla muestra las emisividades utilizadas para el agua, el suelo, la vegetación y los píxeles de mezcla.

TABLA 2. VALORES DE EMISIVIDAD SELECCIONADOS

Banda	\mathcal{E} agua	\mathcal{E} suelo	\mathcal{E} vegetación	\mathcal{E} mix
TM/ETM+ (band 6)	0.9885	0.97	0.99	$0.004P_V + 0.986$
TIRS (band 10)	0.991	0.964	0.984	$0.001P_V + 0.983$

2.4.2 Temperatura de la superficie terrestre (TST)

Para estimar la TST, la emisividad obtenida en el paso anterior se implementó en la Ecuación 5. Este método se ha aplicado en varios estudios (Weng et al., 2004; Adeyeri et al., 2017; Nguemhe Fils et al., 2018).

$$T_s = \frac{BT}{\left[1 + \left(\frac{\lambda \times BT}{\rho}\right) \times \ln(\ln \varepsilon_\lambda)\right]} \quad (5)$$

Donde BT es la temperatura de brillo, λ es la longitud de onda de la radiancia emitida, correspondiente al promedio del rango de longitud de onda de cada sensor (Tabla 3), ρ es equivalente a 1438×10^{-2} mK, en razón de $\rho = h c \sigma$, donde σ es la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J / K), h es la constante de Planck (6.626×10^{-34} J s) y c es la velocidad de la luz (2.998×10^8 m / s).

TABLA 3. LONGITUD DE ONDA PROMEDIO DE LOS SENSORES TÉRMICOS LANDSAT

Sensor	Banda	λ Rango	$\underline{\lambda}$
TM/ETM+	6	10.40-12.50	11.45
TIRS	10	10.60-11.19	10.985

2.5 Análisis de los datos

El análisis de data se hizo siguiendo la fase 5 presentada en la Figura 6.



Figura 6. Diagrama de análisis de datos.

2.5.1 Diseño de muestreo

Para obtener los valores de TST para el área urbana y sus alrededores, se utilizó un enfoque de muestreo espacial. Se creó una muestra de 750 puntos generados aleatoriamente para analizar la ICU y evaluar la relación entre TST, NDVI y NDBI. Los puntos de muestreo cubrieron el área urbana y área de influencia, y el número de puntos fue ponderado de acuerdo con el área de cada zona. Por lo tanto, se distribuyeron 500 puntos dentro del área de influencia y 250 puntos dentro del límite urbano.

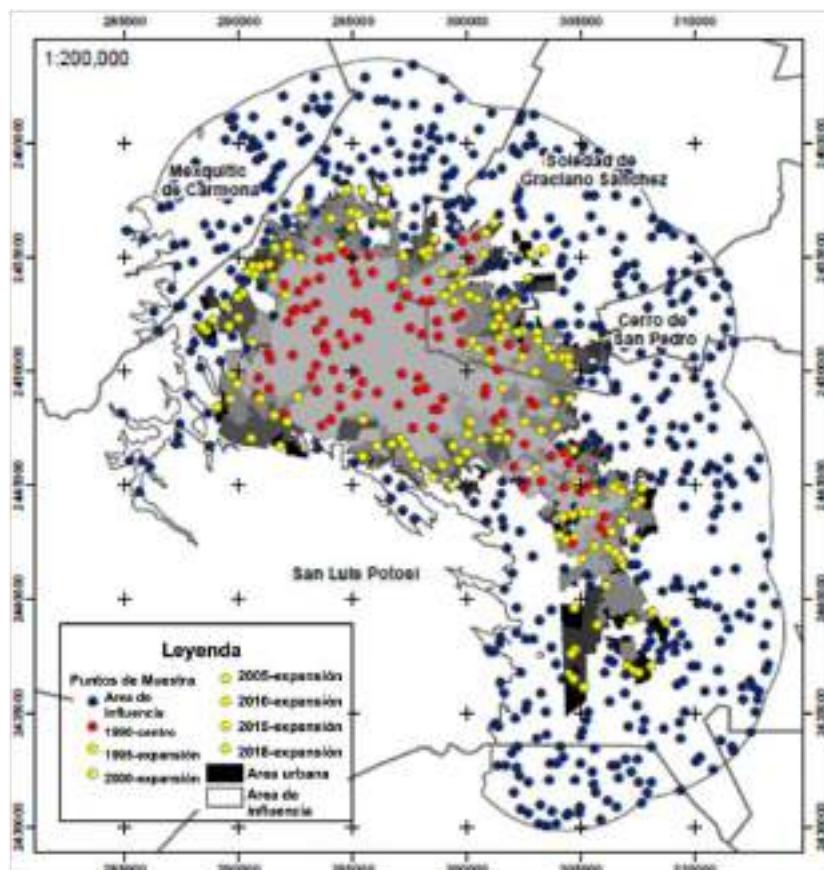


Figura 7. Distribución aleatoria de puntos de muestreo.

La Figura 7 presenta la distribución de los puntos de muestra, donde los puntos azules corresponden al área de influencia, los puntos en rojo son puntos urbanos desde 1990 y los puntos amarillos se ubican en las áreas de expansión entre períodos de expansión.

2.5.2 Análisis de la temperatura superficial

Intensidad de la isla de calor urbano

El análisis de la intensidad de la ICU se realizó calculando la diferencia entre la TST media anual de los puntos de muestra dentro de los límites urbanos y los puntos del área circundante (zona de influencia) para el verano y para el invierno (Ecuación 6).

$$IICU = TST_{urbano} - TST_{influencia} \quad (6)$$

Para evaluar las diferencias en temperatura entre las áreas urbanas y los alrededores, la prueba no-paramétrica (Mann Whitney) se hizo debido a la no normalidad de los datos.

Correlación entre variables

Además de los valores de temperatura de la superficie terrestre, se extrajeron los valores NDVI y NDBI de cada ráster en los puntos de muestra. Las relaciones entre la TST, el NDVI y el NDBI se determinaron mediante la estimación de los coeficientes de correlación de Spearman debido a la no normalidad de los datos.

Tendencia temporal de la temperatura de la superficie terrestre

Para detectar la tendencia temporal de la TST se utilizó la prueba de Mann-Kendall. La significación estadística se estableció en $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron en la versión de prueba XLSTAT.

Focos de temperatura superficial terrestre

Para evaluar las zonas de mayor TST dentro de la ciudad, los valores de TST se agruparon en cinco categorías basadas en intervalos aplicable a todos los

rásters para el verano y para el invierno. Estos grupos se reclasificaron usando valores de 1 a 5, donde la categoría con la temperatura más baja se le asignó 1 y así sucesivamente hasta la categoría con los valores de temperatura más altos, a la que se asignó 5. Se sumaron los rásters reclasificados y el ráster resultante se reclasificó, donde los valores más altos se identificaron como focos de TST persistente en la ZMSLP para cada estación.

3 RESULTADOS

3.1 Intensidad de la isla de calor urbano

Para determinar la intensidad de la ICU de la ZMSLP se compararon las temperaturas extraídas de los puntos de muestreo dentro y fuera del área urbana. La prueba de Mann-Whitney mostró que para el verano y el invierno la TST dentro del área urbana es significativamente más baja que la TST en los alrededores (Figura 8). Se registra una media de 33.11 °C para el área urbana y 35.23 °C en el entorno para el verano, mientras que, para el invierno, es de 19.64 °C en el urbano y de 21.65 °C en el entorno.

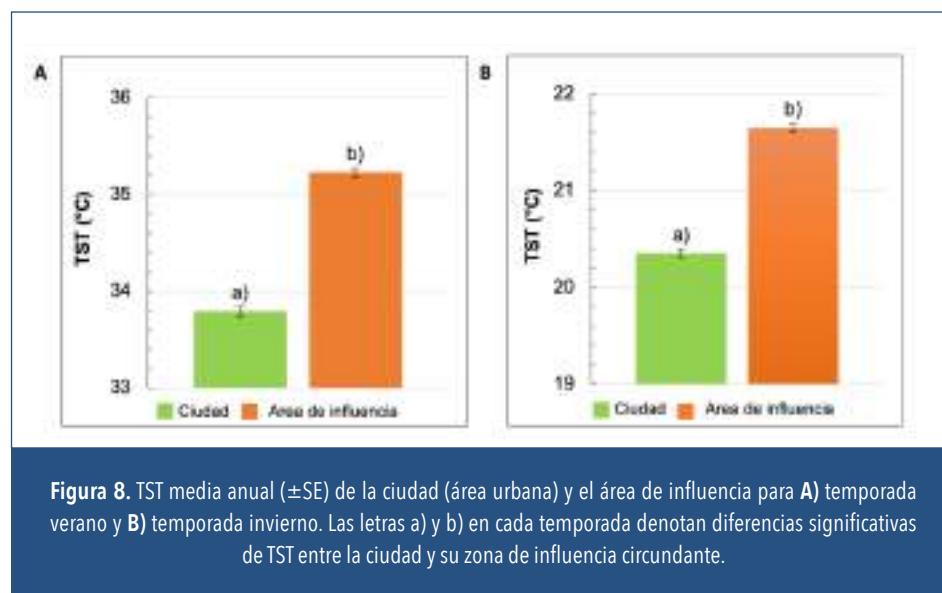


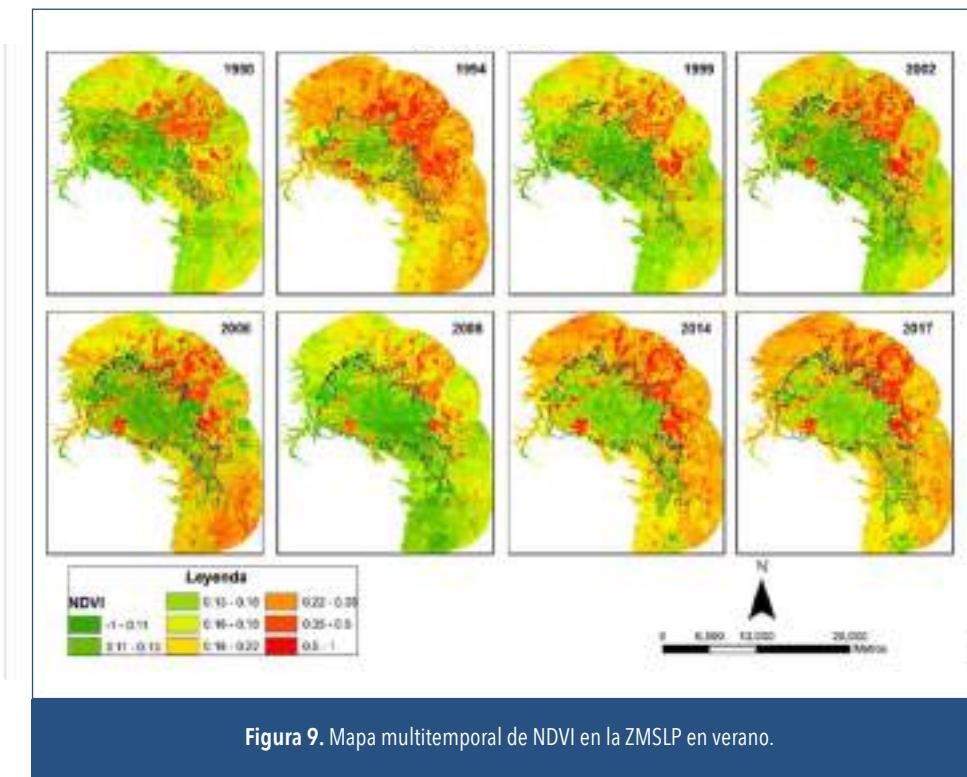
Figura 8. TST media anual (\pm SE) de la ciudad (área urbana) y el área de influencia para **A)** temporada verano y **B)** temporada invierno. Las letras a) y b) en cada temporada denotan diferencias significativas de TST entre la ciudad y su zona de influencia circundante.

La diferencia media anual de la TST entre el área urbana y el entorno es -1.44°C en verano y -1.30°C en invierno. Los valores negativos de ambas estaciones definen una ICUS negativa al mediodía, lo que denota que las áreas circundantes tienen una temperatura ligeramente más alta que el área urbana.

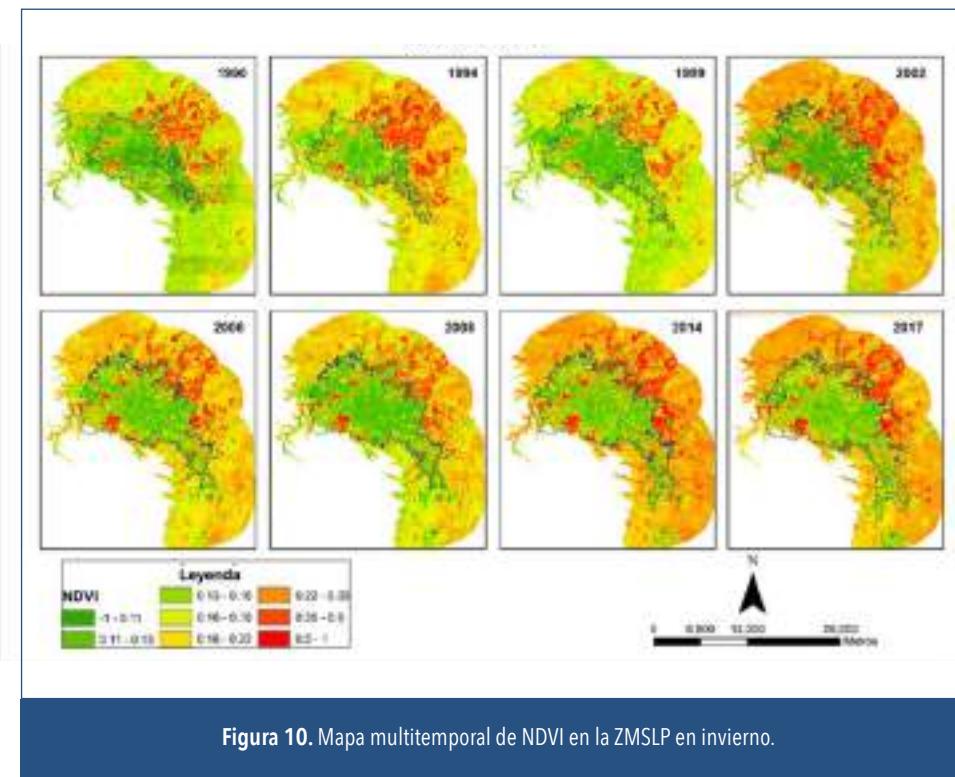
3.2 Relación entre NDVI, NDBI y la temperatura de la superficie terrestre

3.2.1 Análisis espaciotemporal de NDVI, NDBI y TST

Los resultados de la distribución espacial y temporal para la temporada de verano e invierno del índice de vegetación se muestran en la Figura 9 y la Figura 10. Los valores del NDVI entre ambas estaciones variaron de -0,43 y 0,90 en verano y de -0,58 a 0,91 en invierno.



Los valores positivos de NDVI se agregan principalmente a la región noreste en el área no urbana circundante, donde se encuentran los campos agrícolas. Dentro del área urbana, los puntos más destacados de alto NDVI corresponden a áreas verdes ubicadas al suroeste (parque Tangamanga I), noroeste (Tangamanda II) y oeste (predios privados). Los valores de NDVI bajos dominantes se encuentran en áreas con vegetación xerofítica escasa y baja, y los valores de NDVI negativos se ubican en áreas áridas y urbanizadas.



El análisis espacial y temporal de las áreas edificadas (NDBI) para el periodo de verano e invierno se presenta en la Figura 11 y la Figura 12. De la comparación entre estaciones, en el verano, el NDBI varió de -0.80 a 0.94 mientras que en invierno de -0.86 a 0.71. La distribución de las superficies edificadas se concentra alrededor del centro de la ciudad y se fragmenta a medida que se expande con agrupaciones urbanizadas dispersas.

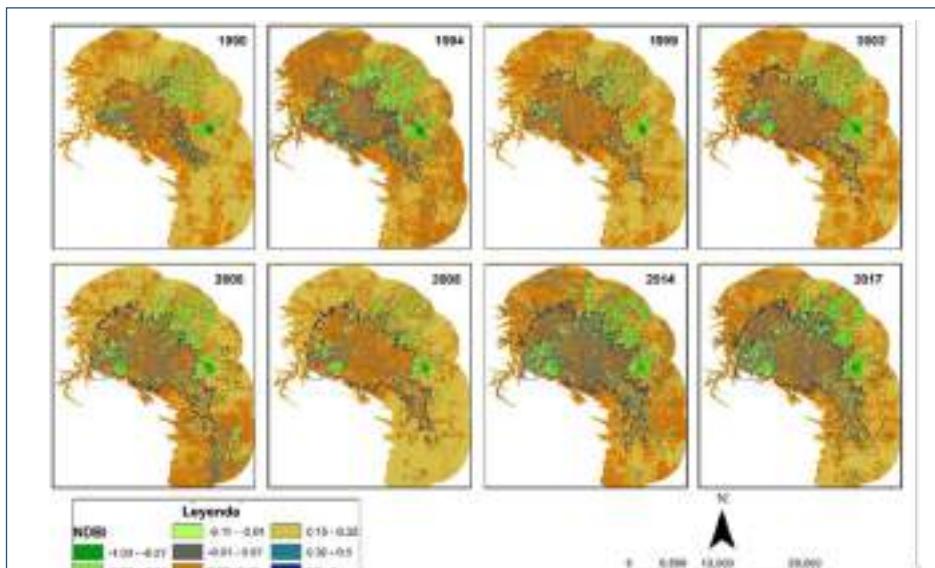


Figura 11. Mapa multitemporal de NDBI en la ZMSLP en verano.

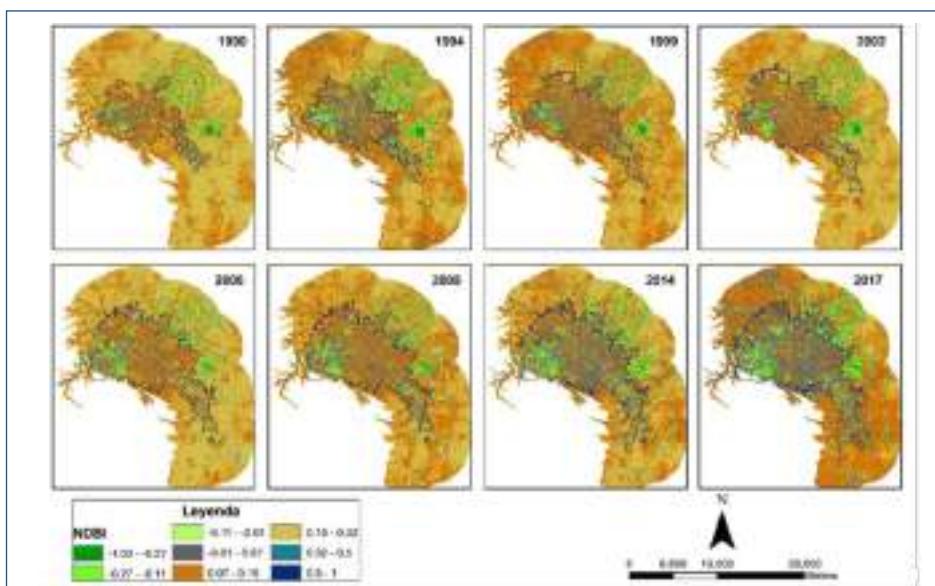
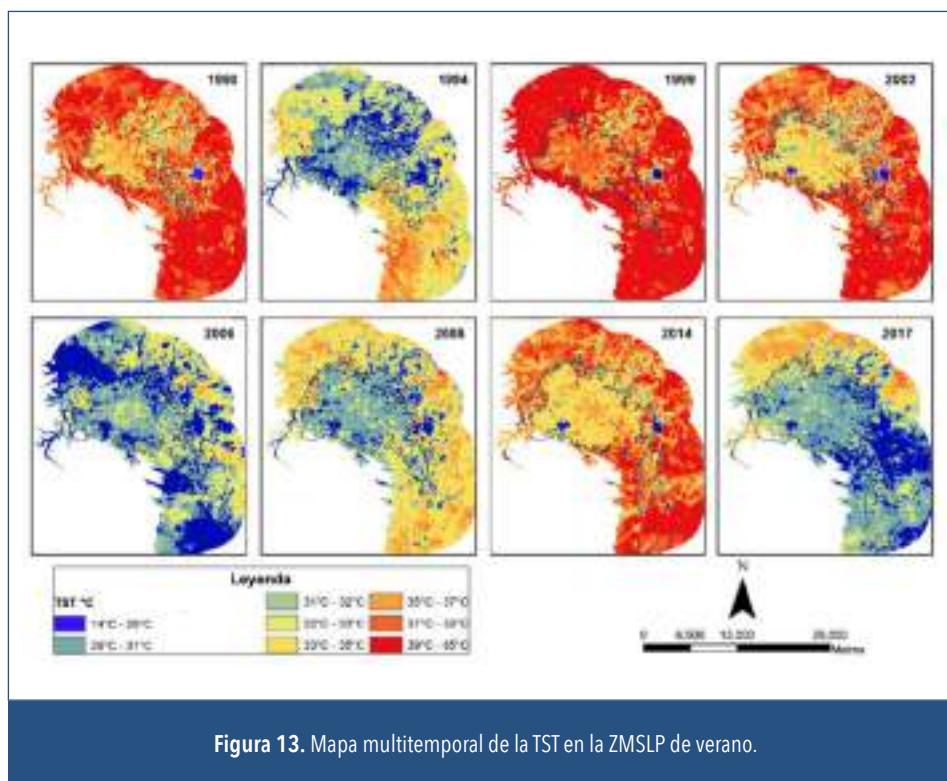


Figura 12. Mapa multitemporal de NDBI en la ZMSLP en invierno.

El NDBI más alto dentro de la ciudad corresponde a las áreas construidas agregadas; sin embargo, cuando se consideró la zona de influencia, los valores más altos de NDBI se encontraron en suelo xérico.

En el caso de TST, la distribución espacial y temporal para el verano y el invierno se muestra en las Figuras 13 y 14. La TST varió de 4.45 a 51.31 °C en verano y de -8.05 a 34.98 °C en invierno. La diferencia en la TST media entre ambas estaciones fue de alrededor de 13 °C.

Los resultados revelaron temperaturas más altas en superficies desnudas y suelos xéricos, ubicados principalmente en el norte y sur del área no urbana circundante. Dentro del área urbana, la temperatura más alta se encuentra en áreas urbanizadas principalmente sobre la zona industrial. Por el contrario, los campos agrícolas en el noreste de los alrededores y las áreas verdes en el este, dentro del área urbana, tienen las temperaturas más bajas durante el periodo de estudio.



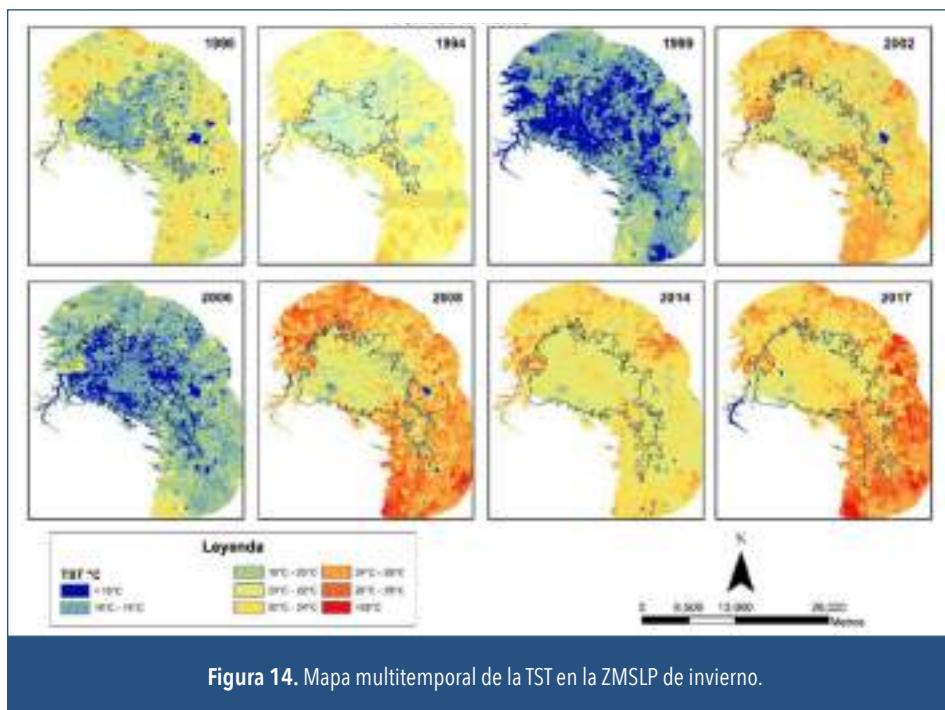


Figura 14. Mapa multitemporal de la TST en la ZMSLP de invierno.

3.2.2 Correlación entre NDVI, NDBI y TST

Los resultados del análisis de correlación de Spearman mostraron relaciones significativas entre la temperatura de la superficie, el verdor de la vegetación y las áreas de edificación. TST y NDVI mostraron una correlación negativa significativa de (-0.279 para verano y -0.041 para invierno), mientras que el coeficiente de correlación entre TST y NDBI fue significativo y positivo (0.482 para verano y 0.318 para invierno). Ambos con un valor de $p < 0.0001$ (Figura 15).

3.3 Dinámica de la TST

3.3.1 Análisis de focos de TST

A partir de la evaluación de la temperatura superficial dentro del área urbana, se encontraron puntos críticos significativos de alta TST, principalmente en el sureste del área urbana en las ubicaciones de área edificadas y sobre la zona industrial para las temporadas de verano e invierno (Figura 16).

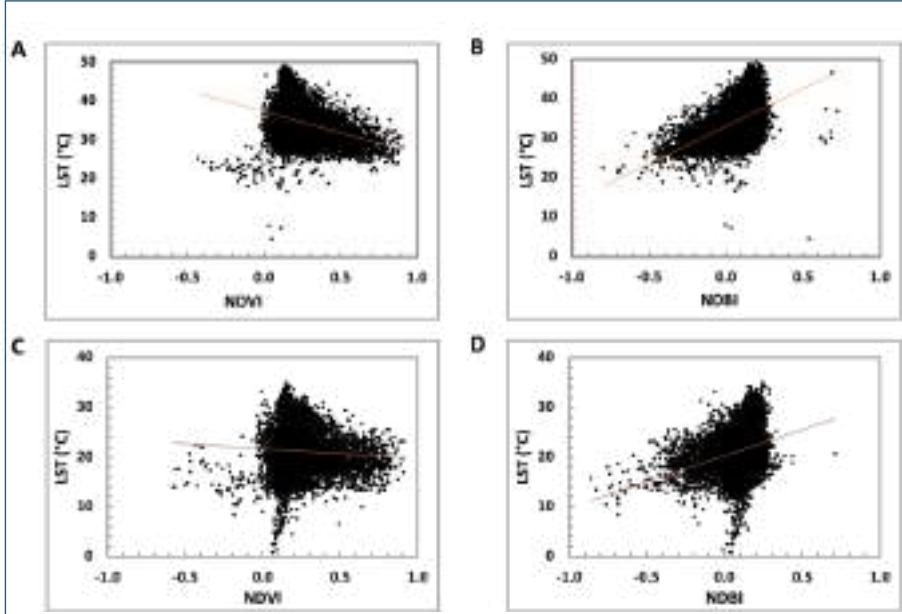


Figura 15. Correlación gráfica entre TST y NDVI para **A)** verano y **C)** invierno, y correlación gráfica entre TST y NDBI para **B)** verano y **D)** invierno.

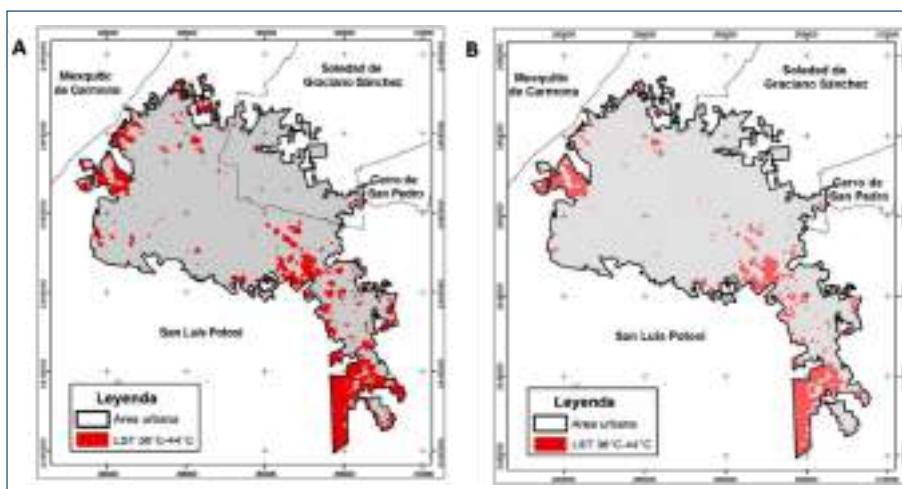
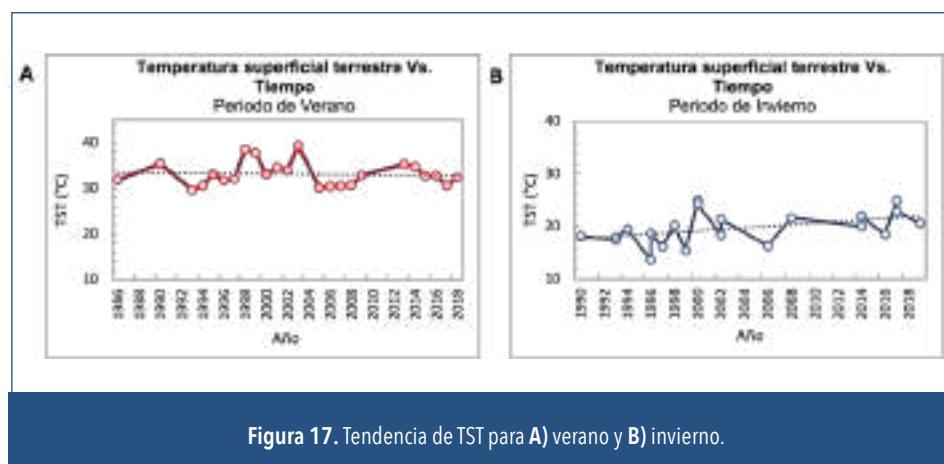


Figura 16. Focos de TST urbana dentro del área metropolitana de SLP **A)** en verano **B)** en invierno.

3.3.2 Tendencias temporales de la TST

Se detectaron tendencias de temperatura para el área urbana en el periodo (1986-2018) para la estación de invierno y verano. Según la prueba de Mann-Kendall (Figura 17), los resultados indicaron una tendencia positiva significativa de TST para invierno, mientras que no se detectó ninguna tendencia para verano.



4 DISCUSIÓN

La temperatura superficial en ZMSLP: ¿isla de calor urbano o isla de calor negativa?

La mayor parte de la información sobre el fenómeno de la ICU proviene de investigaciones enfocadas en regiones templadas, mientras que hay pocos estudios dirigidos a lugares áridos y semiáridos. Sin embargo, dado que el clima local tiene una fuerte contribución a las ICU (Zhao et al., 2014), es fundamental analizar cómo se produce este fenómeno en contextos geográficos más amplios. Este estudio se suma a la comprensión de la ICU en regiones semiáridas y busca comprender la dinámica espacial y temporal de TST en la ZMSLP.

Un indicador del clima urbano se conoce como intensidad de la ICU, esto se puede medir a nivel superficial, comparando la temperatura de la

superficie del suelo entre áreas urbanas y no urbanas. En la literatura se encuentran varias metodologías de intensidad de la ICU, algunas de ellas se basan en la definición urbano-rural mientras que otras aplican un enfoque diferente. Hay estudios que excluyen cualquier comparación urbano-rural debido a la complejidad en la selección de núcleo urbano y área no urbana (Martin et al., 2015), o por la dificultad en la comparación de estudios entre diferentes ciudades debido a las distintas definiciones de las áreas urbanas y no urbanas. Con este enfoque la ICU puede ser determinada definiendo umbrales de temperatura por encima del promedio de TST (Martin et al., 2015; Effat et al., 2015) o categorizando el entorno urbano en zonas basadas en la cobertura del suelo y la geometría urbana dentro de la ciudad (Colunga et al., 2015; Nassar et al., 2016). Sin embargo, para este estudio la metodología se basó en la definición de entornos urbanos y no urbanos, destacando la importancia de dicha delimitación para la precisión de los resultados de la investigación (Suomi, 2014; Mathew et al., 2015; Cui et al., 2016; Hao et al., 2016).

A pesar de la complejidad del proceso, la delimitación del área urbana y no urbana nos permite entender la diferencia en la temperatura asociada con la sustitución de la cobertura natural por urbanización. Las observaciones no urbanas no deben incluir calor antropogénico en el balance energético y deben ser lo más similares posible a la cobertura natural del lugar, con el fin de asegurar valores válidos de intensidad ICU. Además, para definir el entorno no urbano, este estudio tiene en cuenta la elevación del terreno, por lo que las formaciones montañosas (por ejemplo, la sierra de Álvarez y la sierra San Miguelito) alrededor del valle en el que se asienta el área metropolitana no se incluyen debido a su influencia en la temperatura mencionada por Gallo et al. (1993) y Khandelwal et al. (2018). La consideración del rango de altitud entre áreas urbanas y no urbanas se hace para que las diferencias de temperatura revelen solo el efecto urbano.

A partir de evaluaciones de intensidad del calor en zonas urbanas, la investigación en ambientes templados y tropicales ha detectado ICU (Kim & Baik, 2005; Suomi, 2014; Tsou et al., 2017; Peres et al., 2018). Sin embargo, en lugares áridos y semiáridos se puede identificar una inversión de ICU (Nassar et al., 2016). Para la ZMSLP, la evaluación de ICU detecta la formación de una isla de calor superficial negativa durante el día. Este resultado

está respaldado por estudios en climas secos que también mostraron una ICU negativa diurna (Frey et al., 2005; Lazzarini et al., 2013 y 2015; Rasul et al., 2016; Nassar et al., 2017).

En el área de estudio, el promedio anual de TST presenta una ligera diferencia entre el área urbana y la no urbana, demostrando que la TST más alta está localizada en el entorno semiárido y no en el área urbana. Esto podría explicarse por la presencia del suelo xérico, ya que se calienta más rápido que las superficies urbanas, que se registra en el momento de adquisición de la imagen satelital. Este resultado es similar al de la ciudad semiárida de Teherán, donde las tierras desnudas juegan un papel importante en la formación de ICUN (Haashemi et al., 2016). Sin embargo, cuando se comparó el área urbana de Teherán con la agricultura y el agua, el resultado fue una ICU, esto se puede observar de la misma manera, ya que las áreas urbanas reflejan temperaturas más altas que los campos agrícolas.

Además, la ICUN es débil (es decir, -1.44 °C en verano y -1.30 °C en invierno), lo que en parte podría explicarse por la hora local de la captura de la imagen satelital (entre las 11:15 a. m. y las 12:15 p.m.). Como explican Weng et al. (2004), cerca de esta hora podría aumentar la posibilidad de no detectar la magnitud más fuerte del día. Este hecho es importante para comprender la intensidad y la magnitud de la ICU y cómo puede cambiar cada hora. Por otro lado, la evaluación del fenómeno de ICU nocturno debe ser considerado para futuras investigaciones (Lazzarini et al., 2015; Rasul et al., 2016).

Es importante recalcar que a pesar de tener una intensidad de isla de calor negativa esto no implica que no sea necesario tomar medidas para mitigar las temperaturas en aumento. Ciudades rodeadas de coberturas de suelo semiáridos no experimentan ICU en el día (a menudo tienen una isla de calor negativo diurno), sin embargo, tienen serios problemas con el calor, una clara falta de confort térmico y un elevado consumo de energía de los edificios durante el día (Martilli et al., 2020). Ya que la intensidad de la ICU no es un indicador relevante en la mitigación de calor, es importante enfocar esfuerzos en reducir el impacto negativo del calor urbano en vez de mitigar la magnitud de la ICU. Es decir, las estrategias de mitigación deben depender de las características térmicas de la zona urbana y no de su diferencia con las de las zonas rurales circundantes.

4.1 Temperatura superficial, áreas edificadas y veredor de la vegetación

Este estudio encontró una relación significativa entre la TST, la vegetación y las áreas edificadas en la ZMSLP. Esto sugiere que la formación de la ICUN durante el día está relacionada con el veredor de la vegetación y con las superficies edificadas medidas por el NDVI y el NDBI respectivamente.

La correlación negativa con el NDVI sugiere que la presencia de vegetación puede resultar en una disminución de la TST. Esto significa que las temperaturas más bajas se encuentran típicamente en áreas de alto NDVI, como es el caso del parque Tangamanga, un bosque urbano con alta abundancia de árboles y especies arbustivas (CECURT, 2017). El aporte de las áreas verdes a la reducción de la temperatura podría explicarse por el enfriamiento evaporativo (Lazzarini et al., 2015) o por la capacidad aerodinámica de difusión sensible del calor (Zhao et al., 2014), que es mayor en comparación con las áreas con poca o nula vegetación. En el caso de los alrededores, la mayor temperatura superficial podría darse por la presencia de suelo xérico con escasa vegetación y suelos desnudos. El tipo de agricultura puede ser reflejada en el nivel de veredor, donde las áreas irrigadas serán más verdes en comparación con las áreas de agricultura temporal; por ejemplo, en temporadas secas donde las áreas de agricultura temporal no contarán con cultivos. Como mostraron otros estudios, las mediciones de vegetación son sensibles a las variaciones estacionales, lo que significa que se podrían detectar diferentes respuestas en TST (Piao et al., 1982).

En la ZMSLP la concentración de lluvia se da en verano y parte de otoño, entre mayo y octubre, mientras que el invierno se caracteriza por temperaturas y precipitaciones más bajas. Esto puede influir en el veredor y por lo tanto en las variaciones de TST entre estaciones.

Para las áreas edificadas, se encuentra una correlación positiva significativa con la TST, lo que sugiere que la presencia de áreas urbanas puede influir en la ICU. Esta relación podría explicarse por los materiales de las superficies urbanas que absorben y retienen la radiación solar (Shahmohammadi et al., 2010). Los materiales usados para edificios e infraestructura tienen una mayor capacidad térmica, lo que hace que las áreas urbanizadas

experimenten una mayor TST en comparación, por ejemplo, con las áreas verdes. A pesar de la operatividad y utilidad del NDBI en la identificación de superficies construidas e impermeables en ambientes tropicales y subtropicales, para áreas áridas y semiaridas es importante evaluar otros índices que aumenten la precisión de discernimiento entre áreas construidas y suelos desnudos.

Es necesario un mayor conocimiento de la proporción y el detalle del uso de suelo/cobertura del suelo durante todas las estaciones para comprender mejor la influencia de los factores antes mencionados en el fenómeno de la ICU.

4.2 Características espaciotemporales de la TST en San Luis Potosí

Durante el periodo de estudio se ha observado un rápido crecimiento urbano e industrial, donde las áreas edificadas, la infraestructura y la industria aumentaron, reemplazando áreas semiáridas de cobertura natural como matorrales de crassicaule y pastizales naturales (Amuzurrutia-Valenzuela et al., 2015). En la ZMSLP el área edificada se encuentra concentrada en el centro, con un crecimiento segregado y fragmentado hacia la periferia, lo cual es posible identificar y confirmar con el análisis espacial NDBI. La distribución espacial del área urbana está relacionada con la distribución espacial de la TST que muestra el efecto térmico prolongado de la ICU negativa.

En cuanto a la distribución de la vegetación, el NDVI muestra mayor verdor en los alrededores, donde se ubican los campos agrícolas, y en las áreas verdes dentro del área urbana. Estos espacios representan focos de enfriamiento dentro de la ciudad, sin embargo, hay escasez y distribución desigual de parques urbanos y espacios verdes en la zona metropolitana. La mayoría de las áreas verdes están localizadas en áreas de mayor ingreso económico, mientras que en las áreas de menor nivel económico existe una deficiencia de vegetación urbana. Tomando esto en consideración, los estudios futuros deben analizar la distribución óptima de las áreas verdes considerando el paisaje xérico para lograr beneficios de enfriamiento.

4.3 Tendencia de la TST dentro del área urbana

Finalmente, dentro del área urbana se nota una tendencia positiva significativa de la TST para la temporada de invierno durante el periodo de estudio 1986-2018. Este resultado se puede relacionar con otros estudios en regiones semiáridas que también consideraron los impactos de la expansión urbana en la temperatura. Este estudio corrobora que las ciudades asentadas en ambientes áridos y semiáridos enfrentan desafíos debido al rápido crecimiento poblacional, a las altas tasas de urbanización y a las altas temperaturas, además de los impactos más frecuentes y severos del cambio climático proyectados por el IPCC (2014).

4.4 Alcance y limitaciones

El alcance de este estudio es explorar la dinámica de la ICUS en la ZMSLP, considerando su área urbana, el municipio adyacente de Soledad de Graciano Sánchez y el entorno no urbano, durante un periodo de 32 años desde 1986 hasta 2018, incluido el análisis estacional de verano e invierno.

Se encontró que la implementación del NDBI tiene restricciones en la distinción entre áreas edificadas y suelos desnudos, particularmente limitante para zonas áridas y semiáridas.

Además, este estudio se enfrenta a algunas limitaciones en la adquisición de datos y la estimación de la TST. Tanto la reflectancia de la superficie como los productos de índices espectrales pueden presentar incertidumbres en áreas donde la corrección atmosférica se ve afectada por condiciones extremas, como áreas hiperáridas o la presencia de contaminación por nubes (USGS, 2020 y 2021).

El uso de imágenes satelitales Landsat gratuitas para estudios de ICU permite la recolección de datos a largo plazo con una resolución espacial moderada, sin embargo, la resolución temporal limita el alcance del estudio solo a un análisis diurno. Además, a partir de las imágenes satelitales se estima únicamente la temperatura superficial, por ello es necesario complementar con estudios *in situ* que contemplen la temperatura del aire, para comprender de mejor manera la temperatura concreta del ambiente urbano.

Para la estimación de la emisividad de la superficie terrestre, se implementaron valores globales de NDVI y emisividad, ya que no se encontraron valores para el área de estudio. El uso de valores globales podría dar lugar a interpretaciones erróneas (Sobrino et al., 2008), sin embargo, existe una deficiencia en las mediciones y validaciones de emisividad de superficie para ambientes semiáridos, por lo que se utilizan valores de la bibliotecapectral ASTER que de alguna forma restringen la precisión del estudio.

El método aplicado para determinar la ICUN en la ZMSLP se basó en la diferencia de la TST media anual de los puntos de muestra dentro y fuera de la ciudad. A pesar de aplicar un muestreo aleatorio, este resultado no es representativo de la heterogeneidad espacial y del clima local de la ciudad. Así también para los focos de la TST se utilizaron tramos absolutos correspondientes a los valores promedio de la TST, por lo que no se explotó el potencial de analizar de forma espacialmente continua la evolución térmica de zonas contrastantes dentro de la ciudad. Como se evidencia en varios estudios, el efecto de la ICU no es uniforme en toda el área urbana, pues depende de factores como el volumen y densidad de edificación, los espacios abiertos, etc. (López et al., 2021). Por ello, nuevas investigaciones que se enfoquen, por ejemplo, en zonas climáticas locales determinadas por características morfológicas y funcionales permitirán una mejor comprensión de las dinámicas urbanas (Azmi et al., 2021; Martilli et al., 2020).

5 CONCLUSIONES

Esta investigación es un esfuerzo para comprender el fenómeno de ICUS en la ZMSLP y contribuir a la comprensión de su dinámica en climas semiáridos. Este estudio detectó una ICUN diurno para el periodo de verano e invierno que muestra que la TST es menor en el área urbana en comparación con sus alrededores. Este resultado se corroboró con varios estudios en ambientes áridos y semiáridos que tuvieron un comportamiento de ICU similar durante el día.

La investigación encontró que la TST tiene una relación débil negativa significativa con el NDVI y una correlación moderada positiva significativa con el NDBI. Por lo tanto, ambos factores pueden influir en diferentes

magnitudes en la TST en la zona metropolitana semiárida de San Luis Potosí y sus alrededores.

Las temperaturas más altas se encontraron en suelos desnudos y xerófilos con escasa vegetación xerofítica ubicada al este del área de influencia. Las zonas urbanizadas que se concentran en el centro de la ciudad con un crecimiento segregado y fragmentado hacia la periferia tienen una TST más baja que la del área circundante; además, focos de TST elevados dentro del área urbana se detectaron principalmente en la zona sureste, en zonas edificadas y en la zona industrial.

Las temperaturas más bajas se encuentran en áreas verdes dentro de la ciudad, que representan focos de enfriamiento; sin embargo, la escasez y la distribución desigual de los parques urbanos y los espacios verdes limitan la eficiencia de enfriamiento de la metrópoli. Adicionalmente, en el noreste del área de influencia, las temperaturas más bajas también se encuentran en las zonas más verdes que corresponden a los campos agrícolas.

La TST urbana mostró una tendencia creciente significativa para la estación de invierno en San Luis Potosí; por lo tanto, la planificación, el diseño y la gestión urbanas son esenciales para la reducción del calor. Para reducir la temperatura urbana, las estrategias deben considerar las condiciones del área. Para incrementar la eficiencia de enfriamiento, se debe tener en cuenta el papel de la vegetación urbana, la optimización de la distribución de áreas verdes, la implementación de especies de vegetación de paisajes xéricos y los requisitos de consumo de agua.

Futuras investigaciones son necesarias para contribuir a la comprensión del clima urbano en ambientes semiáridos y en la zona metropolitana. El análisis de la ICU nocturno es clave, ya que algunos estudios con condiciones similares han detectado una ICU durante la noche.

REFERENCIAS

- Adeyeri, O. E., Akinsanola, A. A. & Ishola, K. A. (2017). Investigating surface urban heat island characteristics over Abuja, Nigeria: Relationship between land surface temperature and multiple vegetation indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 57-68.

- Amuzurrutia-Valenzuela, D., Aguirre-Salado, C. & Sánchez-Díaz, G. (2015). ¿Hacia dónde crecerá la ciudad de San Luis Potosí (Méjico) después de 2009? *Eure*, 41(124), 113-137.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26.
- Azmi, R., Tekouabou Koumetio, C. S., Diop, E. B. & Chenal, J. (2021). Exploring the relationship between urban form and land surface temperature (LST) in a semi-arid region case study of Ben Guerir city – Morocco. *Environmental Challenges*, 5.
- Carlson, T. N. & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252.
- CECURT (2017). *Parque Tangamanga*.
- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A. & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205-218.
- Cui, Y., Xu, X., Dong, J. & Qin, Y. (2016). Influence of Urbanization Factors on Surface Urban Heat Island Intensity: A Comparison of Countries at Different Developmental Phases. *Sustainability*, 8(8), 706.
- Dash, P., Götsche, F.-M., Olesen, F.-S. & Herbert, F. (2002). Land Surface Temperature and Emissivity Estimation from Passive Sensor Data: Theory and Practice-Current Trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2563-2594.
- Effat, H., Taha, L. & Mansour, K. (2014). Change Detection of Land cover and Urban Heat Islands using Multi-Temporal Landsat Images, application in Tanta City, Egypt. *Open Journal of Remote Sensing and Positioning*, 1(2), 1-15.
- Frey, C. M., Rigo, G. & Parlow, E. (2005). Investigation of the Daily Urban Cooling Island (UCI) in Two Coastal Cities in an Arid Environment: Dubai and Abu Dhabi (U.A.E). *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Arch. XXXVI-8/W2*, 1-5.
- Gallo, K. P., McNab, A. L., Karl, T. R., Brown, J. F., Hood, J. J. & Tarpley, J. D. (1993). The Use of NOAA AVHRR Data for Assessment of the Urban Heat Island Effect. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 32(5), 899-908.
- Haashemi, S., Weng, Q., Darvishi, A. & Alavipanah, S. K. (2016). Seasonal Variations of the Surface Urban Heat Island in a Semi-Arid City. *Remote Sensing*, 8(4).
- Hao, X., Li, W. & Deng, H. (2016). The oasis effect and summer temperature rise in

- arid regions – Case study in Tarim Basin. *Scientific Reports*, 6(1), 1-9.
- Hernández Cerdá, C. & Ávila Galarza, A. (2017). Movilidad en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. *Revista Universitarios Potosinos*, 217(14), 18-23.
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Lagunillas, San Luis Potosí. Clave geoestadística 24019. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. 1-8.
- INEGI (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*.
- Jensen, J. R. (2007). Thermal Infrared Remote Sensing. En *Remote Sensing of the Environment*. Pearson Prentice Hall.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J. & Martínez, P. (2009). Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of the Environment*, 103(4), 474-487.
- Kaplan, S., Georgescu, M., Alfasi, N. & Kloog, I. (2017). Impact of future urbanization on a hot summer: a case study of Israel. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 325-341.
- Khandelwal, S., Goyal, R., Kaul, N. & Mathew, A. (2018). Assessment of land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(1), 87-94.
- Kim, Y.-H. & Baik, J.-J. (2005). Spatial and Temporal Structure of the Urban Heat Island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44(5), 591-605.
- Lazzarini, M., Marpu, P. R. & Ghedira, H. (2013). Temperature-land cover interactions: The inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. *Remote Sensing of Environment*, 130, 136-152.
- Lazzarini, M., Molini, A., Marpu, P. R., Ouarda, T. B. M. J. & Ghedira, H. (2015). Urban climate modifications in hot desert cities: The role of land cover, local climate, and seasonality. *Geophysical Research Letters*, 42(22), 9980-9989.
- Lemoine-Rodríguez, R., MacGregor-Fors, I. & Muñoz-Robles, C. (2019). Six decades of urban green change in a neotropical city: a case study of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Urban Ecosystems*, 22, 609-618.
- Li, H., Zhou, Y., Li, X., Meng, L., Wang, X., Wu, S. & Sodoudi, S. (2018). A new method to quantify surface urban heat island intensity. *Science of the Total Environment*, 624, 262-272.
- López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E. & Navarro-Estupiñán, J. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera Norte*, 33, 1-31.

- Makhelouf, A. (2009). The effect of green spaces on urban climate and pollution. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 6(1), 35-40.
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S. & Nazarian, N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31.
- Martin, P., Baudouin, Y. & Gachon, P. (2015). An alternative method to characterize the surface urban heat island. *International Journal of Biometeorology*, 59(7), 849-861.
- Moreno Mata, A., Lárraga Lara, R. & Ramos Palacios, C. R. (2016). Expansión urbana, justicia ambiental y equidad en el acceso a espacios verdes en la zona metropolitana de San Luis Potosí. En A. Moreno Mata (ed.), *Medio Ambiente Urbano, Sustentabilidad y Territorio. Volumen II. Sistemas Metropolitanos en Crisis. Dispersión – Fragmentación – Vulnerabilidad*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí / CAHST, pp. 78-107.
- NASA (2017). [Getting Started with MODIS Land Surface Temperature Data](#).
- Nassar, A. K., Blackburn, G. A. & Whyatt, J. D. (2016). Dynamics and controls of urban heat sink and island phenomena in a desert city: Development of a local climate zone scheme using remotely-sensed inputs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 51, 76-90.
- Nguemhe Fils, S. C., Mimba, M. E., Dzana, J. G., Etouna, J., Mounoumeck, P. V. & Hakdaoui, M. (2018). TM/ETM+/LDCM Images for Studying Land Surface Temperature (LST) Interplay with Impervious Surfaces Changes over Time Within the Douala Metropolis, Cameroon. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 131-143.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2^a ed.). Routledge, p. 288.
- Peres, L. de F., De Lucena, A. J., Rotunno Filho, O. C. & França, J. R. de A. (2018). The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 104-116.
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W., Li, Y. & Tao, S. (2003). Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4401.
- Rasul, A., Balzter, H. & Smith, C. (2016). Diurnal and Seasonal Variation of Surface Urban Cool and Heat Islands in the Semi-Arid City of Erbil, Iraq. *Climate* 4(3), 42.
- Roth, M. (2013). Urban Heat Islands. En H. J. Fernando (ed.), *Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Volume Two. Systems, Pollution, Modeling, and Measurements*. CRC Press.

- Shahmohamadi, P., Che-Ani, A. I., Abdullah, N. A. G., Maulud, K. N. A., Tahir, M. M. & Mohd-Nor, M. F. I. (2010). The Conceptual Framework on Formation of Urban Heat Island in Tehran Metropolitan, Iran: A Focus on Urbanization Factor. En H. Fujita & J. Sasaki (eds.), *Selected Topics in Power Systems and Remote Sensing*. WSEAS Press, pp. 251-259.
- Sobrino, J. A. & Raissouni, N. (2000). Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434-440.
- Sobrino, J. A., Jiménez Muñoz, J. C., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., Plaza, A. & Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327.
- Srivastava, P. K., Majumdar, T. J. & Bhattacharya, A. K. (2009). Surface temperature estimation in Singhbhum Shear Zone of India using Landsat-7 ETM+ thermal infrared data. *Advances in Space Research*, 43(10), 1563-1574.
- Suomi, J. (2014). *Characteristics of Urban Heat Island (UHI) in a High-Latitude Coastal City – A Case Study of Turku, SW Finland*. University of Turku.
- Tsou, J., Zhuang, J., Li, Y. & Zhang, Y. (2017). Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. *Urban Science*, 1(1), 10.
- USGS (2020). *Landsat 8 Collection 1 (C1) Land Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Guide*. U.S. Geological Survey.
- USGS (2021). *Landsat 4-7 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide*. U.S. Geological Survey.
- Voogt, J. A. & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.
- Weng, Q., Lu, D. & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483.
- Yuan, F. & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375-386.
- Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B. & Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511, 216-219.

Islas de calor y uso de suelo en Playa del Carmen, Quintana Roo, México

**Gabriel Sánchez-Rivera¹, Leticia Gómez-Mendoza²,
Gladys Pérez-de La Fuente³**

¹ División de Desarrollo Sustentable, Universidad de Quintana Roo. Cozumel, México, y Nodo local 02 Riviera Maya, Red Iberoamericana de Gestión y Certificación de Playas (PROPLAYAS), México. ORCID: 0000-0003-4531-4911. grivera@uqroo.edu.mx

² Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. ORCID: 0000-0003-2436-0302. leticiagomez@filos.unam.mx

³ Nodo local 02 Riviera Maya, Red Iberoamericana de Gestión y Certificación de Playas (PROPLAYAS), México. ORCID: 0009-0005-5549-3249. gpfuente2@gmail.com

RESUMEN

La ciudad de Playa del Carmen, localizada en las costas del Caribe mexicano, representa uno de los principales centros de atracción turística del país, por lo que se encuentra en un constante crecimiento poblacional y de la infraestructura urbana necesaria para atender a los habitantes locales y al turismo nacional e internacional. Los nuevos desarrollos habitacionales y los procesos de conversión de uso de suelo en la ciudad se caracterizan por contar con una escasa cobertura vegetal y el consecuente aumento de la temperatura superficial del suelo en comparación con las áreas de selva aún conservadas en la periferia de la traza urbana. El objetivo del estudio fue ubicar y estimar la intensidad de la isla de calor urbano superficial (ICUS) durante el año 2020 y su asociación con los usos de suelo y la densidad de población de la ciudad de Playa del Carmen. A través de la plataforma Google Earth Engine se obtuvieron y procesaron 366 imáge-

nes diarias del satélite MODIS Aqua para calcular las temperaturas de la superficie terrestre de las bandas LST. Los resultados muestran diferencias significativas en las tasas de cambio térmico entre las zonas densamente urbanizadas (mayores a 50,000 hab/km²) y con escasa vegetación, y aquellas localizadas hacia la periferia de la ciudad (selva tropical conservada). La máxima intensidad de la isla de calor (IIC) fue de 4.1 °C en el mes de mayo. Este trabajo constituye una línea base para orientar la restauración ecológica de la ciudad que contribuya a la disminución de los impactos de la isla de calor en Playa del Carmen.

Palabras clave: isla de calor urbano superficial (ICUS), temperatura de la superficie terrestre (TST), MODIS Aqua, Google Earth Engine, península de Yucatán.

ABSTRACT

The city of Playa del Carmen, located on the Mexican Caribbean coast, is one of the main centers of tourist attraction in the country, and as such is in constant growth in terms of population and the urban infrastructure necessary to serve the local inhabitants and national and international tourism. The new housing developments and the processes of land use conversion in the city are characterized by a scarce vegetation cover and the consequent increase in the surface temperature of the soil in comparison with the jungle areas still preserved in the periphery of the urban layout. The study aimed to locate and estimate the intensity of the urban surface heat island (ICUS) during the year 2020 and its association with land uses and population density in the City of Playa del Carmen. Through the Google Earth Engine platform, 366 daily images from the MODIS Aqua satellite were obtained and processed to calculate the land surface temperatures of the LST bands. The results show significant differences in the rates of thermal change between densely urbanized areas (greater than 50,000 inhabitants/km²) and those located towards the periphery of the city (conserved tropical rainforest). The maximum intensity of the heat island (IIC) was 4.1 °C in May. This work constitutes a baseline to guide the ecological

restoration of the city to contribute to the reduction of heat island impacts in Playa del Carmen.

Keywords: surface urban heat islands (SUHI), land surface temperatures (LST), MODIS Aqua, Google Earth Engine, Yucatan peninsula.

1 INTRODUCCIÓN

El incremento de la extensión de las áreas urbanas trae consigo un aumento de la temperatura con respecto de las zonas colindantes no urbanizadas, donde la vegetación natural se mantiene conservada, efecto que autores como Oke (1973, 1995, 2002) y Landsberg (1981) definen como isla de calor urbano (ICU). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, 2014) las define como zonas de relativa calidez creadas por el aire urbano y las temperaturas de la superficie, las cuales pueden alcanzar valores de entre 1 y 12 °C por arriba de los que se presentan en zonas rurales aledañas. Por su parte, Voogt y Oke (2003) se refieren al término isla de calor urbano de superficie (ICUS) como aquella que puede ser estimada a través de los sensores térmicos remotos, dado que estos instrumentos captan los patrones espaciales de radiación térmica ascendente.

Los efectos de las ICUS se pueden delimitar y estudiar a partir de la identificación de los límites espaciales de la zona urbana (*urban boundary layer*), dado que es en las zonas limítrofes donde las diferencias térmicas entre el medio urbano y rural se diluyen hasta desaparecer (Moreno-García, 1994). La relación entre los entornos con vegetación y las zonas altamente urbanizadas ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, entre los que destacan Buyadi et al. (2014), Doick y Hutchings (2013) y EPA (2008). Un recuento de los principales estudios realizados en torno a la detección y efectos de las islas de calor urbano lo presentan en su investigación Voogt y Oke (2003).

El aumento de las temperaturas asociado a las islas de calor urbano superficial promueve el deterioro de los sistemas socioecológicos, y los efectos de las altas temperaturas generan diversos escenarios tendientes

a incrementar los niveles de vulnerabilidad y exposición de la población, lo que deriva en malestar, enfermedades respiratorias e insolación (Paravantis et al., 2017; Qaid et al., 2016; Romero y Sarricolea, 2006; Wong et al., 2013). El calentamiento urbano y el aumento de las temperaturas asociadas al cambio climático contribuyen a incrementar la demanda en el consumo energético para refrigeración (Salvati et al., 2017).

En este sentido, los escenarios de cambio climático, de acuerdo con Orellana et al. (2009) y Pereira-Corona et al. (2016), apuntan hacia un incremento de las temperaturas superficiales y de la intensidad de las sequías, desde fuerte en la zona centro y sur hasta severo en la zona noroeste de la península, como resultado de los cambios graduales (incremento y/o disminución) de los patrones de precipitación a través de los años (Méndez et al., 2008).

De acuerdo con el reporte del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2021), el año 2020 se destacó por la ocurrencia de diversos eventos hidrometeorológicos intensos. La temporada de huracanes 2020 en el Atlántico Norte fue la más intensa desde 1850 con el registro de 30 eventos. Además de los ciclones, el número de frentes fríos en el estado de Yucatán contribuyó a que el 2020 fuera el año más lluvioso desde 1941, mientras que para los estados de Campeche y Quintana Roo fue el segundo año con las lluvias más intensas en su registro climatológico.

En contraste, el SMN (2021) menciona que desde el 2014, durante los primeros meses del año, la península de Yucatán presenta períodos cercanos a 30 días con temperaturas iguales o mayores a los 40.0 °C, superando por 17 años consecutivos la media nacional de anomalías de temperatura por encima del promedio climatológico 1981-2010. En el 2020 se registró una temperatura media nacional de 22.4 °C y una anomalía del orden de 1.4 °C por encima del promedio nacional (21 °C). Las temperaturas registradas en la zona durante los meses de marzo a julio de 2020 superaron los registros a nivel nacional desde 1953, siendo julio el mes más cálido registrado a nivel nacional y alcanzando, en el caso del estado Quintana Roo, temperaturas de hasta 5.0 °C por arriba del promedio nacional (SMN, 2021), situación que tiene efectos directos sobre la salud y bienestar de los sistemas socioecológicos de la región, particularmente sobre la población que habita las ciudades costeras del norte

del estado, las cuales a su vez presentan un crecimiento en su extensión como consecuencia del acelerado crecimiento económico derivado de la actividad turística. Tal es el caso de la ciudad caribeña de Playa del Carmen, que ha experimentado un acelerado crecimiento poblacional y el aumento en la construcción de infraestructura urbana para satisfacer la demanda de servicios turísticos y de la población local. Los resultados del estudio realizado por Ochoa Jiménez et al. (2020) estiman que de 1985 a 2015 (30 años) la ciudad perdió alrededor de 2,514.6 ha de vegetación natural a una tasa anual de -2.2 % y tuvo una tasa anual de crecimiento del área urbana del orden del 11.6 %. A nivel nacional, Playa del Carmen ocupa el segundo lugar en crecimiento poblacional con una tasa anual promedio de 4.35 % para el periodo 2010-2018, por debajo de San José del Cabo (5.02 %) y por encima de Cancún (2.93 %). Ello ha traído consigo una serie de problemas, entre los que destaca el incremento de la temperatura en las zonas urbanas como resultado de la impermeabilización de los suelos por la instalación de planchas de asfalto y edificaciones. Aunado a lo anterior, se ha intensificado el proceso de gentrificación en la zona centro de la ciudad y ha proliferado la construcción de nuevos fraccionamientos residenciales, zonas de uso comercial e infraestructura y equipamiento urbano. Los nuevos asentamientos se caracterizan por contar con una escasa cobertura vegetal.

Todos estos cambios en la construcción de la ciudad, los servicios y la propia actividad turística, han traído como consecuencia un aumento de la temperatura superficial y una reducción de las tasas de cambio térmico diurno y nocturno, a diferencia de lo que ocurre en las áreas con vegetación natural aún conservadas, ubicadas hacia la periferia de la ciudad. Tales modificaciones en las propiedades naturales de la zona tienen como efecto el incremento del albedo y la emisividad, propiedades que pueden ser estimadas a partir del análisis de la temperatura de la superficie terrestre (TST) a través de productos derivados de percepción remota (Casadei et al., 2021; Jin et al., 2005; Romero y Sarricolea, 2006).

La falta de información completa de las estaciones climatológicas en la zona y la deficiente cobertura de monitoreo en la región se pueden suplementar con bases de datos regionalizadas de largo plazo. Para este estudio se recurrió a productos derivados de imágenes satelitales, adquiridos y

procesados a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017), la cual ofrece amplios repositorios de productos derivados de imágenes satelitales y robustas capacidades para el manejo de información geoespacial basada en la nube.

Desde el 2008 se advierte la necesidad de generar modelos de sustentabilidad ambiental, reordenamiento ecológico territorial a largo plazo; corregir, controlar y revertir desequilibrios del territorio; mejoras en materia de evaluación de impacto ambiental, manejo integral de la zona costera, y el reto en materia de riesgo y vulnerabilidad ante las amenazas derivadas del cambio climático y las enfermedades emergentes y reemergentes (PNUMA et al., 2008). Dentro de la planeación de las ciudades turísticas debe ponerse atención en el diagnóstico del impacto del cambio climático en la población local y los turistas, lo que redundará en la aplicación de medidas de adaptación y un manejo sustentable del territorio. Por lo anterior, este estudio tuvo como objetivo identificar la presencia y la intensidad del fenómeno de isla de calor urbano superficial (ICUS) a través de la medición de las diferencias térmicas diurnas y nocturnas registradas en las zonas urbana y rural, y su correspondencia con los usos de suelo y la densidad de población de la ciudad de Playa del Carmen durante el año 2020.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

La ciudad de Playa del Carmen se localiza en el municipio de Solidaridad, fundado en el año 1993 (PNUMA et al., 2008). Se ubica en la zona norte del estado de Quintana Roo con coordenadas extremas 20° 45' N, 88° 05' W y 19° 46' N, 86° 57' W. Los municipios colindantes son: al noroeste, Lázaro Cárdenas; al norte, Puerto Morelos; al este, la isla de Cozumel y el mar Caribe; al sur, Tulum; y al oeste limita con el estado de Yucatán (INEGI, 2021b). Está conformada principalmente por una amplia plataforma de origen calizo de escaso relieve (Vidal-Zepeda, 2005).

El municipio de Solidaridad presenta un clima de tipo cálido subhúmedo

do con lluvias en el verano isotermal y con presencia de canícula ($Ax'(w2)$ iw") con temperatura promedio anual de 26 °C, con máximas del orden de 33 °C en primavera-verano (de abril a agosto) y mínimas en invierno (enero) de 17 °C. La precipitación promedio anual oscila en el orden de 1300 mm (Orellana, 1999).

La actividad económica preponderante en Playa del Carmen es el turismo y gira alrededor de la 5^a Avenida, vialidad peatonal paralela al litoral costero, mismo que comprende su principal atracción: las playas. Se distinguen también ambientes terrestres (selva, vegetación secundaria), cenotes y ríos subterráneos, y ecosistemas costeros (manglar, duna costera, playa y arrecifes de coral). La selva presenta una degradación significativa en la zona urbana por las actividades humanas. La vegetación

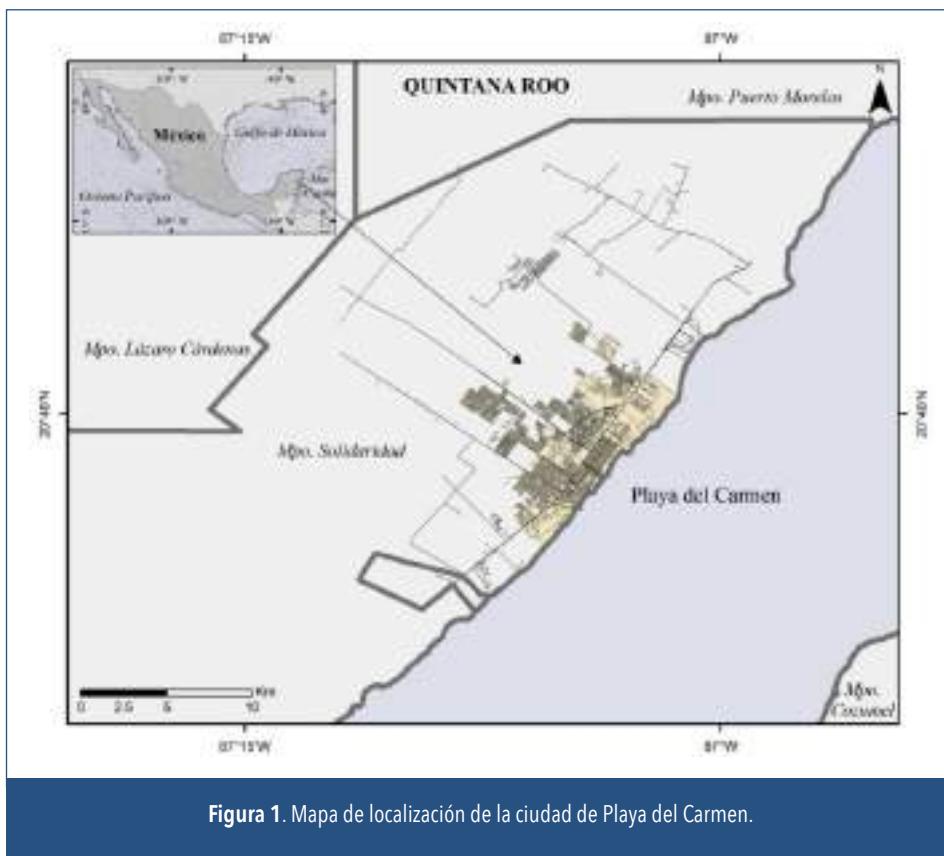


Figura 1. Mapa de localización de la ciudad de Playa del Carmen.

de manglar está drásticamente impactada por la ubicación inadecuada de infraestructura turística costera y de igual manera las dunas y playas (PNUMA et al., 2008).

La sexta serie de Uso del Suelo y Vegetación (INEGI, 2015) reporta que en la periferia de la traza urbana de la ciudad de Playa del Carmen se localizan áreas densas y conservadas de selvas mediana y baja caducifolia, y de selvas mediana y baja subcaducifolia. En esas zonas, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021a), no existen asentamientos humanos, por lo que no se reportan habitantes. En la Figura 1 se presenta el mapa de localización de la ciudad y su traza urbana.

2.2 Materiales

Los productos y materiales de distribución y acceso público utilizados en el presente estudio son los siguientes:

- Temperatura superficial: Datos diarios de temperatura diurna y nocturna de la superficie terrestre (*land surface temperature* o LST, por sus siglas en inglés) se obtuvieron de las bandas “*LST_Day_1km*” y “*LST_Night_1km*” del producto MYD11 del satélite MODIS Aqua. Producto que reporta valores de temperatura diarios en grados Kelvin (K), con resolución de 1 km, tomados entre las 13:00 y 14:00 h en el caso de las temperaturas diurnas, y entre las 01:30 y 02:30 h para las temperaturas nocturnas, en horario local (-5 UTC) de acuerdo con la información extraída de las bandas “*Day_view_time*” y “*Night_view_time*” (Z. Wan et al., 2015).

Los datos son el resultado de la aplicación del algoritmo LST de ventana dividida generalizado (*generalized split-window LST algorithm*), el cual tiene como objetivo recuperar simultáneamente las emisividades y temperaturas de la banda de superficie con una precisión menor a 1 K para todos los tipos de cobertura, incluidas aquellas con emisividades que son difíciles de predecir (Zhengming Wan, 1999, 2008).

- Usos de suelo: Capa del mapa global de uso y cobertura del suelo (LULC) derivada de las imágenes Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea

(ESA) con una resolución de 10 m, producida para el Dynamic World Project por la National Geographic Society en asociación con Google y el World Resources Institute (Karra et al, 2021).

- Tipos de vegetación: Sexta serie de Uso del Suelo y Vegetación (INEGI, 2015).
- Población: Principales resultados por área geoestadística básica (AGEB) y manzana urbana del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021a).
- Configuración de la traza urbana: Marco Geoestadístico, Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021b).

Para el proceso y análisis de los materiales y los resultados generados, se emplearon las siguientes herramientas:

- Plataforma de geoprocесamiento basado en la nube Google Earth Engine, concebida y desarrollada para realizar operaciones complejas de análisis geoespacial sin la necesidad de contar con robustos sistemas computacionales (*hardware* y *software*), al tiempo que permite el acceso a un catálogo conformado por multi-petabytes de imágenes derivadas de diversos satélites de observación terrestre; es utilizada ampliamente en diversas áreas, como son: usos y cambios de suelo, incendios, cartografía urbana, inundaciones, sequías y riesgos epidemiológicos, entre otras (Gorelick et al., 2017).
- Sistema de información geográfica (SIG) ESRI, Arcgis 10.8, para el acabado y elaboración de la cartografía final.

2.3 Métodos

Para cumplir con los objetivos del estudio se agruparon los procesos en tres etapas (Figura 2).

Etapa 1: Adquisición y preprocesamiento de datos.

- Homologación de capas vectoriales e imágenes ráster a la proyección cartográfica UTM-GCS_WGS_1984.
- Conversiones de unidades al sistema métrico decimal.
- Validación de bases de datos.

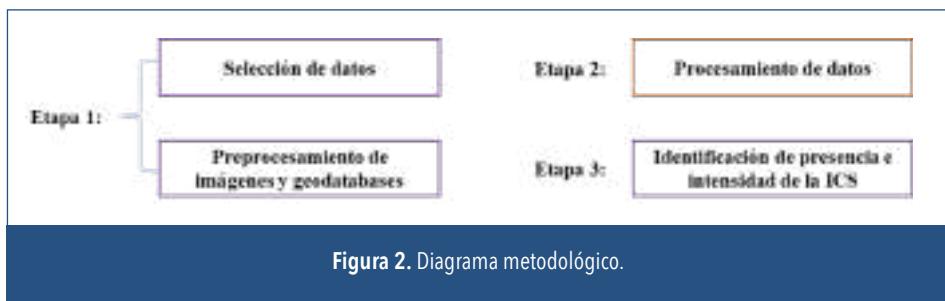


Figura 2. Diagrama metodológico.

Etapa 2: Procesamiento de datos.

- Para la delimitación de la zona urbana de la ciudad de Playa del Carmen y la estimación de la densidad poblacional, se combinaron las capas vectoriales del Marco Geoestadístico (INEGI, 2021b) y se vincularon con los datos tabulares de población a nivel de manzanas (INEGI, 2021a). El mapa de densidad de población se obtuvo calculando el número de habitantes entre la superficie por manzana, los datos se presentan en habitantes por kilómetro cuadrado (hab/km^2).
- Se determinaron los usos de suelo de la ciudad a partir de la capa del mapa global de uso del suelo y cobertura del suelo y se reclasificaron de un total original de 10 clases a 5 clases finales (Karra et al, 2021).
- Para la determinación de las temperaturas medias, máximas y mínimas, diurnas y nocturnas dentro de la zona de estudio, se seleccionaron las bandas “*LST_Day_1km*” y “*LST_Night_1km*” de un total de 366 imágenes MODIS, correspondientes al año 2020. Para su adquisición, procesamiento, análisis espacial y álgebra de mapas a nivel de píxel se utilizó la plataforma Google Earth Engine. Para reducir los errores derivados de las lecturas equívocas o falsos positivos, se filtraron las imágenes mediante las bandas “*QC_Day*” y “*QC_Night*”, conservando los píxeles que coinciden con los siguientes valores: Bits 0-1 = 0 y 1, y Bits 2-3 = 0.

Etapa 3: Identificación y estimación de la intensidad de las islas de calor.

- Para estimar la distribución espacial y temporal de las temperaturas diarias y mensuales dentro de la zona de estudio, se promediaron los

valores extraídos desde los subconjuntos de imágenes correspondientes (según fuera el caso). Con ello, fue posible identificar las áreas que presentan las diferencias térmicas mayores y se localizaron aquellas donde la intensidad de la isla de calor resulta significativamente mayor.

- Para estimar la intensidad de la isla de calor y comparar las variaciones térmicas diurnas y nocturnas entre las zonas urbanas (U) y rurales (R), se definieron diez puntos de monitoreo aleatoriamente, distribuidos en partes iguales, cinco dentro de las áreas urbanizadas y cinco en áreas con vegetación de tipo selva en la periferia de la zona urbana. A través de los puntos de monitoreo se extrajo la información de la TST de la colección de imágenes seleccionadas a nivel de píxel.
- Las temperaturas diarias se estimaron a partir del promedio de las temperaturas diurnas y nocturnas; por otro lado, los valores diurnos y nocturnos se procesaron directamente a partir de los datos extraídos de la banda correspondiente.
- La estimación de la intensidad de la isla de calor urbano superficial (ICUS) se realizó comparando las temperaturas promedio en el periodo enero-diciembre de 2020, a partir de los datos extraídos de los puntos de monitoreo localizados en las zonas urbanas y rurales, aplicando la ecuación propuesta por (Oke, 2002): $IIC = Tau - Tar$, donde: IIC = Intensidad de la Isla de Calor, Tau = Temperatura del aire urbano, y Tar = Temperatura del aire rural.

3 RESULTADOS

De acuerdo con los datos analizados para el año 2020, la superficie construida de la ciudad de Playa del Carmen es de aproximadamente 5,798 ha. Dentro de la traza urbana de la ciudad las áreas construidas representan alrededor del 75 % de la superficie, seguido por las áreas de vegetación, las cuales ocupan alrededor del 23 %. Los usos de suelo y vegetación y la configuración geométrica de la ciudad se aprecian en la Figura 3. En la misma figura se presenta la distribución y localización de los puntos de monitoreo utilizados para el cálculo de la isla de calor superficial.

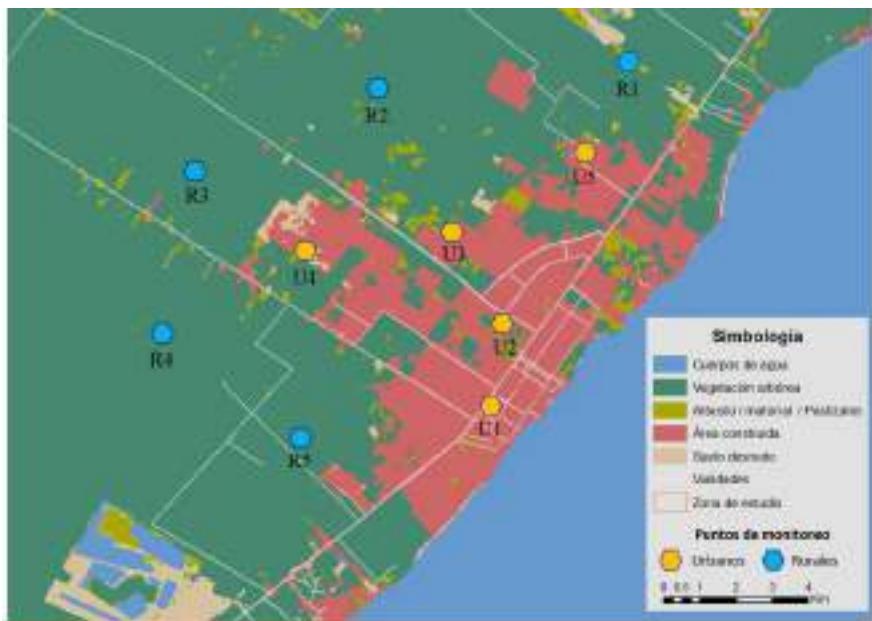


Figura 3. Usos de suelo y cubierta vegetal en la ciudad de Playa del Carmen, colindancias y puntos de monitoreo de la temperatura para este estudio.

3.1 Densidad de población

De acuerdo con los datos de población del censo 2020, para la ciudad de Playa del Carmen se reporta una población de 304,938 habitantes (INEGI, 2021a) distribuidos en 43.81 km² (4,380.58 ha) (INEGI, 2021b) de las 5,797.52 ha que conforman la zona urbana acorde a lo estimado a partir de la capa de usos de suelo (Karra et al, 2021). Las diferencias en cuanto a la superficie habitada con la superficie reportada como área construida se deben a que, al correlacionar la información del censo de población con el marco geoestadístico, existen manzanas que no reportan datos de población. La densidad de población promedio estimada para la zona urbana de Playa del Carmen es de 6,961 hab/km².

Para la representación espacial de la densidad de población por manzanas, se establecieron cinco categorías en función de la desviación estándar con respecto al total de habitantes y número de manzanas reportadas por el censo de población 2020. Las mayores densidades se presentan al noroeste de la ciudad, donde se localiza el fraccionamiento Villas del Sol; al norte, en el fraccionamiento La Guadalupana; y en la colonia Colosio, ubicada al noreste del núcleo antiguo de la ciudad (Figura 4). Las tres zonas se destacan por una incipiente cobertura arbórea urbana, como se puede apreciar en las fotografías de la Figura 5.

Dado que las zonas donde se distribuyeron los puntos de monitoreo denominados como “rurales” corresponden a zonas de vegetación de tipo selva tropical conservada (INEGI, 2015), en las cuales no hay asentamientos humanos ni reportes de número de habitantes de acuerdo a la información del censo de población 2020 (INEGI, 2021a), en el caso de la ciudad de Playa del Carmen no es posible realizar comparaciones tendientes a identificar la exposición de la población ante ambos escenarios (urbano y rural).



Figura 4. Densidad de población a nivel de manzanas en la ciudad de Playa del Carmen.



Figura 5. Panorámicas aéreas de Playa del Carmen. En la imagen superior se observa la zona centro de la ciudad y en la imagen inferior los nuevos desarrollos localizados al poniente de la ciudad (Villas del Sol).

Fotografías: Gabriel Sánchez-Rivera, mayo de 2018.

3.2 Islas de calor urbano

3.2.1 Variaciones térmicas a nivel de zona de estudio en el periodo 2020

La temperatura máxima diaria calculada durante el periodo de estudio alcanzó los 44.1 °C el 16 de abril de 2020 dentro de la zona urbana, mientras que las mínimas se registraron en las áreas rurales, siendo el valor más bajo del orden de 7.2 °C el 5 de diciembre de 2020. La diferencia entre la temperaturas máximas y mínimas diarias registradas dentro de la zona de estudio, considerando el periodo enero-diciembre de 2020, fue de 36.9 °C.

Al observar los mapas de temperatura de la Figura 6 se pueden apreciar patrones de distribución espacial de los cambios térmicos entre las zonas

urbanas y rurales en tres variables: promedios diarios, diurnos y nocturnos. En el caso de los valores diurnos, se distingue un acentuado gradiente descendente desde el centro de la traza urbana hacia la periferia; en contraste, en el caso de la temperatura nocturna, el mismo gradiente tiende a disminuir significativamente su pendiente, lo que se traduce en valores térmicos muy cercanos entre la zona centro de la ciudad y la periferia (zona de vegetación conservada). Los valores promedio anuales para cada caso se muestran en la Tabla 1.

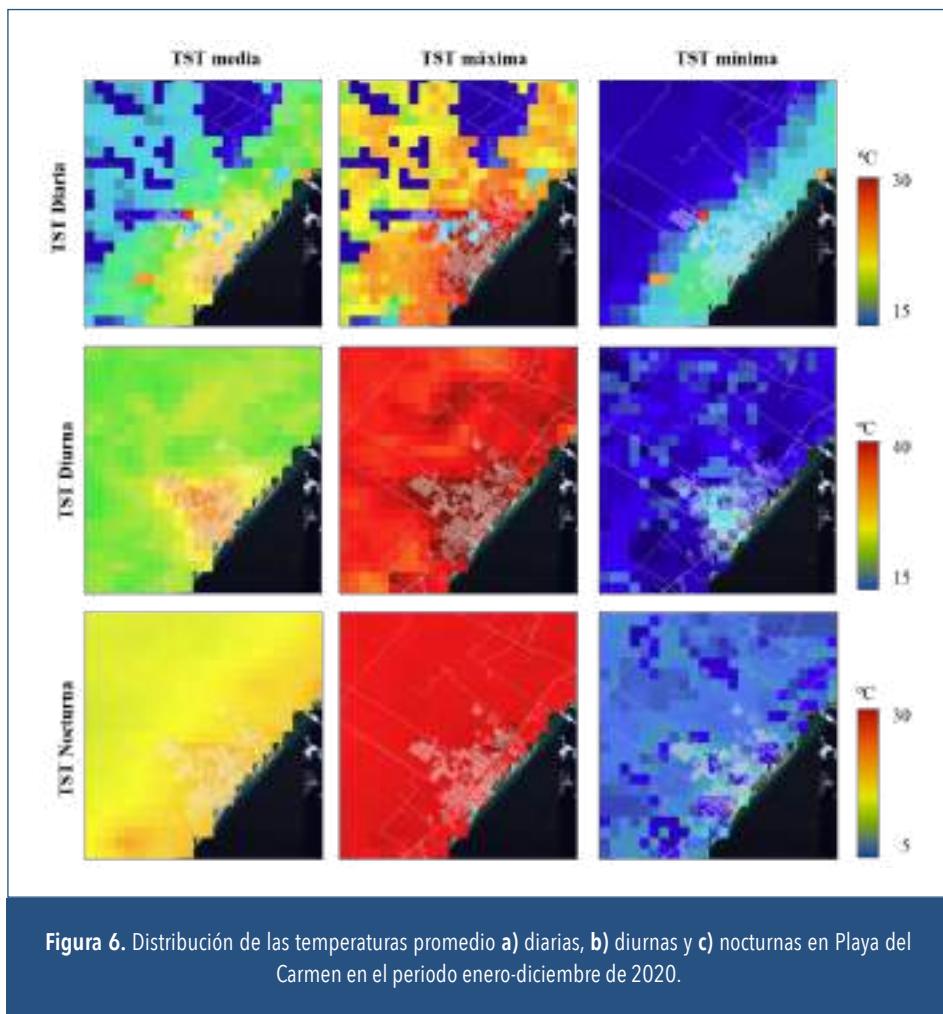


Figura 6. Distribución de las temperaturas promedio **a)** diarias, **b)** diurnas y **c)** nocturnas en Playa del Carmen en el periodo enero-diciembre de 2020.

TABLA 1. VALORES PROMEDIO DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE (TST) PARA LA ZONA DE ESTUDIO

TST [°C]	Diaria	Diurna	Nocturna
Media	25.6	28.4	28.4
Máxima	25.6	28.4	31.1
Mínima	25.6	28.4	18.3
Diferencia Máx.-Mín.	12.0	8.8	4.8

Se identificó la distribución estacional de los valores de la temperatura promedio para los períodos diurnos y nocturnos. Los meses de junio y octubre se destacaron por un descenso de las temperaturas como resultado del impacto de los ciclones tropicales que cruzaron la península de Yucatán durante la temporada de huracanes 2020 (Figura 7a). Con respecto a la relación entre las temperaturas diurnas y nocturnas, el análisis del diagrama de dispersión muestra que no existe significancia estadística

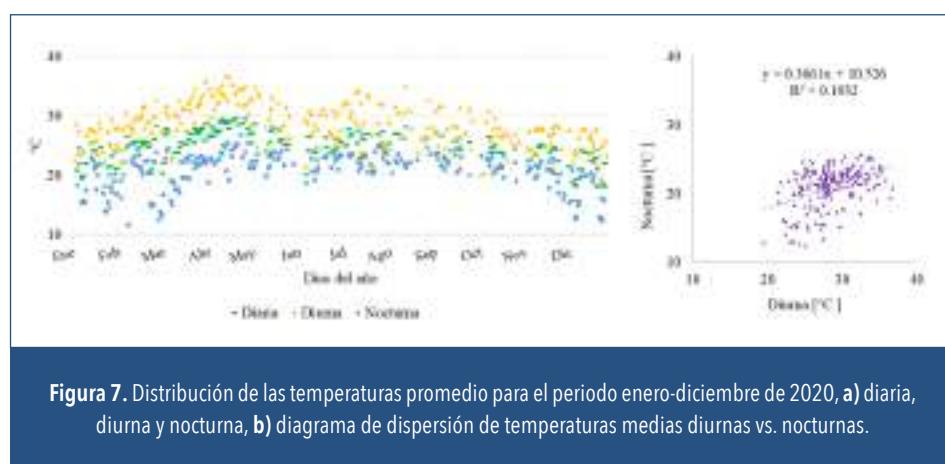


Figura 7. Distribución de las temperaturas promedio para el periodo enero-diciembre de 2020, **a)** diaria, diurna y nocturna, **b)** diagrama de dispersión de temperaturas medias diurnas vs. nocturnas.

dado que el valor R^2 de la regresión lineal devolvió un valor de 0.19. Esto sugiere que la relación de los cambios térmicos entre el día y la noche no es homogénea dentro de la zona de estudio, sino que dichos cambios están en función de los usos de suelo y su cercanía a la costa (Figura 7b). La falta de datos en los meses de junio, septiembre y octubre se relaciona con la presencia de los ciclones *Cristóbal* (mayo 28 a junio 10), *Gamma* (septiembre 30 a octubre 6), *Delta* (octubre 2 a 12) y *Zeta* (octubre 20 a 29) (IBTrACS, 2020).

3.2.2 Variaciones térmicas por punto de monitoreo

Con relación a las variaciones de los valores de temperatura de los puntos de monitoreo, se observó que, para el caso de los ubicados en zonas urbanas, las temperaturas diurnas fueron significativamente superiores a las de los puntos de monitoreo rurales. En el primer caso las diferencias promedio oscilaron en el orden de los 10 °C, mientras que en el segundo fueron de alrededor de los 7.8 °C. Las diferencias térmicas diurnas entre sitios de monitoreo se pueden asociar a la concentración de infraestructura urbana, es decir: los sitios más cercanos al centro fueron más calientes que aquellos que se encontraban fuera de la traza urbana (Figura 8). Por el contrario, en el caso de las temperaturas nocturnas, las diferencias de los valores entre sitios urbanos y rurales es menor (1 °C). Además, el comportamiento de las variaciones térmicas interanuales entre los puntos urbanos y rurales es menor comparado con los datos diurnos (Figura 8). Los valores más altos se observaron en abril. Los puntos de monitoreo urbano alcanzaron valores promedio de 38 °C y máximos por encima de los 43 °C, mientras que los sitios rurales alcanzaron los 30 °C promedio y máximos de 37 °C (Tabla 2). Para el caso de las temperaturas nocturnas, el mes más frío fue diciembre, con 7 °C en los sitios urbanos y 9 °C en zonas rurales (Tabla 2).

En el caso de las temperaturas nocturnas, el mes más cálido es abril, donde, tanto en los puntos urbanos como en los rurales, las temperaturas máximas oscilaron en torno a los 27 °C. El mes más frío durante las noches es diciembre, con 9 °C en las zonas rurales, mientras que en las áreas urbanas alcanza los 7 °C (Tabla 2).

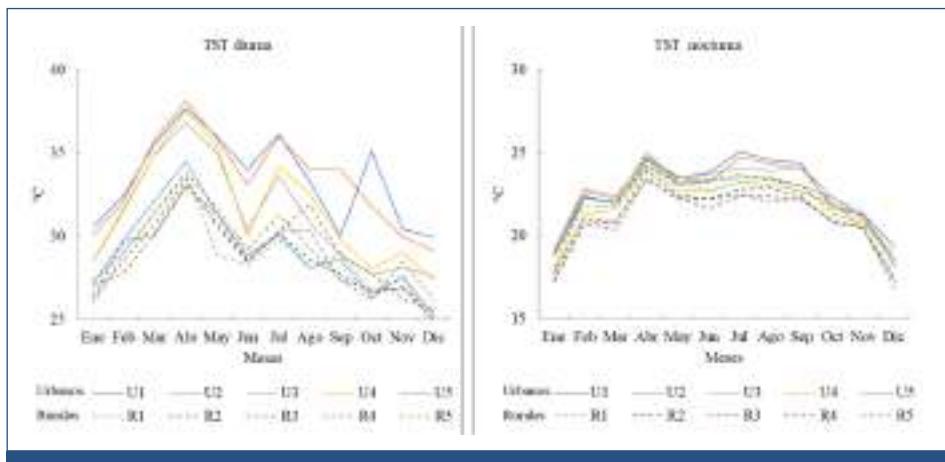


Figura 8. Distribución de las temperaturas promedio mensuales por punto de monitoreo, a) diurnas y b) nocturnas. Donde: TST = temperatura de la superficie terrestre.

TABLA 2. TEMPERATURA SUPERFICIAL TERRESTRE POR PUNTO DE MONITOREO

			Punto de monitoreo									
			U1	U2	U3	U4	U5	R1	R2	R3	R4	R5
Temperatura	Coordenadas	X	-87.08	-87.08	-87.09	-87.12	-87.06	-87.04	-87.11	-87.15	-87.16	-87.12
		Y	20.63	20.65	20.67	20.67	20.69	20.71	20.70	20.68	20.65	20.62
	Diaria	Media	26.1	25.2	24.8	22.8	23.7	23.3	21.8	20.3	21.3	24.1
		Máxima	31.2	29.8	29.0	27.2	27.2	26.8	26.3	24.5	25.7	26.7
		Mínima	21.0	20.7	20.6	18.5	20.3	19.8	17.4	16.1	16.9	21.4
	Diurna	Media	33.6	33.7	32.0	32.3	29.5	29.0	28.9	28.9	29.1	29.7
		Máxima	43.4	42.3	40.8	41.8	38.4	36.8	35.6	36.2	36.6	36.1
		Mínima	8.3	25.4	18.9	22.7	16.7	16.2	18.9	20.4	20.6	17.4
	Nocturna	Media	22.6	22.6	22.4	21.7	22.1	21.8	21.1	20.9	20.9	22.0
		Máxima	26.7	27.1	27.3	26.9	27.1	27.0	27.0	26.8	26.8	27.1
		Mínima	11.0	7.3	13.1	12.8	12.4	12.0	12.0	12.8	9.2	12.5

Nota: Se resaltan en rojo las máximas temperaturas registradas durante el periodo enero-diciembre de 2020.

Los resultados de la estadística básica calculada para cada uno de los puntos de monitoreo (urbano y rural) se presentan en la Tabla 2. En esta se destaca que las mayores temperaturas diurnas corresponden al punto U1, el cual se localiza en la zona centro histórica de la ciudad de Playa del Carmen. En contraparte, los menores valores diurnos urbanos se registran en el punto U4, en los límites del fraccionamiento Villas del Sol y la zona de vegetación de tipo selva de la periferia de la zona urbana. Esto sugiere que la interacción con las zonas de vegetación próximas podría tener influencia en la regulación de la temperatura de las áreas colindantes con el borde limítrofe del fraccionamiento.

En la Figura 9 se presenta el comportamiento y distribución de los valores de temperatura urbanos y rurales.

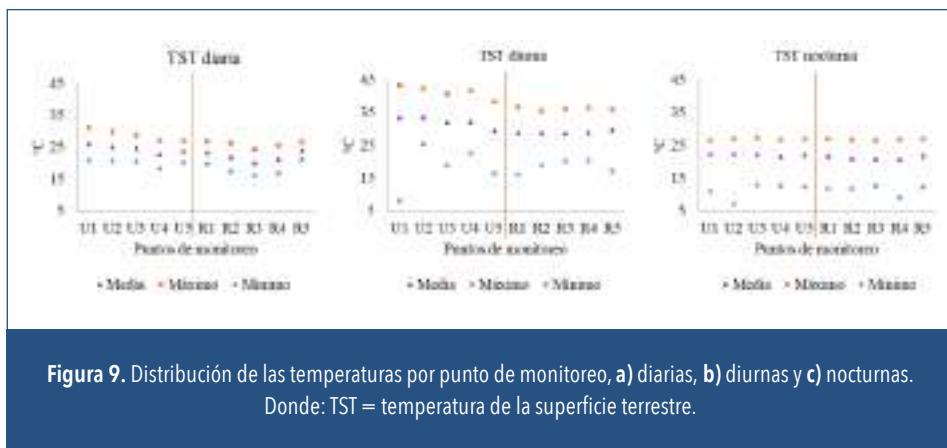


Figura 9. Distribución de las temperaturas por punto de monitoreo, a) diarias, b) diurnas y c) nocturnas.
Donde: TST = temperatura de la superficie terrestre.

3.2.3 Intensidad de las islas de calor urbano (IICU)

Para identificar la ocurrencia del fenómeno de ICU dentro de la zona de estudio, se estimó la IIC en una escala temporal mensual tomando como base los promedios de los puntos de monitoreo urbanos y rurales. Los resultados obtenidos muestran que el fenómeno se presenta principalmente durante el día y con mayor intensidad durante las temporadas de primavera y verano, ligeramente atenuado ante la presencia de ciclones tropicales, como fue el caso de los huracanes que impactaron el estado de Quintana Roo en los meses de junio, agosto y septiembre (Figura 10).

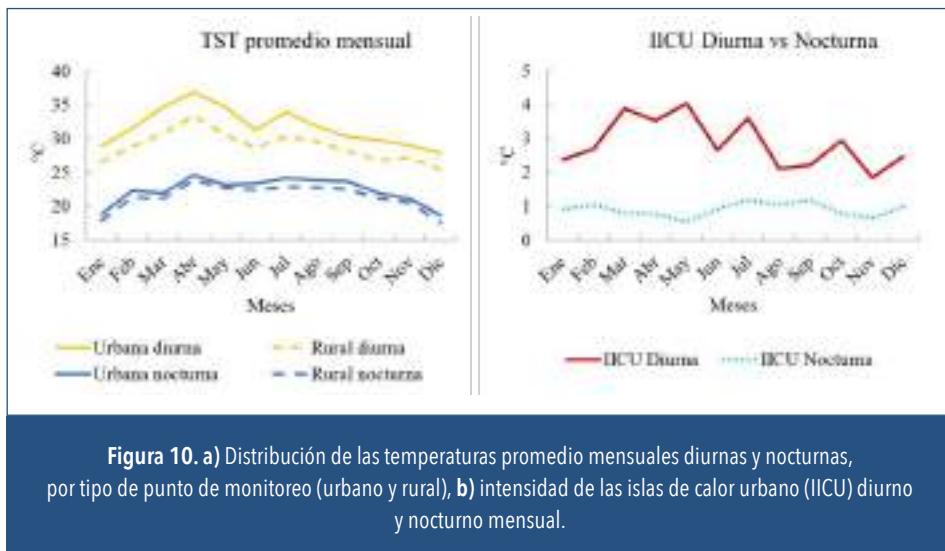


Figura 10. a) Distribución de las temperaturas promedio mensuales diurnas y nocturnas, por tipo de punto de monitoreo (urbano y rural), b) intensidad de las islas de calor urbano (IICU) diurno y nocturno mensual.

Lo anterior se puede observar en los resultados de la Tabla 3, en la cual se presentan los valores promedio mensuales diurnos y nocturnos, por punto de monitoreo, así como la IICU mensual en términos de la diferencia entre los valores urbanos y rurales, destacando los meses de marzo a julio con cifras de entre 3.5 y 4 °C, con excepción del mes de junio, donde la diferencia rondó valores aproximados a 2.7 °C, lo cual se relaciona con la presencia de la tormenta tropical *Cristóbal*.

4 DISCUSIÓN

Si bien los resultados de la estimación de la IICU no pueden ser considerados como definitivos ni concluyentes debido a la variabilidad de los datos derivados a partir de dos bandas distintas de los productos LST MODIS (diurnas y nocturnas), las cuales ofrecen una precisión igual o menor a 1 K (Zhengming Wan, 2008), se identificó que los valores de temperatura promedio obtenidos a través del análisis de las imágenes MODIS a nivel de píxel para el año 2020 son coincidentes con los publicados por la estación “23163-Playa del Carmen” de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la cual re-

TABLA 3. ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LAS ISLAS DE CALOR DIURNAS Y NOCTURNAS A NIVEL MENSUAL

Mes	Diurno		IICU diurna	Nocturno		IICU nocturna
	Urbano	Rural		Urbano	Rural	
Enero	29.0	26.6	2.4	18.8	17.9	0.9
Febrero	31.5	28.8	2.7	22.3	21.3	1.0
Marzo	34.7	30.8	3.9	22.0	21.2	0.8
Abril	36.9	33.4	3.5	24.6	23.9	0.8
Mayo	34.7	30.7	4.0	23.2	22.7	0.5
Junio	31.3	28.6	2.7	23.4	22.4	0.9
Julio	34.0	30.4	3.6	24.1	22.9	1.2
Agosto	31.8	29.7	2.1	23.9	22.8	1.1
Septiembre	30.3	28.1	2.2	23.7	22.5	1.2
Octubre	29.8	26.8	3.0	22.0	21.2	0.8
Noviembre	29.0	27.2	1.8	21.1	20.5	0.6
Diciembre	27.9	25.4	2.5	18.6	17.6	1.0
Promedio	31.7	28.9	2.9	22.3	21.4	0.9

porta valores mínimos y máximos promedio para el periodo 1998-2018 del orden de los 13.5 y 30.8 °C respectivamente, con valores máximos registrados de 40 °C en el mes de mayo de 2005 (SMN, 2020). Los datos analizados en el presente estudio para el año 2020 alcanzaron valores promedio mínimos de 19.3 °C y máximos de 31.3 °C, con una máxima de 44.1 °C el 16 de abril.

Los hallazgos de la investigación muestran diferencias significativas en las tasas de cambio térmico entre las zonas densamente urbanizadas y con escasa vegetación, y aquellas localizadas hacia la periferia de la ciudad. Por su parte, las zonas urbanas presentan una amplia dispersión de

la temperatura diurna vs. nocturna, del orden de hasta 10 °C en promedio (32 °C diurna a 22 °C nocturna en promedio), lo cual se puede deber a la configuración de los fraccionamientos y su cercanía con los límites de la traza urbana.

La diferencia de temperatura relativa en las estaciones urbanas con respecto a su cercanía con los límites periféricos de la ciudad donde existe la presencia de selvas conservadas y las diferencias de cobertura arbórea urbana tienden a anular los efectos de las construcciones y la impermeabilización del suelo, como lo reportan en sus estudios Stewart et al. (2014).

Se identificó la presencia del fenómeno de la ICUS únicamente durante el día, no así durante la noche, cuando las temperaturas de las zonas urbanas y rurales tienden a descender de manera homogénea, presentando valores de IICU de alrededor de 1 °C. Esto puede deberse a la influencia de los vientos provenientes desde el océano hacia tierra adentro, lo que resulta coincidente con los resultados de los estudios realizados por Salvati et al. (2017) y Saaroni et al. (2000), quienes identifican que el efecto de la brisa marina tiende a disminuir las amplitudes térmicas ($T_{max} - T_{min}$).

La IIC promedio se estimó en 2.9 °C, con un máximo en el mes de mayo de 4.1 °C. Los meses de las temporadas primavera y verano presentaron los mayores valores de intensidad.

Si bien no se localizaron estudios en ciudades costeras similares a Playa del Carmen en la península de Yucatán, nuestros hallazgos resultan congruentes con los reportados por diversos investigadores, considerando las características propias de cada una de las ciudades analizadas. Ejemplo de tales estudios son los realizados por Soto-Estrada (2019) en la ciudad de Medellín, Colombia, quien reporta valores de IIC entre 3.41 y 6.23 °C; Alomar Garau y Llop Garau (2018) para la ciudad de Palma, Mallorca, con IIC en el orden de 1.4 y 5.8 °C; y Contreras Cardosa et al. (2015), con valores de IIC diurnos promedio de 6 °C para Ciudad Juárez, Chihuahua.

Dentro de la ciudad de Playa del Carmen, las zonas donde se presentan las mayores temperaturas diurnas corresponden al centro de la ciudad (la cual se encuentra lejana a los límites de la traza urbana), así como a los nuevos fraccionamientos que se han construido hacia la zona poniente de la ciudad, los cuales cuentan con escasas o nulas superficies

de vegetación nativa, y donde el arbolado urbano resulta incipiente para las extensiones de los desarrollos y la densidad de población proyectada. Lo anterior resulta congruente con lo reportado en el estudio del arbolado urbano de Playa del Carmen, en el que se indica que la ciudad cuenta con una superficie total de arbolado competitiva (De la Concha y Reynoso, 2017), aunque dispuesta en fracciones en promedio pequeñas y mal distribuidas, mayormente presentes en los Ejidos Norte y Sur, por lo que la superficie de arbolado conservado se encuentra en riesgo debido al creciente desarrollo de unidades y fraccionamientos habitacionales. Los mayores valores de IIC diurna se observan en las zonas habitacionales de interés social y de menores recursos, que se destacan también por presentar la mayor densidad de población y pocas áreas de arbolado urbano y parques públicos.

Las políticas públicas en Playa del Carmen se han enfocado en el crecimiento económico, provocando desaciertos importantes en el tejido urbano como consecuencia de la falta de planeación en el crecimiento urbano y turístico. Los hallazgos en la configuración urbana actual, resultado del estudio, demandan la renovación de las políticas de construcción con una mayor sensibilidad ambiental y revalorización del patrimonio natural para mejorar su calidad y procurar mayor bienestar social, con visión a largo plazo. En contraparte, la comunidad local ha centrado su atención en las consecuencias negativas de las deforestaciones y ha impulsado valiosas iniciativas ciudadanas, entre las que destacan el Museo Vivo de Árboles Nativos Antiguos Urbanos “Raíz Nativa”, la campaña “Sembrando huellas de vida” y la Red de Ayuda por los Árboles, lideradas por la asociación civil Moce Yax Cuxtal (MYC, 2021). Ante este panorama, se requiere la construcción de una estrategia conjunta y sostenida, gobierno-comunidad, para la planificación territorial urbana y la conservación y restauración ecológica de la ciudad, que garantice incrementar la resiliencia local mediante la integración del enfoque de Adaptación Basada en Ecosistemas ante el cambio climático con la participación social. Si estos esfuerzos se conjuntan, se pueden encontrar las medidas de mitigación pertinentes, que garanticen el bienestar y calidad ambiental de la ciudad, en beneficio de sus habitantes y del turismo del cual depende en gran medida la economía de la región.

Dados los resultados del estudio, es imperante promover modificaciones en el reglamento de construcción y el programa de desarrollo urbano y medioambiental de la ciudad, los cuales tengan como objetivos: a) el aumento de las áreas verdes dentro de los fraccionamientos, en función de las características climáticas, de forma tal que permitan un control natural del intercambio térmico de los nuevos desarrollos; b) el diseño y puesta en marcha de programas de conservación, protección y restauración del arbolado urbano, particularmente en las colonias que presentan las máximas diferencias térmicas y que se asocian al fenómeno de islas de calor, así como; c) el diseño y puesta en marcha de programas para la plantación de arbolado urbano en áreas descubiertas y en zonas de estacionamientos, considerando la introducción de especies endémicas de la región, y d) estrategias de arborización y restauración ecológica que garanticen la conectividad estructural y funcional por medio de corredores biológicos y aportes a la biodiversidad, contribuyendo principalmente al mejoramiento de la calidad ambiental del entorno urbano y por ende de sus habitantes (Pérez de la Fuente y Moce Yac Cuxtal, 2021).

5 CONCLUSIONES

Mediante la metodología implementada en el presente estudio fue posible identificar la ocurrencia del fenómeno de ICUS y estimar la IIC utilizando 366 imágenes satelitales correspondientes al año 2020, dentro de la zona urbana de la ciudad de Playa del Carmen. La plataforma Google Earth Engine resultó una herramienta útil y eficaz para llevar a cabo estudios de carácter regional y local que requieren del análisis de grandes volúmenes de imágenes satelitales y la implementación de modelos robustos de análisis espacial a través de la generación de algoritmos basados en los lenguajes computacionales Java Script y Phyton, ofreciendo tiempos de proceso muy por debajo de los que se requerirían utilizando equipos de cómputo domésticos.

La ICU encuentra coincidencia espacial con las áreas más densamente pobladas, de tal forma que esta se configura a partir de tres vértices principales ubicados en los fraccionamientos Villas del Sol, Guadalupana

y la colonia Colosio (Figura 4). La IIC máxima se presenta en el mes de mayo, con valores del orden de los 4 °C en horarios diurnos, mientras que en los horarios nocturnos se registró una variación máxima aproximada de 1.2 °C en el mes de julio. Se identificó que las diferencias entre los valores promedio de temperatura diurnos y nocturnos en los puntos de monitoreo tuvieron una mayor oscilación en las zonas urbanas con respecto de las zonas periféricas con vegetación conservada (12.7 °C y 9.6 °C, respectivamente).

La tendencia de los procesos de deforestación y de cambio en la cobertura y uso del suelo en Playa del Carmen presenta un panorama poco alentador. La continua fragmentación de hábitats, y la pérdida y degradación de la vegetación natural desencadenan efectos negativos sobre los sistemas socioecológicos difíciles de revertir, comprometiéndose los servicios ecosistémicos de los cuales depende la población de la región. Los esfuerzos para enverdecer la ciudad están presentes en informes gubernamentales, sin embargo, no se orientan a alcanzar en un mediano o largo plazo un determinado aumento de la cobertura del dosel arbóreo o “bosque urbano”. Para ello es necesario proveer de información y herramientas para la gestión a los tomadores de decisiones y a los encargados de implementar las políticas públicas ambientales y urbanas.

Este estudio provee información útil para definir áreas de atención prioritaria en las cuales se puedan implementar estrategias de mitigación y adaptación que permitan contrarrestar los efectos de las islas de calor, como monitoreo *in situ* de las condiciones climáticas locales, considerando particularmente parámetros como la dirección y velocidad de los vientos, así como el registro en tierra de las temperaturas diurnas y nocturnas. Es recomendable analizar, además de las temperaturas, los valores de velocidad y dirección del viento para identificar la circulación local de las zonas costeras y su potencial para el amortiguamiento de la isla de calor. Además, es necesario implementar un programa de monitoreo continuo *in situ* a través de la instalación de instrumentos de medición de las condiciones del tiempo atmosférico, ubicados en las colonias que presentaron condiciones para ser consideradas como zonas de atención prioritaria.

AGRADECIMIENTOS

Gabriel Sánchez Rivera agradece el apoyo a la División de Desarrollo Sostenible de la Universidad de Quintana Roo y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (antes CONACYT) por la Beca Conacyt (721994) para realizar los estudios doctorales en Desarrollo Sostenible en la Unidad Académica de Cozumel.

REFERENCIAS

- Alomar Garau, G. & Llop Garau, J. (2018). La isla de calor urbana de Palma (Mallorca, Islas Baleares): avance para el estudio del clima urbano en una ciudad litoral mediterránea. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 392-418.
- Buyadi, S., Wan Mohd, W. & Misni, A. (2014). Quantifying Green Space Cooling Effects on the Urban Microclimate using Remote Sensing and GIS Techniques. *FIG Congress 2014, Engaging the Challenges, Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Casadei, P., Semmartin, M. & Garbulsky, M. F. (2021). Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina. *Ecología Austral*, 31(1), 190-203.
- Contreras Cardosa, A., Salas Plata Mendoza, J. A., Velásquez Angulo, G. & Quevedo Urías, H. (2015). Determinación de la isla de calor urbano en Ciudad Juárez mediante programa de cómputo. *Cultura Científica y Tecnológica*, 26.
- De la Concha, H. & Reynoso, R. (2017). Resultados del inventario urbano de Playa del Carmen, Q. Roo realizado de noviembre 2016 a abril 2017.
- Doick, K. & Hutchings, T. (2013). Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure. *Forest Research*, February.
- EPA (2008). Trees and Vegetation. En *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA (2014). *Keeping Your Cool: How Communities Can Reduce the Heat Island Effect*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- IBTrACS (2020). *Browse IBTrACS*.

- INEGI (2015). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1: 250,000: Serie V*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2021a). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2021b). *Marco Geoestadístico. Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jin, M., Dickinson, R. E. & Zhang, D. (2005). The Footprint of Urban Areas on Global Climate as Characterized by MODIS. *Journal of Climate*, 18(10), 1551-1565.
- Karra, K. et. al. (2021). *Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning. IGARSS 2021-2021*. IEEE - International Geoscience and Remote Sensing Symposium.
- Landsberg, H. E. (1981). *The Urban Climate*. Academic Press.
- Méndez, J., De Jesús, J. & González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65(900), 38-55.
- Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14(6), 705-710.
- MYC (2021). *Moce Yax Cuxtal A. C.*
- Ochoa Jiménez, C. F., Camacho Sanabria, J. M., Chávez Alvarado, R., Juan Pérez, J. I. & Fragoso Servón, P. (2020). Expansión urbana y cambios de cobertura/uso del suelo en Playa del Carmen, Quintana Roo, México (1985-2015). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 18, 1-18.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769-779.
- Oke, T. R. (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. En Cermak, J. E. et al., *Wind Climate in Cities*. Springer Netherlands, pp. 81-107.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates* (2^a ed.). Routledge.
- Orellana, R. (1999). Climatología de la Península de Yucatán 1961-1993. En A. C. A. García de Fuentes & U. d.-C. Facultad de Arquitectura (eds.), *Atlas de procesos Territoriales de Yucatán*. CONACYT, pp. 163-192.
- Orellana, R., Espadas-Manrique, C., Conde, C. & Gay-García, C. (2009). *Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán*.
- Paravantis, J., Santamouris, M., Cartalis, C., Efthymiou, C. & Kontoulis, N. (2017). Mortality Associated with High Ambient Temperatures, Heatwaves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece. *Sustainability*, 9(4), 606.

- Pereira-Corona, A., Fragoso-Servón, P. & Frausto Martínez, O. (2016). Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México. *GEOS*, 36(2), 275–290.
- Pérez de la Fuente, G., Hoil Villalobos, D. L. & Moce Yac Cuxtal. (2021). *Estrategia de arborización y restauración ecológica frente a impactos de desarrollos habitacionales en la Ciudad Playa del Carmen, Solidaridad, Quintana Roo, México*.
- PNUMA, H. Ayuntamiento del Municipio de Solidaridad & Planeta Limpio, A. C. (2008). *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Playa del Carmen*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Qaid, A., Bin Lamit, H., Ossen, D. R. & Raja Shahminan, R. N. (2016). Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, 133, 577-595.
- Romero, H. & Sarricolea, P. (2006). Patrones y factores de crecimiento espacial de la ciudad de Santiago de Chile y sus efectos en la generación de islas de calor urbanas de superficie. En *Clima, Sociedad y Medio Ambiente*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (Serie A Nº 5).
- Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A. & Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 1-18.
- Salvati, A., Coch Roura, H. & Cecere, C. (2017). Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. *Energy and Buildings*, 146, 38-54.
- SMN (2020). *Normales Climatológicas por Estado*. Servicio Meteorológico Nacional.
- SMN (2021). *Reporte del clima en México. Reporte anual 2020*. CONAGUA / Servicio Meteorológico Nacional.
- Soto-Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 421-434.
- Stewart, I. D., Oke, T. R. & Krayenhoff, E. S. (2014). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062-1080.
- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Las regiones climáticas de México*. Instituto de Geografía, UNAM, col. Temas Selectos de Geografía de México (I.2.2).
- Voogt, J. & Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.
- Wan, Z. (1999). *MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document*.

- ment (LST ATBD). Versión 3.3.* Institute for Computational Earth System Science, University of California.
- Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 59-74.
- Wan, Z., Hook, S. & Hulley, G. (2015). *MYD11A1 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Wong, K. V., Paddon, A. & Jimenez, A. (2013). Review of World Urban Heat Islands: Many Linked to Increased Mortality. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(2), 1-12.

Efectos urbanos en la meteorología del Valle de Aburrá, Colombia: isla de calor en un terreno complejo y sus variaciones microclimáticas

Gisel Guzmán¹

¹ Arizona State University, Tempe, EE. UU. ORCID: 0000-0002-4953-8587. gguzma20@asu.edu.

RESUMEN

En este trabajo se analizan efectos urbanos en la meteorología del Valle de Aburrá (Colombia) a través de datos representativos de una escala climática local y micro. La complejidad del territorio hace que el esquema tradicional de estudio del efecto isla de calor resulte inapropiado, por lo que este se analiza a través de cambios en el gradiente de temperatura con la elevación. Adicionalmente, se investigan variaciones de microclima en el dosel urbano considerando dos fuentes de datos: la primera con una red de sensores que permite un análisis a diferentes rangos de elevación dentro del Valle, y la segunda para cuantificar la diferencia de microclimas entre sitios con elevaciones similares. Los resultados indican que la elevación sobre el nivel del mar determina los tipos de climas que se encuentran en el Valle. Sin embargo, la influencia de la urbanización es notable a través de una modificación del gradiente de temperatura en función del entorno de medición (tanto a escala local como micro). Las mediciones microclimáticas realizadas en elevaciones similares revelan diferencias en el comportamiento térmico (y posiblemente de exposición térmica) en función principalmente del acceso solar, debido a la geometría urbana y de la vegetación situada alrededor de los sensores. Estos resultados indican que la complejidad del Valle (tanto urbana como topográfica) puede ser incorporada como línea

base en procesos sensibles al clima, como por ejemplo el diseño de espacios interiores y exteriores energéticamente eficientes y seguros, que requieren no solo promedios mensuales, sino también en variaciones intradiurnas.

Palabras clave: efecto isla de calor, sobrecalentamiento urbano, microclima, terreno complejo, ciencia ciudadana, vegetación urbana, exposición térmica.

ABSTRACT

In this research, we analyze urban effects in the meteorology of the Aburrá Valley (Colombia) using representative data of a local and microclimatic scale. The complexity of the territory makes inappropriate the use of the traditional scheme for the study of urban heat island effect. Therefore, this effect is analyzed through changes in the temperature—altitude profile altitude (environmental lapse-rate). Microclimate variations in the urban canopy are quantified using two datasets. The first dataset allowed us to group microclimates analysis in different altitude ranges, and the second one to quantify microclimates differences between sites with similar altitudes. The results indicate that the elevation above sea level determines the climate types found in the Valley. However, the influence of urbanization is notable through a modification of the environmental lapse-rate depending on the measurement area of influence (both local and micro). Microclimatic measurements at similar heights display differences in the thermal environment (and possibly on thermal exposure) depending mainly on solar access, due to the urban geometry and vegetation located around the sensors. These results indicate that the complexity of the Aburrá Valley (both urban and topographic) can be as baseline in climate-sensitive processes, as the design of energy-efficient and safe indoor-outdoor spaces. This kind of process requires not only monthly averages, but also intra-day variations.

Keywords: Urban heat island effect, urban overheating, microclimate, complex terrain, citizen science, urban vegetation, thermal exposure.

1 INTRODUCCIÓN

La atmósfera urbana no es independiente de fenómenos de un contexto espacial y temporal mayor al tamaño de la ciudad, como procesos de la escala sinóptica y sistemas regionales o de mesoescala, o por la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Por ello es importante distinguir la influencia urbana de la no urbana en estudios de clima en ciudades, y para ello se emplea una modificación del marco conceptual de Lowry (Oke et al., 2017). Este marco indica que el valor medido de una variable meteorológica (como temperatura, humedad relativa o velocidad del viento, etc.) se asume conceptualmente como la suma lineal de tres contribuciones: un valor de fondo de la variable debido al macroclima de la región, una desviación dada por efectos climáticos locales o por el paisaje (por ejemplo, cuerpos de agua, sistemas montañosos) y por una desviación dada por efectos de actividades humanas, como, por ejemplo, la urbanización. El término “efectos urbanos” en esta investigación se refiere a las modificaciones en la meteorología/climatología atribuidos a cambios del balance energético en superficie causados por el reemplazo de superficies antes naturales. Es decir, cambios en la forma urbana (materiales, coberturas y estructura urbana) y no de función urbana (emisiones de calor por actividades antrópicas), siguiendo los conceptos de Oke et al. (2017).

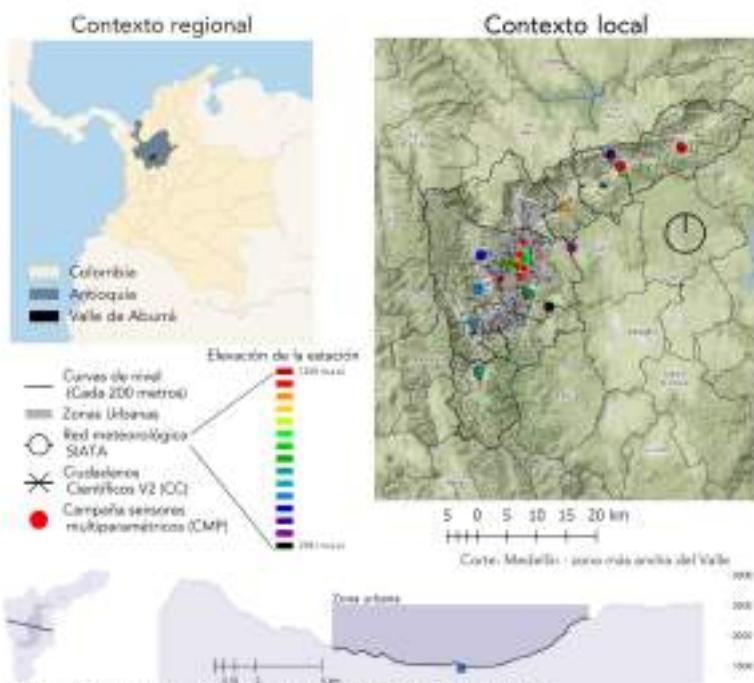
La influencia urbana en el clima también tiene su expresión en diferentes escalas espaciales, siendo el efecto urbano más estudiado el efecto isla de calor (ICU), que se expresa como el aumento de la temperatura en las ciudades frente a zonas rurales. Este calentamiento no es homogéneo al interior de las ciudades, ya que el gradiente ciudad-campo se ve interrumpido por puntos fríos y calientes localizados en áreas de densidad urbana alta o baja (Nazarian et al., 2022; Oke, 1982; Stewart & Oke, 2012). Específicamente en el dosel urbano —la porción de atmósfera que va desde el suelo hasta el tope de las edificaciones— se establecen microclimas diferentes debido a la heterogeneidad de los elementos urbanos, con un régimen de viento y balance energético que son determinados por la naturaleza física del entorno inmediato (Nazarian et al., 2022; Oke et al., 2017).

En ciudades situadas en terrenos complejos las diferencias de elevación interponen un gradiente natural de temperatura, por ende, el enfoque tradicional de comparar directamente estaciones rurales y urbanas en estudios del efecto ICU no es apropiado. Ante la falta de mediciones periurbanas para cuantificar el cambio por la urbe según lo establecido en Lowry (1997), lo anterior ha hecho necesario que se busquen enfoques alternos para su estudio, como en Saaroni & Ziv (2010). Cabe mencionar que la estimación de la intensidad del efecto ICU como métrica ha sido ampliamente debatida en los últimos años por la falta de mediciones periurbanas, la definición de qué se considera rural, así como la utilidad de la métrica misma (Martilli et al., 2020).

En este trabajo se analizan los efectos urbanos en el ambiente térmico del Valle de Aburrá a través del análisis de datos representativos de una escala climática local y microclimática, con énfasis en el dosel urbano como nivel de estadía de la población. Esta investigación aborda el problema desde un enfoque con alcance regional —con datos distribuidos en distintas cotas de elevación por todo el Valle— que permite analizar la meteorología en el territorio con su complejidad, para luego pasar al análisis de casos particulares de microclima bajo diferentes configuraciones urbanas.

2 ZONA DE ESTUDIO

El Valle de Aburrá es un cañón estrecho localizado sobre los Andes tropicales al noroccidente de Colombia (7°N) con áreas urbanas entre los 1300 y 2000 m.s.n.m., y hogar de aproximadamente 3.9 millones de personas, de las cuales un 90 % vive en zonas urbanas. Diversos trabajos han abordado aspectos de la meteorología del Valle y de su ciudad principal, Medellín, en función de sus características topográficas y urbanas (Guzmán Echavarría, 2018; Herrera, 2019; Martínez, 2017). En Guzmán Echavarría (2018) se abordaron diferentes efectos urbanos en la meteorología del Valle, a nivel de superficie y del dosel urbano, usando observaciones *in situ* y de teledetección. En el caso particular del análisis del efecto ICU en superficie con datos satelitales se encontraron diferencias térmicas a nivel intraurbano, independientes a la elevación y orientación de las superficies, de acuerdo



Exposición de los instrumentos de medición empleados:

Parte 1) Alcance regional – escala local: Red meteorológica de SIATA



Parte 2) Alcance regional – microescala: Ciudadanos Científicos V2



Parte 3) Casos de estudio – microescala:



Figura 1. Arriba: localización del Valle de Aburrá y de las redes de medición empleadas en este estudio.

En medio: perfil topográfico de la zona más ancha del Valle de Aburrá. Abajo: emplazamiento y exposición de los sensores.

con el tipo de forma urbana y la densidad de vegetación. Por lo anterior, es de esperar que datos tomados en el dosel urbano expresen la misma señal.

3 DATOS Y MÉTODOS

El Valle de Aburrá es un caso especial de estudio, dada la alta densidad y diversidad de instrumentación meteorológica que posee y su ubicación tropical. Todos los datos empleados en este trabajo provienen del proyecto de ciencia y tecnología Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá-SIATA (<https://siata.gov.co/>). SIATA es una estrategia regional para la gestión del riesgo, que a través del monitoreo ambiental del territorio busca fortalecer la toma de decisiones con cuatro pilares fundamentales: el monitoreo ambiental, alertas y gestión, modelación, y comunicación y educación.

El análisis de datos de este trabajo se divide por la escala climática de los datos analizados (escala local y microescala) y la distribución espacial de los sensores (alcance regional cubriendo la cuenca del río Aburrá o casos de estudio). Se adoptan las escalas climáticas usadas en Oke et al. (2017) para describir las unidades morfológicas urbanas de barrio y cañón urbano.

Parte 1: Alcance regional, escala local (200 m-2 km): Efectos urbanos en el contexto térmico a escala local del Valle: Red de estaciones meteorológicas SIATA (análisis de temperatura y humedad).

Parte 2: Alcance regional, microescala (10 m-200 m): Meteorología en el dosel urbano: Proyecto Ciudadanos Científicos V2 (análisis de temperatura y humedad).

Parte 3: Casos de estudio, microescala (10 m-200 m): Meteorología en el dosel urbano: Campaña con sensores multiparamétricos (análisis de temperatura, humedad, viento y radiación).

En la Figura 1 se muestran los sensores empleados para medir temperatura para cada sección de este trabajo: Vaisala WXT520 (Parte 1), Davis Temperature/Humidity Sensor 6830 (Parte 2) y Thiess Clima sensor US (Parte 3). Estos sensores cumplen con los requerimientos de precisión para estudios de confort y estrés térmico de acuerdo con el estándar internacional ISO 7726:1998 (Johansson et al., 2014), ya que la precisión de estos sensores es $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ y cuentan con escudo contra la radiación. Por lo tanto, las varia-

nes en cada una de las fuentes de datos se atribuyen a la naturaleza del balance energético del entorno circundante (subcapa residual o dosel urbano).

3.1 Parte 1: Red de estaciones meteorológicas SIATA

En esta sección se analizaron los datos de quince estaciones con registros de más de cinco años (2013-2018), distribuidas entre 1335 y 2781 m.s.n.m. (Figura 1). Los emplazamientos de estas estaciones tienen un único sensor multiparamétrico (Vaisala WXT520), y están situados sobre torres en su mayoría —por encima del nivel de las edificaciones o el suelo— que varían en altura desde 3 a 12 m. Se considera que estas mediciones representan en mayor medida una influencia agregada de escala local, y en menor medida la influencia de elementos cercanos al emplazamiento de la estación. La excepción a lo anterior es la estación más alta de la red, situada en el altiplano de Santa Elena, que se ubica a 30 m del suelo, y que es representativa de la escala sinóptica. Los análisis de esta sección se enfocaron a:

- Describir la existencia de diferentes regímenes climáticos y la ocurrencia del efecto ICU desde una modificación en el gradiente altitudinal de temperatura y variaciones del estado termodinámico del aire usando diagramas psicrométricos.
- Establecer un estado de referencia de escala local para detectar diferencias respecto a mediciones microclimáticas en el dosel urbano.

El análisis de estos datos requirió una agregación temporal desde 1 minuto a escala horaria y diurna (mínimos, medios y máximos). Luego se obtuvieron regresiones lineales entre la elevación sobre el nivel del mar del sensor y los estadísticos diurnos y mensuales de temperatura, bajo los cuales se analizó el gradiente térmico.

Posteriormente, para obtener las categorías de la clasificación Köppen-Geiger en la región (Peel et al., 2007) se usaron datos de precipitación media mensual provenientes de radar meteorológico (Sepúlveda, 2015), y de temperatura media mensual obtenida a partir de los coeficientes de la regresión. Para esto se hizo uso de un modelo digital de elevación ALOS-1 PALSAR RTC remuestreado a 30 m (ASF DAAC, 2015).

Por último, e igual para las partes 2 y 3 de este trabajo, se emplearon diagramas psicrométricos para mostrar las desviaciones de condiciones

de confort (y por ende las implicaciones energéticas) del comportamiento medio de temperatura y humedad a lo largo del día y del año. Este tipo de diagramas permiten analizar el estado termodinámico de la mezcla de aire seco con vapor de agua, ya que en este se puede leer de manera simultánea la temperatura, humedad absoluta y relativa, y nivel de entalpía. Para las Figuras 6, 7 y 11 se grafica el ciclo diurno de temperatura y humedad con diagramas basados en las ecuaciones de ASHRAE (2009) empleando el paquete de Python 3: Psychrochart (Meyer & Thevenard, 2019). En estos diagramas, los movimientos horizontales paralelos a la abscisa (eje x) corresponden a cambios en el aire gracias a intercambios de calor sensible (y de temperatura), mientras que los movimientos verticales corresponden a cambios de calor latente (y de contenido de humedad en el aire). Para mayor detalle de la interpretación de estos diagramas se remite al lector a el capítulo cinco en Guzmán Echavarría (2018), Gatley (2013) y Lechner (2014).

3.2 Parte 2: Proyecto Ciudadanos Científicos V2

El proyecto Ciudadanos Científicos V2 es un proyecto de ciencia ciudadana de SIATA, el cual inició en 2015 con la implementación de cien sensores de bajo costo desarrollados por el proyecto de PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa. Para 2018, en su versión 2 amplió su cobertura y aumentó el número de sensores a 250, y cambió los sensores de temperatura y humedad por unos más robustos (Davis Temperature/Humidity Sensor 6830). Estos sensores se encuentran distribuidos por todo el Valle de Aburrá (Figura 2), principalmente en elevaciones entre 1400 y 1800 m.s.n.m., y están situados en fachadas, balcones y terrazas de edificaciones en contacto con el exterior entre los pisos 1 y 4 de altura.

En estas mediciones, al igual que las realizadas en los casos de estudio (Parte 3), cobran interés los rasgos individualizados del entorno de medición, por lo que se asume que son mediciones influenciadas por factores como la geometría urbana, la cobertura vegetal, la altura de la medición respecto del piso, elevación sobre el nivel del mar y cercanía a fuentes de calor (Figura 2).

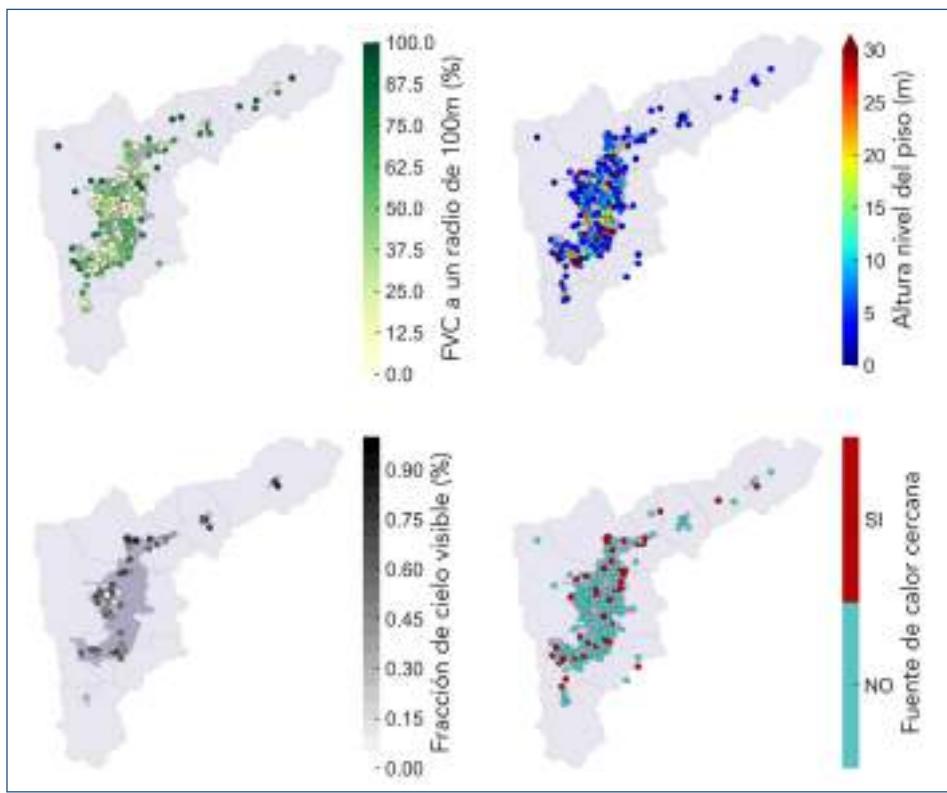


Figura 2. Ubicación sensores del proyecto Ciudadanos Científicos V2. De izquierda a derecha: Fracción de cobertura vegetal, altura del piso al sensor, fracción de cielo visible, existencia de fuentes de calor cerca al sensor.

Con estos datos se hizo un análisis similar al realizado con las estaciones meteorológicas de SIATA en cuanto a que se revisó la relación de los valores medios de temperatura y humedad con respecto de la elevación sobre el nivel del mar. A diferencia de que aquí los gradientes provenientes de datos microclimáticos se compararon respecto del gradiente observado en las estaciones meteorológicas. También, se hizo uso de diagramas psicrométricos para analizar la variación a lo largo del día de temperatura y humedad relativa agrupando las mediciones en rangos por elevación sobre el nivel del mar. Para esta sección se tienen en cuenta datos entre mayo y diciembre de 2018.

3.3 Parte 3: Casos de estudio: campaña de medición con sensores multiparamétricos

Esta campaña se realizó con el objetivo de medir microclimas determinados por propiedades superficiales contrastantes en el Valle de Aburrá, en términos de geometría urbana, tipos de materiales y cobertura vegetal. Para estas mediciones, el análisis se centró en las variables objetivas involucradas en el ambiente térmico humano: Temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación (Parsons, 2014).

La elección de los sitios de medición se hizo a partir de los resultados obtenidos del análisis de temperatura superficial con datos de Landsat 8 en Guzmán Echavarría (2018), eligiendo sitios con altas temperaturas, temperaturas moderadas, y con alta y baja densidad de vegetación circundante. Además, se buscó aislar el efecto de la topografía en las mediciones, escogiendo sitios en la base del Valle (ciudad de Medellín) con elevaciones que rondan entre 1470 y 1543 m.s.n.m. (Figura 3).

La campaña inició en marzo de 2017 y finalizó en abril de 2018, y se emplearon dos sensores Thiess Clima sensor US con los que se realizaron mediciones simultáneas. La campaña inició con una medición piloto (medición 1) de seis meses, luego en los siguientes sitios se realizaron mediciones simultáneas con los dos sensores (un sitio con vegetación escasa y otro con vegetación abundante) con una duración entre dos y tres meses por sitio. El cambio de lugar de los sensores no fue simultáneo, y se contó con una diferencia de veinte días entre cambio de lugares para contar con datos de traslapo entre lugares. Estas mediciones se hicieron en espacios exteriores a 1.5 m de separación de la fachada, y en su mayoría, a 7 m de altura del suelo (planta 2 o 3).

En este apartado se realizaron análisis más detallados, examinando los siguientes aspectos:

- Comparación del microclima de cada lugar respecto de las mediciones de la estación meteorológica más cercana, mediante estadísticos descriptivos y los ciclos diurnos de cada variable.
- Variaciones en el microclima de acuerdo con la disponibilidad energética en superficie, a través de la respuesta entre la irradiancia diurna y la amplitud térmica.



Figura 3. Metadatos de casos de estudio agrupados en cañón urbano cerrado (tono gris), sitios con poca vegetación (colores cálidos), sitios con vegetación (colores verdes). En las fotografías de tipo ojo de pescado las líneas rosas corresponden a las rutas solares durante el tiempo de medición. Los puntos rojos corresponden a la ubicación del sensor en cada lugar.

- Discusión de las posibles implicaciones en el confort y estrés térmico de la población de cada microclima usando diagramas psicrométricos, estimaciones de temperatura media radiante y dos índices de estrés térmico: modificación de la temperatura fisiológica equivalente (mPET) (Chen & Matzarakis, 2017) y el Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Jendritzky et al., 2012). Se elige trabajar con los índices mPET y UTCI, ya que estos tienen en cuenta los flujos de calor involucrados del balance energético humano, diferente a otros índices de origen empírico (de Freitas & Grigorieva, 2017). Para estas estimaciones se empleó el modelo RayMan Pro (Matzarakis et al., 2010).

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Parte 1: Alcance regional, escala local: Efectos urbanos en el contexto térmico local del Valle

El sistema de clasificación climático Köppen-Geiger describe el clima de un lugar de acuerdo con los valores medios mensuales y la estacionalidad

de la precipitación y temperatura. En el Valle el mes más seco del año supera siempre 60 mm de precipitación en promedio, por ende, la mayoría del territorio se clasifica en categorías asociadas a lugares húmedos con precipitación constante a lo largo de año (Af: tropical húmedo y Cfb: Templado, sin estación seca, verano suave). Debido a esto, y a que la media mensual de temperatura no varía en más de 1 °C a lo largo del año, la categorización del clima del Valle se basa principalmente en la isoterma 18 °C (Figura 4); las estaciones de SIATA se sitúan en su mayoría en clima Af en zona urbanas y periurbanas con temperaturas medias que no superan los 23 °C. Las estaciones ubicadas en clima de tipo Cfb se encuentran en zonas rurales o periurbanas por encima de los 2000 m.s.n.m.

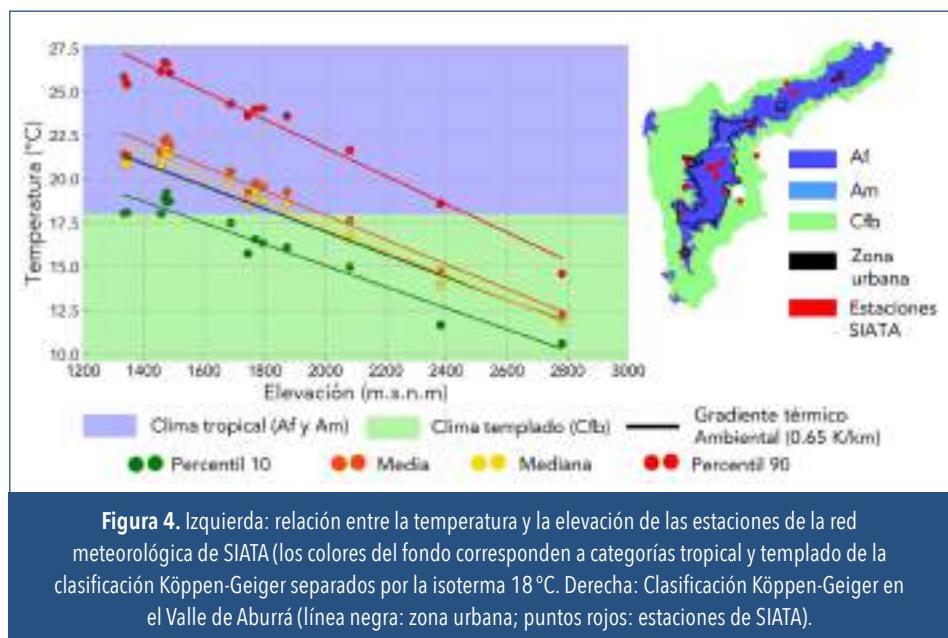


Figura 4. Izquierda: relación entre la temperatura y la elevación de las estaciones de la red meteorológica de SIATA (los colores del fondo corresponden a categorías tropical y templado de la clasificación Köppen-Geiger separados por la isoterma 18 °C). Derecha: Clasificación Köppen-Geiger en el Valle de Aburrá (línea negra: zona urbana; puntos rojos: estaciones de SIATA).

De acuerdo con el diagrama de dispersión entre elevación y temperatura (Figura 4), las estaciones más cálidas son aquellas que se ubican en la zona urbanizada del centro del Valle entre 1400 y 1600 m.s.n.m. y no en la zona más baja del Valle. La pendiente de la regresión de las temperaturas medias es cercana a $-0.7^{\circ}\text{C}/\text{km}$, siendo diferente del gradiente de temperatura ambiental esperado ($0.65^{\circ}\text{C}/\text{km}$). Esta

modificación en el gradiente se puede considerar como una expresión del efecto ICU, ya que las estaciones ubicadas por debajo de 1400 m.s.n.m. al norte del Valle no son las más cálidas, y estas pertenecen a zonas con menor densidad poblacional o periurbanas (Figura 5).

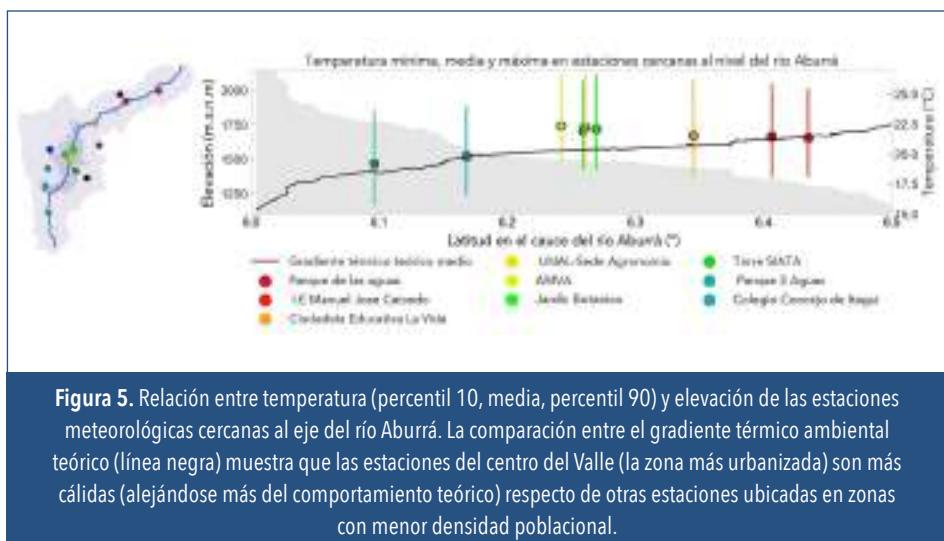


Figura 5. Relación entre temperatura (percentil 10, media, percentil 90) y elevación de las estaciones meteorológicas cercanas al eje del río Aburrá. La comparación entre el gradiente térmico ambiental teórico (línea negra) muestra que las estaciones del centro del Valle (la zona más urbanizada) son más cálidas (alejándose más del comportamiento teórico) respecto de otras estaciones ubicadas en zonas con menor densidad poblacional.

A través del uso de diagramas psicrométricos se analizan las variaciones promedio mensuales (Figura 6, izquierda) y horaria (Figura 6, derecha) de temperatura y humedad. Lo primero que salta a la vista es que son mayores las variaciones del estado del aire a lo largo del día que a lo largo del año, con amplitudes térmicas promedio que rondan entre 5 y 9°C, y medias mensuales que no varían ampliamente. Este comportamiento es típico en el trópico.

Adicionalmente, si se comparan las variaciones medias anuales y diurnas respecto de la desviación de una zona de confort (área gris en Figura 6), se puede reafirmar que la elevación determina el tipo de clima. El comportamiento mensual de las estaciones de clima templado (Cfb) se desvía de la zona de confort a condiciones más frías y húmedas; y a medida que baja la elevación, las estaciones muestran condiciones confortables o se desvían hacia condiciones ligeramente húmedas. Esto permite concluir que el clima del Valle de Aburrá es muy deseable por su cercanía a la zona

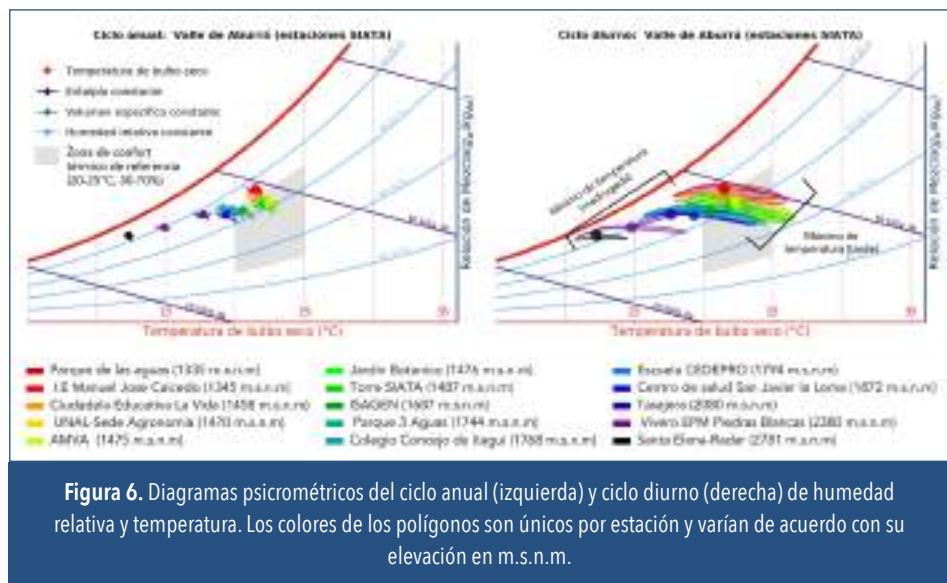


Figura 6. Diagramas psicrométricos del ciclo anual (izquierda) y ciclo diurno (derecha) de humedad relativa y temperatura. Los colores de los polígonos son únicos por estación y varían de acuerdo con su elevación en m.s.n.m.

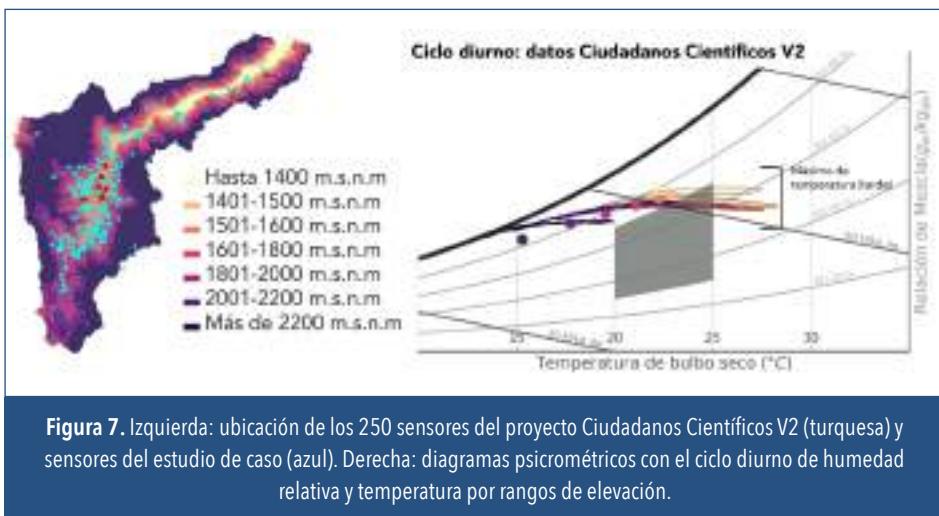
de confort. Sin embargo, el comportamiento de los ciclos diurnos muestra que, dependiendo del momento del día, se pueden tener condiciones más cálidas en el centro del Valle. Separando las estaciones por rangos de elevación, y sin tener en cuenta el efecto del viento y la radiación, se puede intuir que:

- Las estaciones ubicadas en el corregimiento de Santa Elena en Medellín (a elevaciones mayores de 2100 m.s.n.m.) tienen condiciones de frías y húmedas todo el tiempo.
- Las estaciones ubicadas entre 1500 y 2100 m.s.n.m., durante el día presentan condiciones que se incluyen dentro de la zona de confort y durante la noche tienen condiciones frías y húmedas.
- Las condiciones térmicas de las estaciones ubicadas en la base del Valle hasta una elevación de 1450 m.s.n.m. permanecen la mayoría del tiempo dentro de la zona de confort. Sin embargo, unas pocas horas durante las madrugadas se presentan condiciones frías y húmedas y cerca del mediodía se dan condiciones cálidas.
- Las estaciones ubicadas en la parte norte, a una elevación menor a 1400 m.s.n.m., durante el día permanecen dentro de condiciones de confort con unas pocas horas cerca del mediodía con condiciones cálidas.

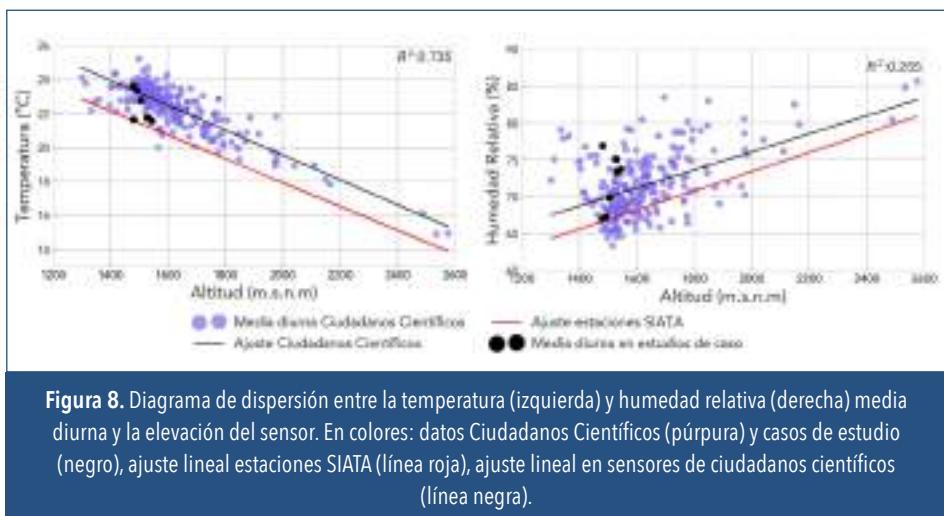
Estos resultados sugieren que para el Valle de Aburrá la altitud y el grado de urbanización del lugar son información clave para diseñar estrategias de acondicionamiento ambiental de edificaciones y espacios públicos.

4.2 Parte 2: Alcance regional, microescala: Meteorología en el dintel urbano, Proyecto Ciudadanos Científicos V2

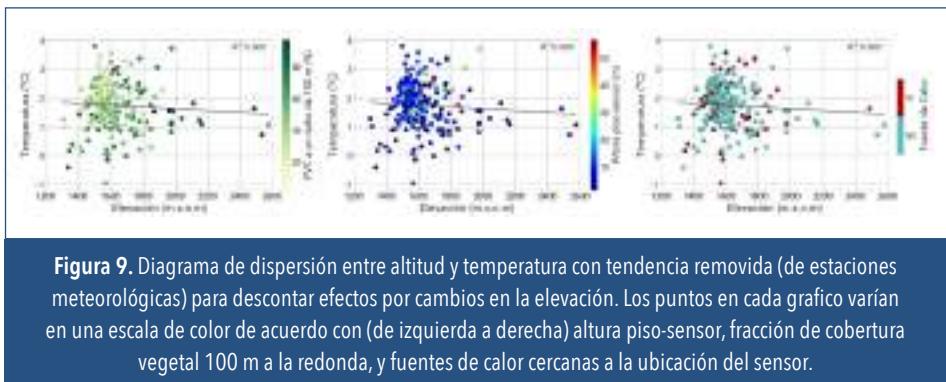
En este apartado, extendemos el análisis por cotas de elevación a datos microclimáticos distribuidos por todo el Valle. Para estudiar los mismos aspectos de la Parte 1 de este trabajo, se agruparon los sitios de medición por rangos de elevación de 100 m (Figura 7). En este caso, los diagramas psicrométricos muestran ciclos diurnos aplanados (mayor amplitud térmica), lo cual sugiere que las mediciones que están más cerca de la superficie capturan procesos que están asociados a un mayor intercambio de calor sensible que las estaciones meteorológicas de SIATA. En comparación con el análisis de la Parte 1, en estas mediciones las amplitudes térmicas son más grandes, y la humedad, aunque es mayor, tiene una variación menor. El ciclo diurno con estos datos muestra más tiempo del día por fuera de la zona de referencia de confort térmico (especialmente cerca del mediodía), con temperaturas que superan los 30 °C en condiciones medias, situación que no ocurre en las estaciones meteorológicas.



La afirmación de que los datos tomados dentro del dosel urbano son más cálidos y húmedos se confirma comparando el gradiente altitudinal de la temperatura y la humedad del dosel urbano (Figura 8, línea negra) con el de las estaciones (Figura 8, línea roja). Los puntos negros de estas figuras corresponden a las mediciones de los casos de estudio (Parte 3) y ponen de manifiesto que en elevaciones similares las diferencias de temperatura y humedad son grandes. Esto tiene mucho que ver con las características propias de cada entorno de medición, como se explicará más adelante.



Para remover el efecto de los cambios de elevación sobre el nivel del mar y cuantificar las diferencias de los 250 sitios de acuerdo a una desviación del gradiente térmico local, se remueve la tendencia asociada al gradiente con la elevación de las estaciones de SIATA. En la Figura 8 se puede notar que la dispersión en las medias a una elevación fija es bastante grande. Por ejemplo, para elevaciones entre 1400 y 1600 m.s.n.m. la temperatura en el dosel urbano es superior respecto al valor medido por una estación meteorológica en promedio 1.8 °C, pero puede variar entre -1 y 4 °C. Para explicar esto se debe acudir a las distintas propiedades de cada entorno de medición (Figura 9), pero en este caso no es muy clara la relación, lo cual podría indicar que no hay un único factor dominante que explique el efecto urbano en cada sitio de medición.



4.3 Parte 3: Casos de estudio, microescala: Meteorología en el dosel urbano

El entorno de medición y las formas de instalación en el proyecto Ciudadanos Científicos son muy diversos, con sensores en balcones, fachadas o terrazas. Por ello, en esta sección se abordan específicamente variaciones microclimáticas en entornos muy diferentes, pero con mediciones más controladas en cuanto al emplazamiento y ubicación del sensor en altura desde el piso.

Para facilitar la interpretación de los resultados de esta sección, se agrupan los sitios de medición en tres categorías de acuerdo con la escala de color mostrada en la Figura 3. El sitio correspondiente a un cañón urbano cerrado se mostrará en gris, los sitios con poca vegetación se mostrarán en colores cálidos, y los sitios con vegetación se muestran en escala de verdes. El color más verde pertenece al sitio con más vegetación y el color más rojo al sitio con más superficies impermeables.

4.3.1 Estadísticos descriptivos y variaciones a lo largo del día

El primer aspecto que se revisó en cada sitio de medición fueron los estadísticos descriptivos (Figura 10, arriba) y los ciclos diurnos (Figura 10, abajo) comparados con los datos para el mismo periodo de tiempo de la estación meteorológica más cercana. A pesar de que las mediciones fueron en diferentes épocas del año, las mediciones de referencia de las estaciones no mostraron variaciones importantes de temperatura y humedad.

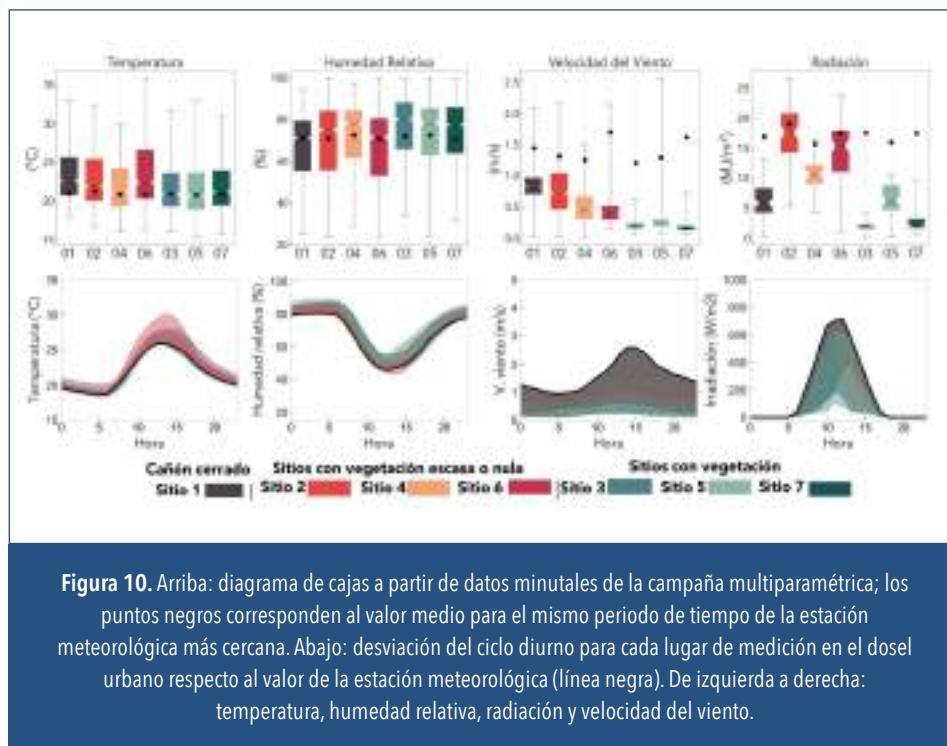


Figura 10. Arriba: diagrama de cajas a partir de datos minutales de la campaña multiparamétrica; los puntos negros corresponden al valor medio para el mismo periodo de tiempo de la estación meteorológica más cercana. Abajo: desviación del ciclo diurno para cada lugar de medición en el dosel urbano respecto al valor de la estación meteorológica (línea negra). De izquierda a derecha: temperatura, humedad relativa, radiación y velocidad del viento.

Al comparar las mediciones del dosel urbano frente a las estaciones (puntos negros en Figura 10), se notaron los siguientes patrones.

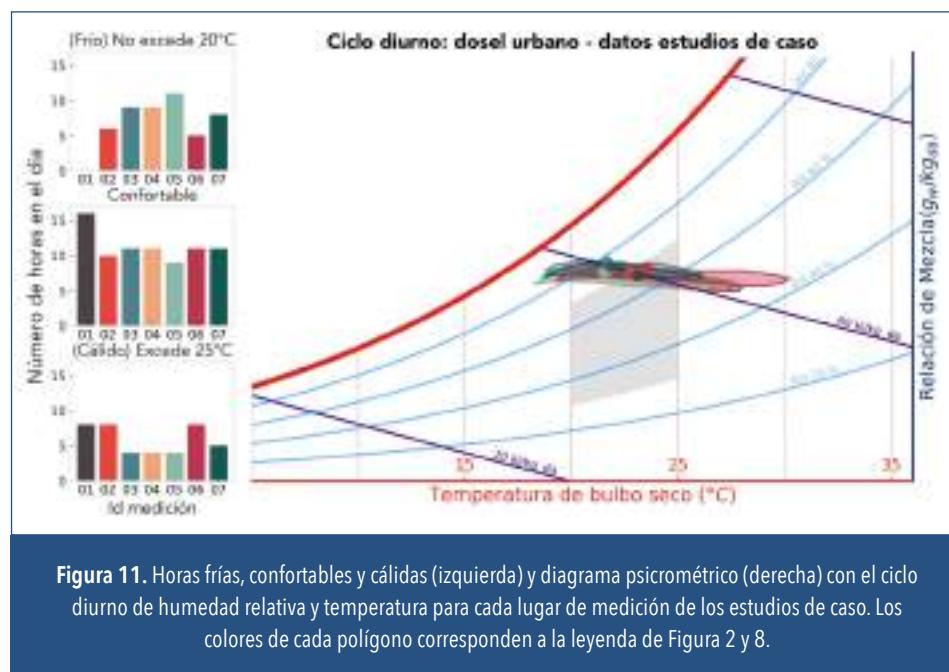
- La temperatura del dosel urbano (al igual que en la Parte 2 de este estudio) es más alta que en las estaciones, especialmente durante el día. Las temperaturas más altas se dan en sitios con poca vegetación y con prevalencia de materiales impermeables (Mediciones 01, 02 y 06). La única medición que presenta temperaturas considerablemente más cálidas durante todo el día y la noche es la del cañón urbano cerrado. Los sitios con sombra de vegetación sobre el sensor (mediciones 05 y 07) presentan temperaturas similares a las estaciones meteorológicas.
- El entorno en el dosel urbano tiende a ser aún más húmedo que el de las estaciones, siendo más húmedo en los sitios con más vegetación. Solo en los lugares con vegetación nula (mediciones 01 y 06) la humedad tendió a ser igual o incluso un poco menor a las estaciones.

- La radiación se vio altamente condicionada por el acceso solar de cada sitio, por ende, aquellos más abiertos (mediciones 02 y 06) presentaron valores más cercanos a las estaciones. En el resto de los lugares la radiación varió de acuerdo con la ubicación de los obstáculos cercanos (como edificaciones y árboles), mostrando los valores más altos en las horas de exposición directa al sol.

4.3.2 Implicaciones de cambios en el microclima en términos de confort y estrés térmico en espacios exteriores

Las variaciones descritas en la sección anterior indican que cada lugar tiene un comportamiento microclimático característico (en términos de temperatura, humedad, radiación y viento), que es influenciado por aspectos como la geometría urbana, la cantidad de vegetación y los materiales de construcción. Los ciclos diurnos en el diagrama psicrométrico (Figura 11, derecha) muestran las diferencias microclimáticas que se pueden inducir cuando la vegetación hace parte del entorno (líneas en tonos verdes) y cuando hay ausencia de esta (líneas en tonos cálidos). Las zonas con vegetación presentan condiciones dentro la zona de confort durante gran parte del día, y en la noche, madrugada y primeras horas de la mañana muestran condiciones húmedas. En las zonas con vegetación escasa, el comportamiento es más variable, pero tiende a presentar condiciones cálidas durante más tiempo. Aquí se presta especial atención a la medición 6, ya que tiene una amplitud térmica mayor, debido a que en esa calle prevalecen superficies impermeables (calles asfaltadas) sin sombra, que alcanzan altas temperaturas en el día.

Otra forma de analizar este diagrama es mediante la cantidad de tiempo en que un lugar está o no dentro de condiciones confortables. En este caso, analizando solo la temperatura (Figura 11, izquierda) es más explícito el contraste entre los sitios con y sin vegetación. Por ejemplo, la medición en el cañón cerrado (Medición 01) que, si bien presenta un mayor número de horas bajo temperaturas confortables, no presenta horas frías en la noche, y tiene un número de horas cálidas similar al de las otras mediciones con vegetación escasa. Este comportamiento es típico de geometrías urbanas cerradas, porque en horas de la noche es posible que no se dé una liberación de calor sensible eficiente por la reflexión múltiple de radiación de onda larga.



Por otra parte, la información que proporcionan los ciclos diurnos de la temperatura media radiante y los índices térmicos (Figura 12) reafirman las hipótesis propuestas en los análisis anteriores en este trabajo. Respecto al método de análisis con diagramas psicométricos, pero esta vez incluyendo viento y radiación solar en el análisis, se confirma una prevalencia de condiciones térmicas cercanas al confort térmico en el dosel urbano durante gran parte del día —especialmente el UTCI—, con particularidades que varían entre sitios con y sin vegetación. También, se notan cambios en los índices durante el día y la noche respecto de las medidas de referencia en estaciones meteorológicas (Figura 12, línea negra), sugiriendo mayor o menor estrés térmico en función del acceso solar y la vegetación circundante al sensor.

Los sitios sin vegetación, en comparación, podrían propiciar durante el día condiciones térmicas que induzcan más estrés térmico por calor, especialmente en las horas pico de radiación. Esto puede estar ligado a la carga térmica impuesta por la radiación incidente (expresada con la temperatura radiante media, en la Figura 12). Asimismo, los rangos alcanzados por los índices mPET y UTCI sugieren que los lugares sin vegetación se calientan

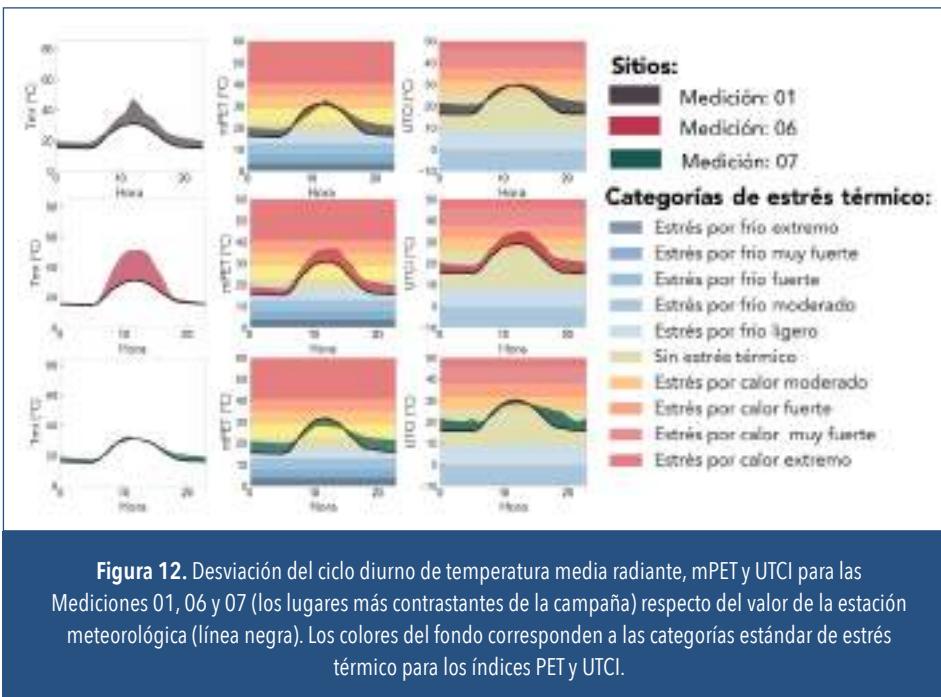


Figura 12. Desviación del ciclo diurno de temperatura media radiante, mPET y UTCl para las Mediciones 01, 06 y 07 (los lugares más contrastantes de la campaña) respecto del valor de la estación meteorológica (línea negra). Los colores del fondo corresponden a las categorías estándar de estrés térmico para los índices PET y UTCl.

y se enfrian más durante el día o, al menos, que se pueden producir sensaciones térmicas más cambiantes a lo largo de las horas con sol; mientras que en el sitio con vegetación y el cañón urbano cerrado (mediciones 01 y 07) se dan índices con valores más cercanos al rango “sin estrés térmico” durante todo el día, por ende, parecen ser lugares con una mejor regulación térmica para los humanos.

Durante la noche, los valores de mPET y UTCl son cercanos o están en el rango “sin estrés térmico”, y a su vez muestran valores más altos que los índices de las estaciones (que alcanzan valores de estrés por frío ligero). Esto sugiere que el estrés térmico y la sensación térmica en el dosel urbano es un poco más cálida que aquella dada por encima del nivel de techo.

4.3.3 Variaciones en el microclima de acuerdo con la disponibilidad energética en el dosel urbano

En este apartado se analiza la disponibilidad energética de cada lugar de medición con un análisis de la irradiancia diurna y la amplitud térmica en

función de la geometría del entorno. Con datos de la red meteorológica de SIATA, se evidenció una relación directa entre la amplitud térmica y la irradiación diurna en el Valle, es decir, que el cambio de temperatura entre la madrugada y la tarde es una respuesta a la disponibilidad energética de un lugar durante el día (Guzmán Echavarría, 2018). Esto también se evidencia en los datos de esta campaña (Figura 13) donde, además, se puede notar que cada sitio de medición presenta un comportamiento particular. En los espacios abiertos (con mayor porción de cielo visible) y menor vegetación (mediciones 02, 04 y 06) se observaron las mayores irradiaciones y amplitudes térmicas, mientras que las menores irradiaciones se observaron en los lugares con más obstáculos al acceso solar (sitios con vegetación). El cañón cerrado mostró un comportamiento intermedio entre los sitios con y sin vegetación.

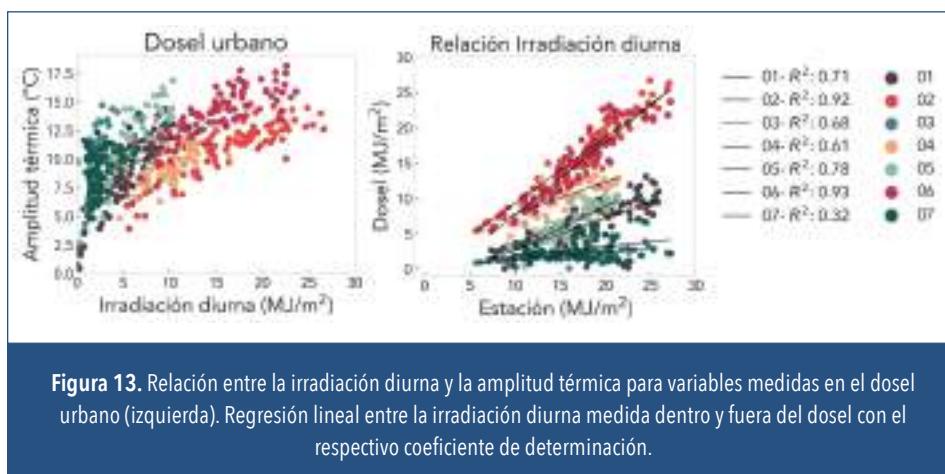


Figura 13. Relación entre la irradiación diurna y la amplitud térmica para variables medidas en el dosel urbano (izquierda). Regresión lineal entre la irradiación diurna medida dentro y fuera del dosel con el respectivo coeficiente de determinación.

El comportamiento descrito en la Figura 13 implica que para días con cielo despejado se darán amplitudes térmicas más altas y, por ende, se podrán alcanzar mayores temperaturas, especialmente en sitios con alto acceso solar en el dosel urbano. Así, en lugares con estas características se pueden pronunciar los efectos urbanos descritos en la sección 4.3.1. Por ejemplo, el promedio de temperatura máxima diurno en Medellín no supera los 28 °C (Figura 4), aunque en condiciones de cielo despejado se pueden alcanzar temperaturas de hasta 32 °C (no mostrado). Pero, en

promedio, en un día despejado en el dosel urbano se observaron temperaturas máximas en promedio de entre 28.4 y 33.6 °C, con mayores temperaturas en las mediciones 01, 05 y 06 durante las horas pico de radiación.

5 DISCUSIÓN

Los resultados de las Parte 1 y 2 de esta investigación muestran que hay evidencia de sobrecalentamiento urbano diferenciado en distintas zonas del Valle. Adicionalmente, a través del análisis de casos de estudio en sitios con elevaciones similares, pero con distintas configuraciones urbanas (Parte 3), se encontró que la meteorología en el dosel urbano (y posiblemente la sensación térmica) varía en función principalmente del acceso solar, debido a la geometría urbana, el tipo de coberturas y la vegetación situada alrededor de los sensores.

Por ende, los resultados hallados plantean la posibilidad de pensar en estrategias de diseño urbano, tanto para edificaciones como para espacios públicos que aprovechen el clima del Valle, incorporando no solo la temperatura como criterio básico de diseño. De acuerdo con los resultados de esta investigación por rangos de elevación se podría proponer lo siguiente:

- En lugares situados en la zona de clima frío y húmedo (elevaciones mayores a ~2000 m.s.n.m. y tipo de clima Cfb) es recomendable usar estrategias para la noche que propicien la conservación del calor sensible del día, y para el día que disminuyan la exposición al viento en ambientes al aire libre.
- Entre 1500 y 2100 m.s.n.m. las condiciones térmicas durante la mayor parte del día son deseables (de acuerdo con los referentes de confort térmico) y las noches son un poco más frías y húmedas, por lo que se recomienda propiciar espacios que conserven calor sensible del día y que generen sombra en las horas de mayor radiación.
- Para lugares situados hasta ~1450 m.s.n.m., dependiendo del grado de cobertura vegetal y de superficies impermeables en el entorno, las estrategias de diseño urbano podrían enfocarse a evitar desconfort por calor. Por ende, para las horas de mayor carga térmica se pueden propiciar espacios

en los que se eviten altas temperaturas superficiales, y especialmente que minimicen el almacenamiento de calor sensible del día. Se recomienda también propiciar sombra (a través de vegetación y disposición de elementos con materiales de buena inercia térmica) y remoción convectiva de calor a través de la ventilación natural.

Dicho lo anterior, no hay que perder de vista que el Valle de Aburrá cuenta con un régimen climático privilegiado, puesto que el comportamiento mensual de temperatura y humedad relativa en las zonas urbanas tiende a estar cerca de referentes de confort térmico. Por ello, dependiendo de las necesidades de termorregulación, una estrategia enfocada a mejorar el microclima durante un rango de horas en el día puede funcionar durante todo el año. Por eso es vital entender el comportamiento térmico de un lugar a escala subdiaria, más que su variación media mensual.

6 CONCLUSIONES

A través del uso de datos representativos de una escala climática local y microclimática fue posible analizar efectos urbanos en distintas variables meteorológicas en el Valle de Aburrá. Teniendo en cuenta la topografía del Valle se examinó el comportamiento térmico en relación con la elevación sobre el nivel del mar, y se encontró que hay modificaciones del gradiente de temperatura que responden al entorno de medición, y que el dosel urbano tiende a mostrar mediciones más cálidas y húmedas (Parte 2 y Parte 3) que las mediciones realizadas por encima de este con datos de las estaciones de SIATA.

La discusión generada en este estudio se enfoca más al microclima en espacios exteriores, y se hace énfasis en que para extender el alcance a espacios interiores se requiere de otro tipo de mediciones y análisis (Larsen et al., 2022). Para generar espacios interiores cómodos y energéticamente eficientes, conocer el detalle del microclima que circunda la infraestructura es un dato válido y necesario, por ejemplo, el tipo de diseño bioclimático a emplear para proporcionar espacios. Sin embargo, este no es el único criterio a tomar en cuenta (otros pueden ser limitaciones de espacio, limitantes de ruido externo, calidad de aire, tipos de materiales).

Para futuros trabajos se propone realizar un análisis de exposición de la población a diferentes microclimas en sus rutinas diarias (con una mejor representación de la temperatura media radiante), que permita alimentar el debate sobre cuál es el clima que se considera para diseñar. Esto último es relevante al momento de considerar las tendencias locales de cambio climático y la inexistencia de una línea base de estudios en exposición y estrés térmico que soporte las acciones de adaptación climática en el Valle. Los índices de estrés térmicos empleados en esta investigación aplican para un fenotipo de adulto promedio y pueden no representar las diferentes experiencias con el calor en la población del Valle, por esto se aconseja hacer una elección cuidadosa del tipo de índices térmicos o metodología para hacer este tipo de evaluación (Grundstein & Vanos, 2021; Guzman-Echarvarria et al., 2022; Vanos et al., 2020). Adicionalmente, más allá de estimar una métrica para describir el efecto ICU, el consenso actual para analizar el problema del calor urbano se está enmarcando en el concepto de sobrecalentamiento urbano. Este concepto se define como la excedencia de umbrales térmicos que generan impactos negativos en las personas (por ejemplo, en salud, confort y productividad) y el funcionamiento de la ciudad (Nazarian et al., 2022).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el área metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), el municipio de Medellín, Grupo EPM e ISAGEN bajo el contrato CD511, 2017. La autora principal fue financiada parcialmente por la Universidad Nacional de Colombia bajo el programa de becas de la Facultad de Minas. Los autores también desean reconocer el proceso de revisión por pares de este trabajo realizado por el comité evaluador del XV ENCAC / XI ELACAC, encuentro en el cual el presente trabajo recibió el Prêmio Maurício Roriz como mejor artículo completo. Los autores dan crédito a los equipos desarrolladores de *software libre* en Python sin el cual esta investigación no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- ASF DAAC (2015). *Dataset: ASF DAAC 2015, ALOS-1 PALSAR_Radiometric_Terra-in_Corrected_low_res; Includes Material © JAXA/METI 2007*. Alaska Satellite Facility - Distributed Active Archive Center.
- ASHRAE (2009). *2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers.
- Chen, Y. C. & Matzarakis, A. (2017). Modified physiologically equivalent temperature—basics and applications for western European climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 1-15.
- de Freitas, C. R. & Grigorieva, E. A. (2017). A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. *International Journal of Biometeorology*, 61(3), 487-512.
- Gatley, D. P. (2013). *Understanding Psychrometrics* (3th ed.). ASHRAE.
- Grundstein, A. & Vanos, J. (2021). There is no ‘Swiss Army Knife’ of thermal indices: The importance of considering ‘why?’ and ‘for whom?’ when modelling heat stress in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 55(15), 822-824.
- Guzmán, G., Hoyos, C. & Botero, V. (2019). *Associating Land Surface Temperature Retrieved from Satellite and Unmanned Aerial System With Urban Cover and Topography in Aburrá Valley* (en prep).
- Guzmán Echavarria, G. (2018). *Análisis de la influencia del diseño urbano en el Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Guzman-Echavarria, G., Middel, A. & Vanos, J. (2022). Beyond heat exposure — new methods to quantify and link personal heat exposure, stress, and strain in diverse populations and climates: The journal temperature toolbox. *Temperature*, 00(00), 1-21.
- Herrera, M. A. (2019). *Morfología urbana y clima local: alternativas de diseño urbano a partir de infraestructura verde. Caso de estudio: Medellín, Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Jendritzky, G., de Dear, R. & Harenith, G. (2012). UTCI-Why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 421-428.
- Johansson, E., Thorsson, S., Emmanuel, R. & Krüger, E. (2014). Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies - The need for standardization. *Urban Climate*, 10(P2), 346-366.
- Larsen, L., Gronlund, C. J., Ketenci, K. C., Harlan, S. L., Hondula, D. M., Stone, B.,

- Lanza, K., Mallen, E., Wright, M. K. & O'Neill, M. S. (2022). Safe at Home? A Comparison of Factors Influencing Indoor Residential Temperatures During Warm Weather Among Three Cities. *Journal of the American Planning Association*, 0(0), 1-13.
- Lechner, R. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects* (4th ed.). Wiley.
- Lowry, W. P. (1997). Empirical estimation of urban effects on climate: A Problem Analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 16(2), 129-135.
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S. & Nazarian, N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31 (September 2019), 1-4.
- Martínez, A. (2017). *Islas de calor en el área urbana del Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 131-139.
- Meyer, D. & Thevenard, D. (2019). PsychroLib: a library of psychrometric functions to calculate thermodynamic properties of air. *Journal of Open Source Software*, 4(33), 1137.
- Nazarian, N., Krayenhoff, E. S., Bechtel, B., Hondula, D. M., Paolini, R., Vanos, J., Cheung, T., Chow, W. T. L., de Dear, R., Jay, O., Lee, J. K. W., Martilli, A., Middel, A., Norford, L. K., Sadeghi, M., Schiavon, S. & Santamouris, M. (2022). Integrated Assessment of Urban Overheating Impacts on Human Life. *Earth's Future*, 10(8).
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Parsons, K. (2014). *Human Thermal Environments. The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance* (3th ed.). CRC Press.
- Peel, M. C., Mcmahon, T. A. & Finlayson, B. L. (2007). Updated world map of the K öppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.
- Saaroni, H. & Ziv, B. (2010). Estimating the urban heat island contribution to urban and rural air temperature differences over complex terrain: Application to an Arid city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(10), 2159-2166.

- Sepúlveda, J. (2015). *Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Vanos, J. K., Baldwin, J. W., Jay, O. & Ebi, K. L. (2020). Simplicity lacks robustness when projecting heat-health outcomes in a changing climate. *Nature Communications*, 11(1), 10-14.

Evaluación del efecto isla de calor urbano y sus implicaciones en la vulnerabilidad social en Villahermosa, Tabasco, México

Alejandro Alcudia-Aguilar¹, Pavel Ernesto Popoca-Cruz²,
José Manuel Madrigal-Gómez³, Miguel Eduardo Jácome-Flores⁴,
Lucía Sanaphre-Villanueva⁵, Ojilve Ramón Medrano-Pérez⁶

¹ Cultivo Land CLPBC., Berkeley, California, EE.UU. ORCID: 0000-0003-2334-5725. alejandro.alcudia@cultivo.land

² Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C., Tabasco, México. ORCID: 0000-0002-4471-5310. pavel.popoca@ccgs.mx

³ Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C., Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0003-3508-258X. jmadrigal@centrogeo.edu.mx

⁴ Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A. C., Tabasco, México. ORCID: 0000-0003-1504-7920. miguel.jacome@ccgs.mx

⁵ Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A. C., Tabasco, México. ORCID: 0000-0001-5566-7230. lucia.sanaphre@ccgs.mx

⁶ Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A. C., Tabasco, México. ORCID: 0000-0002-5445-1136. ojilve.medrano@ccgs.mx

RESUMEN

El incremento de la temperatura asociado al cambio climático ha sido particularmente evidente en zonas urbanas, lo que ha provocado problemas de salud pública principalmente en la población más vulnerable. Por ello, se cuantificaron las variaciones espaciales y temporales de la temperatura en la ciudad tropical de Villahermosa, Tabasco, y su relación con la vegetación, cuerpos de agua, infraestructura e indicadores socioeconómicos.

micos. Se utilizaron una serie de imágenes térmicas del satélite Landsat 8 OLI (Banda 10 TIRS 1, 10.6 - 11.19 Nm) del año 2020 para estimar la temperatura por tipo de cobertura, y contrastarla con índices espectrales (NDVI, NDBI y NDWI) y variables socioeconómicas. Se determinó que la cobertura con las mayores temperaturas es la de infraestructura, aunque en enero, octubre y diciembre lo fue la de vegetación arbórea. Asimismo, el índice de vegetación (NDVI) y la presencia de infraestructura explicaron mejor su variación espacial. Un análisis de componentes principales mostró que parte de las manzanas con alta proporción de la población con empleo, pisos y servicios en viviendas y alto nivel educativo, y otras con alta densidad de ocupantes, se asociaron a un alto porcentaje de construcción, escasa presencia de vegetación arbórea y altas temperaturas. El análisis de autocorrelación espacial local permitió detectar zonas vulnerables de la ciudad, donde coinciden islas de calor y población vulnerable o con condiciones socioeconómicas desfavorables. Aunque los cuerpos de agua y la vegetación arbórea son los más eficientes disminuyendo la temperatura superficial, constituyen un bajo porcentaje de cobertura en la ciudad. Se recomienda considerar parques urbanos o tecnologías como las azoteas verdes como parte fundamental de la planeación urbana.

Palabras clave: temperatura de la superficie, LISA, teledetección, índice de vegetación, condiciones socioeconómicas.

ABSTRACT

The increase in temperature associated with climate change has been particularly evident in urban areas, which has caused public health problems mainly in the most vulnerable population. For it, the spatial and temporal variations of the temperature in the tropical city of Villahermosa, Tabasco, and their relationship with the vegetation, bodies of water, infrastructure and socioeconomic indicators were quantified. A series of thermal images from the Landsat 8 OLI satellite (Band 10 TIRS; 10.60 – 11.9 Nm) from the year 2020 were used to estimate the temperature by type of coverage, and contrast it with spectral indices (NDVI, NDBI

and NDWI) and socioeconomic variables. It was determined that the coverage with the highest temperatures is the infrastructure, although in January, October and December it was the tree vegetation. Likewise, the vegetation index (NDVI) and the presence of infrastructure better explained its spatial variation. An analysis of the main components showed that part of the colonies with a high proportion of the population with employment, flats and housing services and a high educational level, and others with a high density of occupants, were associated with a high percentage of construction, low presence of arboreal vegetation and high temperatures. The local spatial autocorrelation analysis made it possible to detect vulnerable areas of the city, where heat islands and vulnerable populations coincide or with unfavorable socioeconomic conditions. Although bodies of water and tree vegetation are the most efficient in reducing surface temperature, they constitute a low percentage of coverage in the city. It is recommended to consider urban parks or technologies such as green roofs as a fundamental part of urban planning.

Keywords: surface temperature, LISA, remote sensing, vegetation index, socioeconomic conditions.

1 INTRODUCCIÓN

Las ciudades son espacios dinámicos en constante expansión donde se interrelacionan infraestructuras, ecosistemas naturales y aspectos socioeconómicos y culturales. En las dos últimas décadas a nivel global se ha intensificado el crecimiento de las zonas urbanas y el aumento de las poblaciones humanas (ONU, 2018).

El incremento de la temperatura asociado al cambio climático ha sido particularmente evidente en zonas urbanas, detonando problemas de salud pública, sobre todo, en la población más vulnerable (Maxwell et al., 2018; Sleeter et al., 2018). Esta situación ha sido producto de la expansión y el crecimiento urbano (Deilami et al., 2018; Atasoy, 2020), con su inherente dependencia de las infraestructuras de acero, asfalto y hormigón, que absorben y retienen más el calor (Deilami et al., 2018; Atasoy,

2020; Cartier, 2021). De acuerdo con Lemoine-Rodríguez et al. (2021), las propiedades térmicas de las áreas urbanas producen un clúster espacial de temperaturas generalmente más altas que las de sus alrededores, lo que se reconoce como el efecto isla de calor urbano (ICU). Este efecto es uno de los mayores desafíos del siglo XXI debido a los impactos adversos sobre el consumo de energía, la contaminación del agua y el aire, la salud humana, y un posible incremento de la mortalidad relacionada con el calor, que se exacerbará en el tiempo con el incremento global de la temperatura (Deilami et al., 2018; Lemoine-Rodríguez et al., 2021).

En este contexto, es esencial el entendimiento de las ICU para desarrollar estrategias que aumenten la resiliencia de las zonas urbanas con altas densidades poblacionales (Leal-Filho et al., 2018), en las que confluyen factores de riesgo a nivel de vecindario (barrios o colonias) que contribuyen a la vulnerabilidad climática de las ciudades (Harlan y Ruddell, 2011). Es decir, la capacidad de adaptación y respuesta de un socioecosistema urbano ante los eventos meteorológicos estará determinada por procesos sociales, físicos, ambientales y económicos propios del sitio (Sakdapolrak y Etzold, 2016). Se ha determinado que los parámetros socioeconómicos de una comunidad, como la situación económica, la densidad poblacional, la edad (bebés y población adulta > 65 años), el nivel educativo, el empleo, el número de ocupantes por cuarto o vivienda y los servicios básicos de que disponen pueden influir en la vulnerabilidad social ante episodios extremos de calor (Basu, 2009; Reid et al., 2009; Johnson et al., 2012; Rosenthal et al., 2014). Por ejemplo, se ha observado una mayor mortalidad relacionada con el calor extremo en las zonas con muy poco o ningún dosel arbóreo, que son más evidentes en las comunidades urbanas de menores ingresos (Donaldson et al., 2003; Rosenthal y Brechwald, 2013; Limaye et al., 2018).

Estudios previos coinciden en que la magnitud de la ICU puede ser distinta en cada área urbana; este efecto se ve influenciado por las condiciones climáticas, las fuentes antropogénicas de humedad y calor presentes en el área, las características termofísicas y geométricas de la ciudad, la forma urbana (Harlan et al., 2006; Zhou et al., 2017; Liang et al., 2020; Liu et al., 2021) y, en general, por los usos de suelo y su distribución dentro de la ciudad (Atasoy, 2020). Dentro de los usos de suelo que más influyen en la

distribución de calor, están: 1) los sitios construidos, en los que es determinante la densidad de construcción (volumen bruto de construcción por unidad de área) y la densidad de edificios (Li et al., 2020); 2) la densidad, distribución y tamaño de parches de vegetación, debido a que, a diferencia de los materiales inertes, que reflejan la mayor parte de la radiación solar, la vegetación la absorbe y transforma y solo una mínima parte se emite como fluorescencia y calor, que, junto con los procesos de transpiración y conductancia estomática asociados a la fotosíntesis, también influyen en la mitigación de las altas cargas de calor urbano (Ballina y Barradas, 2016); y 3) la presencia de cuerpos de agua, que pueden disminuir la temperatura en varios grados y extender su influencia más allá de su límite, incluso por cientos de metros (Wu y Zhang, 2019).

En el caso de México, el estudio de las ICU ha sido analizado desde distintos enfoques y herramientas, que incluyen tanto las observaciones directas de las temperaturas en los diferentes elementos que componen a las ciudades, como el uso de estaciones climatológicas e imágenes satelitales de sensores MODIS, Landsat y Sentinel (Rivera et al., 2017; Cervantes et al., 2000; Zavaleta-Palacios et al., 2020). Estos estudios han documentado que entre más densa sea la infraestructura urbana y menos áreas verdes incluya se favorece el efecto ICU, que origina un mayor consumo de energía en sistemas de enfriamiento, particularmente en ciudades con altas temperaturas como las costeras tropicales. Además, una infraestructura más densa aumenta el área impermeable con asfalto u otros materiales, lo que contribuye a inundaciones (Sánchez, 2015). Con esto aumenta aún más la vulnerabilidad de zonas urbanas al cambio climático.

Dentro del país, una de las ciudades más vulnerables ante los escenarios de cambio climático, principalmente relacionado con el incremento de la temperatura, es la ciudad de Villahermosa, Tabasco. Los estudios sobre las islas de calor en esta ciudad son escasos. El primer estudio documentado fue realizado en 1997 por Cervantes et al. (2000), quienes realizaron mediciones puntuales de temperatura y humedad relativa en la ciudad y encontraron una fuerte relación entre la distribución de la temperatura y la estructura urbana; posteriormente, Sosa-Olivier et al. (2018) realizaron un estudio piloto para evaluar el aporte del tránsito vehicular al efecto ICU en la ciudad.

El objetivo de este estudio fue cuantificar las variaciones espaciales y temporales de la temperatura en Villahermosa, Tabasco, una de las ciudades mexicanas con mayor temperatura promedio anual y mayor porcentaje de humedad relativa. En específico, debido a que en México existe una tendencia hacia desarrollos habitacionales horizontales más densos y con menos áreas verdes cuando se trata de infraestructura de menor valor en el mercado, planteamos la hipótesis de que el nivel socioeconómico de la población se relaciona de forma inversa con la temperatura registrada en la ciudad. Con esto, se pretende determinar si la población económicamente más vulnerable habita en las áreas con mayor temperatura, lo que incrementa su vulnerabilidad.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La ciudad de Villahermosa tuvo su mayor desarrollo económico, crecimiento poblacional y urbanización en concierto con la industrialización resultante del *boom* petrolero de Tabasco en 1970 (Romo-López, 2008; Aguilar-Zurita et al., 2018). En particular, entre 1960 y 1980 la población se triplicó, pasando de 59,000 a cerca de 180,000 habitantes (Tabasco. Comisión para el Desarrollo Urbano, 1987); sin embargo, el mayor crecimiento urbano y cambios de uso de suelo ocurrió entre 1984 y 2008, y la mancha urbana se expandió pasando de 2,565 a 5,077 ha (Palomeque de la Cruz et al., 2017). En la actualidad, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), la ciudad de Villahermosa es habitada por 340,060 personas y posee una superficie estimada de 6,314 ha.

La delimitación de la zona de estudio se basó en la mancha urbana tal como se establece en la *Carta urbana de la ciudad de Villahermosa* (SOTOP, 2018) del estado de Tabasco, observable en un mosaico de imágenes satelitales PlanetScope (Planet Labs Inc., 2020) (Figura 1, delimitada por la línea negra). La ciudad de Villahermosa es la capital del estado de Tabasco, y se ubica en el municipio de Centro. Se encuentra a una altura promedio

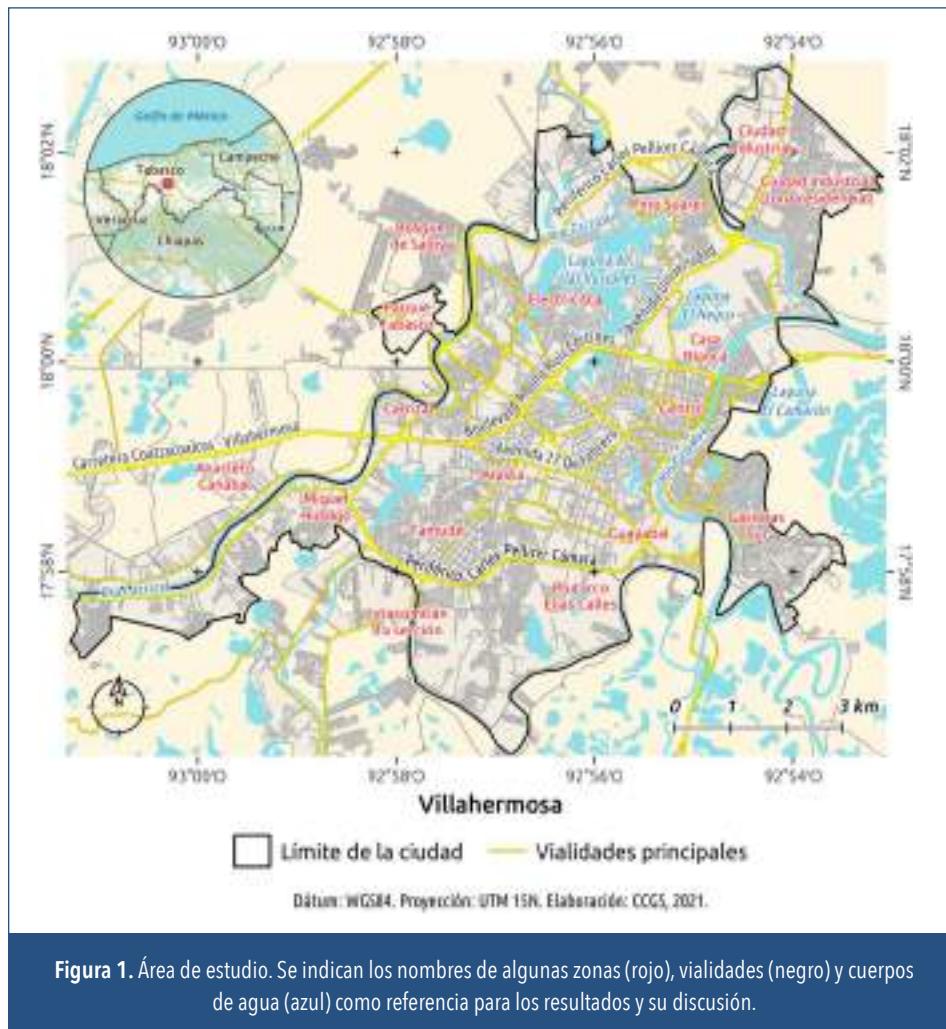
de 10 m.s.n.m. Presenta un clima cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano, una temperatura promedio anual de 27.3 °C y precipitación promedio anual de 1985.7 mm. De acuerdo al climograma histórico 1981-2010 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la temperatura máxima se reporta en el mes de mayo con 35.4 °C y el mes de enero presenta la temperatura mínima (19.5 °C), la temporada de lluvia abarca los meses de junio a noviembre, siendo septiembre el mes más lluvioso con 324.5 mm (SMN, 2021).

TABLA 1. SUPERFICIE POR TIPO DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO EN VILLAHERMOSA 1984-2008 (HA)

Categoría	1984	2000	2008
Vegetación arbórea	5,901	3,517	1,893
Humedales	2,533	2,457	2,244
Pastizal	9,192	10,699	11,239
Terrenos baldíos	465	407	203
Industria	10	64	184
Mancha urbana	Carretera	373	387
Urbano	2,182	3,124	4,458

Fuente: Palomeque de la Cruz et al. (2017).

Villahermosa se caracteriza por la presencia de ríos, como el Grijalva y sus afluentes (Samaria, Carrizal y Río Viejo), y 25 cuerpos lacustres (19 permanentes y 6 temporales), abarcando las principales lagunas urbanas una superficie de 388.3 ha (Rodríguez-Rodríguez, 2002). Su vegetación es favorecida por las condiciones climáticas, pero a la vez está en constante presión de deforestación por el cambio de uso de suelo. En términos socioeconómicos, de acuerdo con el INEGI (2020), en Villahermosa habita el 14.2 % de la población de Tabasco, presentando una densidad poblacional de 5,385 habitantes/km², con aproximadamente 40 % y 6 % de su población en pobreza y pobreza extrema, respectivamente (CONEVAL, 2015), y con un nivel de competitividad medio-bajo (IMCO, 2018).



2.2 Caracterización del entorno

Para caracterizar el entorno urbano y la periferia del área estudiada, se emplearon tres índices diferenciales derivados de imágenes satelitales: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), índice de edificación de diferencia normalizada (NDBI) e índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), derivados de imágenes PlanetScope y Sentinel 2 (Tabla 2).

TABLA 2. ÍNDICES DIFERENCIALES UTILIZADOS

Índice	NDVI	NDWI	NDBI
Fórmula	$NDVI = \frac{NIR - BR}{NIR + BR}$	$NDWI = \frac{BV - NIR}{BV + NIR}$	$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$
Referencia	Rouse et al. (1973)	McFeeters (1996)	Zha et al. (2003)
Fuente de las imágenes	PlanetScope (Planet Labs Inc., 2020)		MSI Sentinel 2 (ESA, 2020)
Clave de identificación de imágenes	L15-0494E-1127N L15-0494E-1128N L15-0495E-1127N L15-0495E-1128N		R83-T15QVV R83-T15QWV
Tipo de imagen	Mosaico compuesto mensual		Producto nivel 2A
Fecha de captura	Marzo de 2021		23 de marzo de 2021
Resolución espacial nominal	5 metros		10 metros
Resolución temporal	2 horas		15 días

NIR= banda de infrarrojo cercano; BR= banda de color rojo; BV= banda de color verde; SWIR= banda de infrarrojo de onda corta.

La selección de estos índices obedeció a la presencia de cuerpos de agua y grandes humedales en la ciudad, y a su reconocida utilidad para el estudio de las ICU (Hasanlou y Mostofi, 2015; Jami et al., 2018; Erdem et al., 2021), especialmente en ciudades de clima tropical con condiciones similares (Grover y Singh, 2015; Ghosh y Das, 2018; Kamboj y Ali, 2021). La combinación de las imágenes por satélite y el cálculo de los índices se llevaron a cabo en el *software* QGIS v.3.18 (QGIS Development Team, 2021).

Posteriormente, se usaron las imágenes PlanetScope (Planet Labs, 2020), junto con el NDVI y el NDWI para realizar una clasificación supervisada de la cobertura del suelo usando el algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) mediante el complemento dzetsaka para QGIS (Karasiak, 2019). Se consideraron cuatro categorías: vegetación arbórea, infraestructura (incluyendo suelo desnudo), cuerpos de agua y vegetación no arbórea;

utilizando 45 muestras para la última y 40 muestras para cada una de las otras, logrando un ajuste global del 98.3 % para el modelo generado por el algoritmo Random Forest.

2.3 Análisis de temperatura

Para el análisis de temperatura se realizó una búsqueda de imágenes en el satélite Landsat 8 OLI durante el 2020 que minimizaran la presencia de nubes y aerosoles, con la finalidad de favorecer la clara identificación de los rasgos de la superficie terrestre. Se utilizó la banda 10 (10.60 - 11.19 Nm) del sensor infrarrojo térmico (TIRS), la cual es útil para proporcionar la temperatura de la superficie con mayor precisión, pues se toma a 100 m de resolución espacial.

El procesamiento de las imágenes se realizó dentro de la plataforma de Google Earth Engine. Para el estudio del comportamiento temporal de la temperatura se emplearon imágenes térmicas de 2020. Para el análisis de temperatura por tipo de cobertura se utilizó una imagen con fecha del 24 de marzo de 2020. Aunque abril y mayo suelen ser los meses más calurosos, se optó por imágenes de marzo por dos razones: 1) para el año 2020 el mes de marzo presentó las condiciones más adecuadas de mínima nubosidad; y 2) en ese mes las temperaturas mantienen una tendencia creciente en la zona estudiada.

2.4 Cálculo de la temperatura de la superficie terrestre

Este cálculo se realizó de acuerdo con lo planteado por Avdan y Janovovska (2016):

Cálculo de TOA (top of atmosphere reflectance)

La reflectancia en la parte superior de la atmósfera se calculó con la ecuación 1:

$$TOA = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i \quad (1)$$

Donde: M_L = factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda; Q_{cal} = corresponde a la banda 10; A_L = factor de reescalamiento aditivo

específico de la banda; y O_i = corrección de la banda 10. Los valores se encuentran en el metadato de la imagen.

Temperatura de brillo

La banda obtenida por el sensor TIRS se convirtió a temperatura de brillo en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) mediante la Ecuación 2, usando para ello la constante térmica obtenida a partir del archivo de metadatos.

$$BT = \left(\frac{K2}{\ln[(\frac{K1}{L\lambda}) + 1]} \right) - 273.15 \quad (2)$$

Donde: $K1$ y $K2$ = constantes de conversión específicas para la banda 10 respectivamente. $L\lambda$ = reflectancia en el techo de la atmósfera TOA (Watts/ $(\text{m}^2 * \text{srad} * \mu\text{m})$); para obtener los resultados en grados Celsius, la temperatura radiante se suma al cero absoluto (aprox. -273.15).

Cálculo de NDVI

En primer lugar, se calcula el NDVI a partir de la ecuación mostrada en la Tabla 2; con este se calcula la proporción de la vegetación, y está muy relacionado con la emisividad (ε).

Proporción de la vegetación

La proporción de vegetación (Pv) se obtuvo con la Ecuación 3:

$$Pv = \left(\frac{(NDVI - NDVI_s)}{(NDVI_v - NDVI_s)} \right)^2 \quad (3)$$

Donde: $NDVI$ = el brillo del píxel; $NDVI_v$ = valor de la vegetación; y $NDVI_s$ = valor del suelo desnudo.

Emisividad de la superficie terrestre (LSE(ε))

Para calcular la temperatura de la superficie terrestre, como primer paso se calculó la eficiencia de transmisión de energía térmica del suelo a la atmósfera, con la Ecuación 4:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{\nu\lambda} P_\nu + \varepsilon_{s\lambda} + (1 - P_\nu) + C_\lambda \quad (4)$$

Donde: $\varepsilon_{\nu\lambda}$ y $\varepsilon_{s\lambda}$ son las emisividades de la vegetación y del suelo, respectivamente, y C_λ representa la rugosidad de la superficie ($C = 0$ para superficies homogéneas y planas), tomado como valor constante de 0,005. Los valores de la constante de emisividad se encuentran en el metadato.

$$\varepsilon_\lambda \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_s \lambda, NDVI < NDVI_S, \\ \varepsilon_v \lambda P_V + \varepsilon_s \lambda (1 - P_V) + C, NDVI_S \leq NDVI \leq NDVI_V, \\ \varepsilon_s \lambda + C, NDVI > NDVI_V \end{array} \right\} \quad (5)$$

Los valores del NDVI menores a 0 se consideraron como agua y se les asignó el valor de emisividad de 0.991. Los valores NDVI entre 0 y 0.2, se consideraron como suelo, y se les asignó un valor de emisividad de 0,996.; los valores entre 0.2 y 0.5 se consideraron mezclas de suelo y vegetación y se les asignó un valor de emisividad de 0.962. Cuando el valor NDVI fue superior a 0.5 se consideró cubierto de vegetación y se le asignó una emisividad de 0.973.

Para obtener la temperatura de la superficie terrestre (TST) corregida por emisividad en °C se calculó de acuerdo a la Ecuación 6:

$$T_{ST} = \frac{BT}{\{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\rho} \right) \ln(\varepsilon\lambda) \right]\}} \quad (6)$$

Donde: BT = Ecuación 2 (°C); λ = longitud de onda de la radiancia emitida, para la cual la respuesta máxima y el promedio de la longitud de onda límite es $\lambda = 10.895$; $\varepsilon\lambda$ = la emisividad calculada en Ecuación 4, y ρ es:

$$p = h \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} mK, \quad (7)$$

Donde: h = constante de Planck (6.626×10^{-34} J s), c = velocidad de la luz (2.998×10^8 m/s) y σ = constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

2.5 Análisis exploratorio geoestadístico de elementos del entorno y temperatura

Se generó una matriz de diez mil puntos aleatorios dentro del área de estudio, y se obtuvieron para cada uno la temperatura, los índices, y la presencia de vegetación arbórea y de infraestructura. Luego se calculó la I de Moran (IM) global para la temperatura y los indicadores locales de asociación espacial (LISA) (Anselin, 1995) entre los elementos del entorno urbano y la temperatura superficial. El propósito de las dos pruebas es identificar patrones espaciales explícitos que verifiquen la existencia del efecto ICU, el resultado puede estar entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican la presencia de clústeres o aglomeración de valores similares (altos con altos y bajos con bajos), los valores cercanos a -1 indican aglomeración de valores dispares (altos con bajos) y los valores cercanos a cero indican una distribución espacial aleatoria (Celemín, 2009). El análisis se realizó con el software GeoDa v.1.18 (Anselin et al., 2006), y como umbral de distancia para establecer la vecindad entre puntos se empleó la distancia mínima (167.2 m) para asegurar que ninguno quedara aislado.

2.6 Análisis del impacto social

Una vez identificadas y caracterizadas las zonas afectadas por el efecto ICU, se incorporaron un conjunto de indicadores sociales que permitieran identificar el impacto de dicho efecto en la vulnerabilidad y resiliencia social. La información se tomó del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020), a nivel de manzana censal, considerando los indicadores que se muestran en la Tabla 3, y solo para las manzanas con viviendas particulares habitadas.

El nivel de estudios se relaciona, no sin polémica, con un mayor ingreso según la teoría del capital humano (de la Garza y Villezca, 2008; Abdullah et al., 2013; Battistón et al., 2014), y lo mismo puede esperarse del mayor número de integrantes económicamente ocupados dentro de la vivienda. Las variables etarias corresponden a los grupos más vulnerables a afecciones asociadas a las ICU, como deshidratación, golpes de calor e insolación (Sánchez-Guevara et al., 2017); la ausencia de servicios dentro de la

TABLA 3. INDICADORES SOCIOECONÓMICOS INCLUIDOS A NIVEL DE MANZANA

Variable	Descripción
graproes	Grado promedio de escolaridad.
prom_ocup	Promedio de ocupantes por vivienda.
denspob	Densidad de población.
p_0a11	Personas de 0 a 11 años de edad.
pob65mas	Personas de 65 a 130 años de edad.
r_vph_piso	Proporción de "viviendas con piso de cemento o firme, madera, mosaico u otro material", respecto al total de viviendas en la manzana.
r_vph_c_se	Proporción de "viviendas que tienen energía eléctrica, agua entubada dentro o fuera de la vivienda, pero dentro del terreno, así como drenaje", respecto al total de viviendas en la manzana.
r_pocupada	Proporción de la población "de 12 a 130 años de edad que trabajaron o que no trabajaron, pero sí tenían trabajo en la semana de referencia", respecto al total de habitantes de la manzana.

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020).

vivienda o de un piso de material distinto a la tierra son indicadoras del grado de marginación social, y la densidad de población y los ocupantes por vivienda son un indicador del grado de hacinamiento y de marginación (CONEVAL, 2021).

Para analizar las diferencias en el comportamiento de las temperaturas en el año 2020 entre los meses se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) de una vía y prueba de Pots Hoc HSD de Tukey. Cuando los datos de las variables no presentaron una distribución normal, se utilizaron pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Man-Whitney.

Para analizar las asociaciones entre las condiciones socioeconómicas a nivel manzana (Tabla 3), se efectuó un análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) en el software R v.4.03 con el paquete Vegan (Oksanen et al., 2016). Para identificar los ejes significativos del PCA y las variables que contribuyen más a la ordenación, se utilizó el paquete BiodiversityR (Kindt, 2020). Posteriormente, se hicieron correlaciones de Pearson entre los ejes seleccionados del PCA con la tempe-

ratura promedio superficial, los índices NDBI, NDVI y NDWI, y con el porcentaje de superficie de cada manzana que fue clasificado como infraestructura.

Para analizar la posible relación espacial entre la temperatura y las variables socioeconómicas, se calcularon los LISA para identificar la presencia de puntos calientes en donde la concurrencia de la temperatura superficial promedio por manzana y alguna variable social puedan dar indicios de la mayor o menor vulnerabilidad de la población al efecto ICU. El análisis LISA bivariante para la temperatura y las variables sociales se presenta dividiendo estas últimas en dos grupos: 1) favorables, cuyos valores aumentan conforme se reduce la vulnerabilidad y el grado de marginación, y 2) desfavorables, cuando su aumento se corresponde con el aumento de la vulnerabilidad social y la marginación. Es importante mencionar que los LISA reflejan las condiciones locales y relativas que revelan clústeres o aglomerados de observaciones espaciales que conjugan los valores de las dos variables evaluadas (Anselin, 1995), por lo que un mismo valor de temperatura puede formar parte de un clúster alto cuando se analiza junto a una variable social y bajo cuando se asocia a otra.

En adelante se omite la mención de la temperatura superficial, ya que siempre es una de las dos variables que forman parte de los LISA. No obstante, debe recordarse que la interpretación de las variables sociales es siempre en conjunción con la temperatura. El cálculo se efectuó en el *software* GeoDa v.1.18 (Anselin et al., 2006), y se generó la matriz de vecindad utilizando la distancia mínima (167.2, 325.05 m) para asegurar que ninguna manzana estuviera aislada.

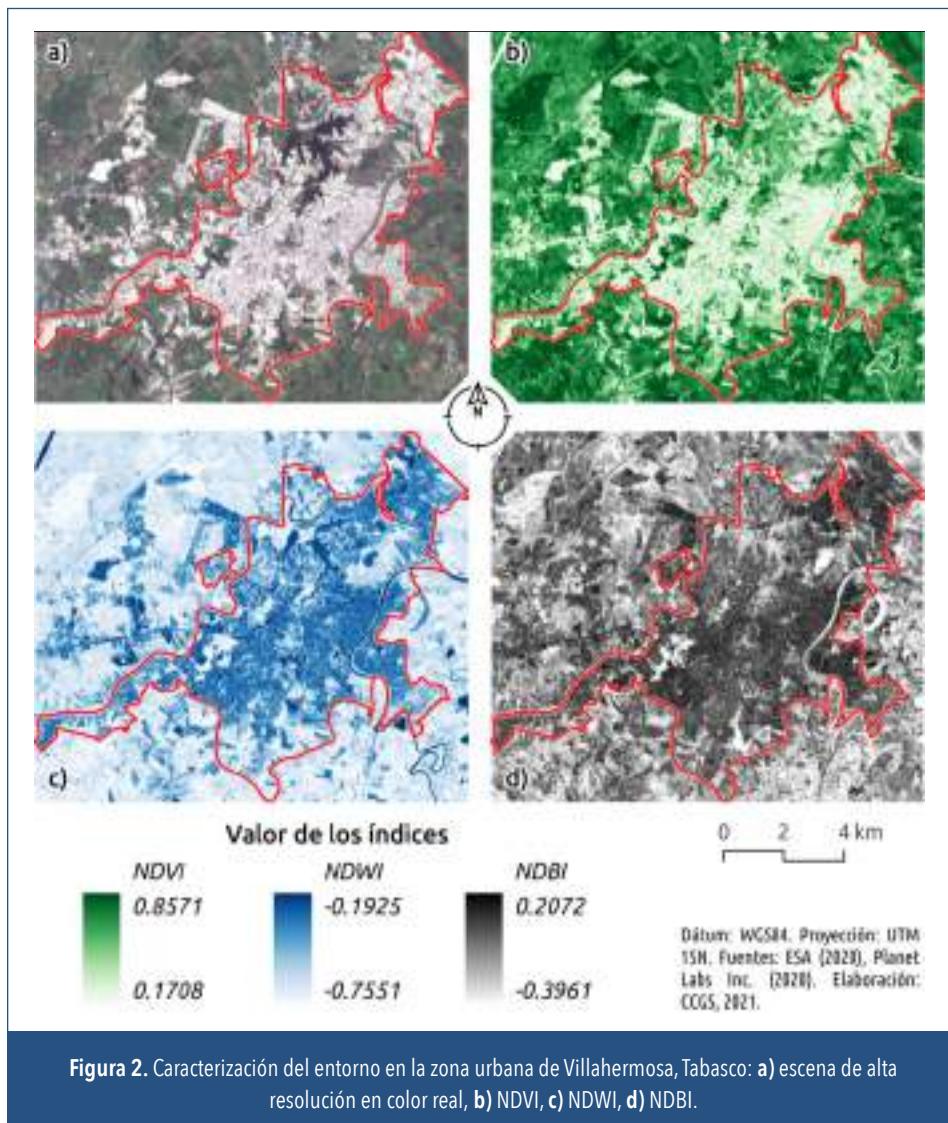
3 RESULTADOS

3.1 Caracterización del entorno

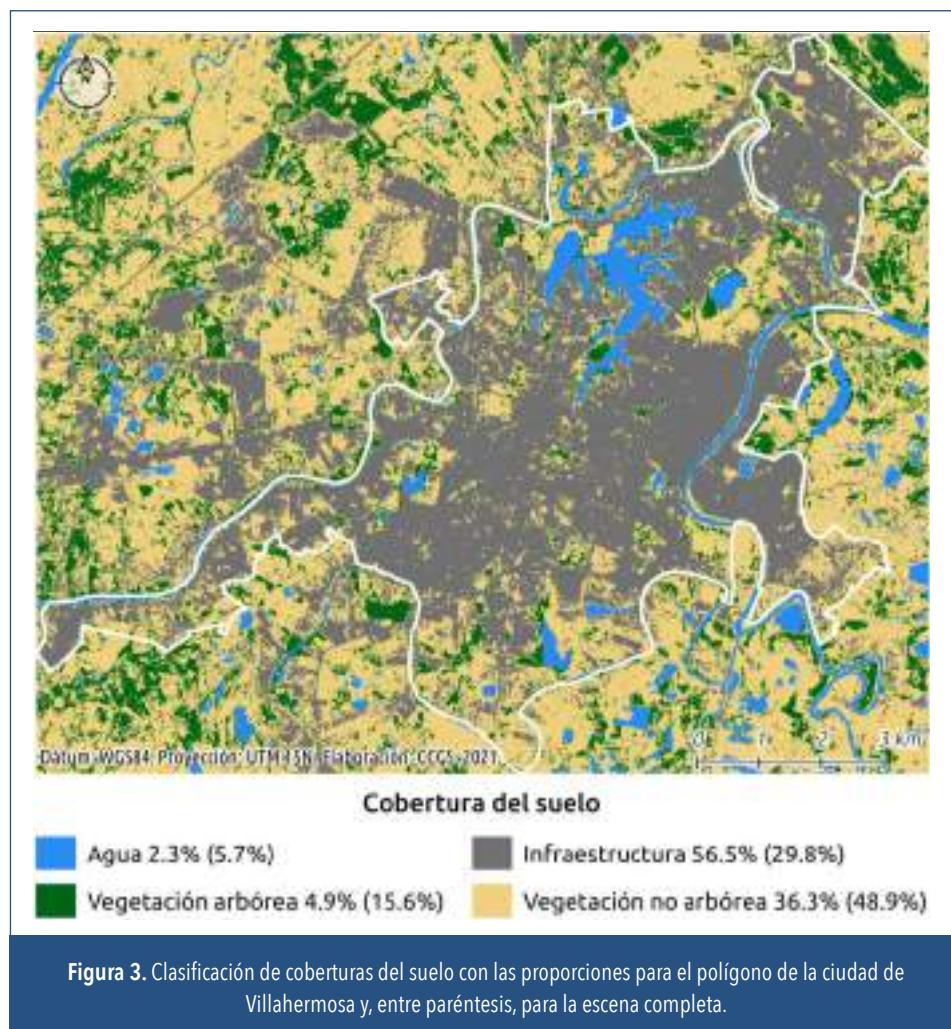
La ciudad de Villahermosa puede apreciarse en color real en la Figura 2a. Las áreas de vegetación densa, ya sea arbórea o de humedal, se observa con colores verde más intenso en la imagen del NDVI (Figura 2b); los cuerpos de agua como lagunas, charcas y ríos corresponden a los manchones azules

más oscuros en la imagen del NDWI, mientras que en tonos más claros se observa la vegetación (Figura 2c). Finalmente, el índice NDBI muestra las colonias con mayor densidad de construcción en tonalidades más oscuras de gris (Figura 2d).

La clasificación de cobertura del suelo mostró que, considerando toda la escena, es decir, la ciudad de Villahermosa y sus alrededores, la vegeta-



ción no arbórea es la cobertura predominante, ya que incluye, entre otros, los pastizales y la vegetación hidrófita, ambos sumamente abundantes en el paisaje tabasqueño (48 % y 17.3 %, respectivamente, según la serie VI del INEGI, 2017). Sin embargo, dentro del polígono de la ciudad de Villahermosa la infraestructura es la cobertura predominante, abarcando más del 56 % de la superficie, seguida de la vegetación no arbórea (Figura 3). Aunque en la ciudad el agua constituye solo el 2.3 % de la cobertura, se concentra en pocos cuerpos de agua, algunos de gran extensión, resaltando



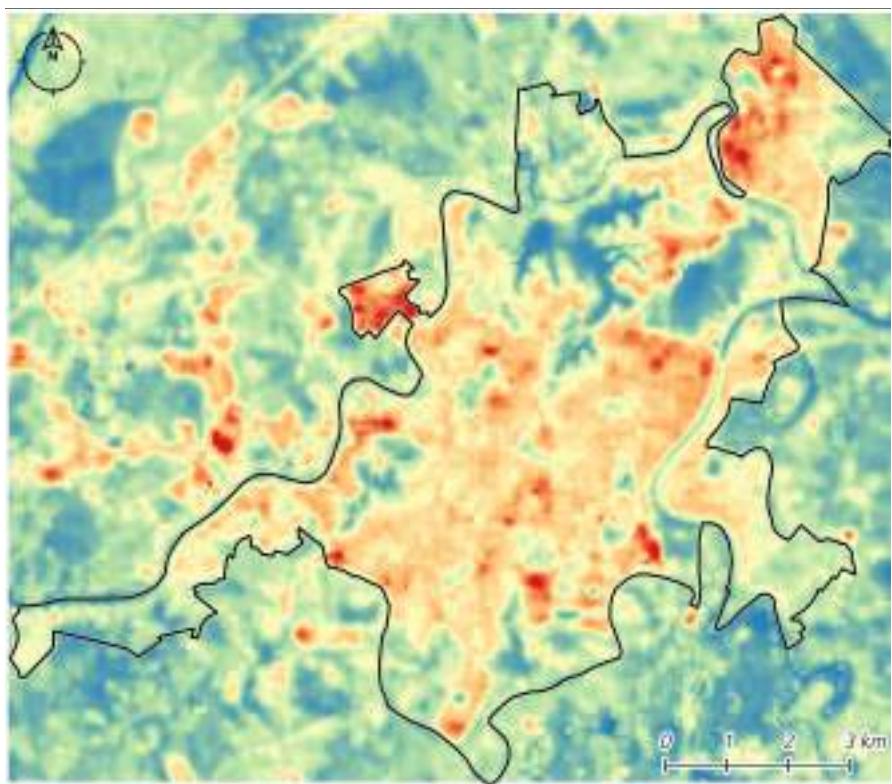
la Laguna de las Ilusiones y los ríos Carrizal y Grijalva (Figuras 1 y 3). Finalmente, la cobertura de vegetación arbórea dentro de la ciudad es muy escasa y altamente fragmentada, concentrada en algunos parques urbanos como el Museo La Venta (Figura 3).

3.2 Análisis de temperatura

La variación de temperatura para la escena analizada es de 4.9 °C (Figura 4), con una temperatura promedio de 29.3 °C. En cuanto a la distribución de la temperatura superficial, se observan diferentes tipos de zonas frías. Aquellas con formas alargadas, delgadas y sinuosas corresponden a los ríos Carrizal y Grijalva (ver topónimos en Figura 1), mientras que los polígonos más grandes corresponden a la Laguna de las Ilusiones y la Laguna el Negro. Por el contrario, las zonas más calientes se ubican en el extremo noreste de la mancha urbana, y corresponden a Ciudad Industrial; las de la parte central corresponden a zonas comerciales en las zonas Centro, Carrizal, Plutarco E. Calles, Guayabal y Parque Tabasco. El punto más caliente de la escena se ubica fuera de la mancha urbana al oeste de esta misma, y corresponde a un parque industrial en la zona de Anacleto Canabal.

3.3 Comportamiento de la temperatura por tipo de cobertura

Durante el año 2020 se pudo observar que el comportamiento de la temperatura en la cobertura de infraestructura presentó diferencias significativas entre los meses del año ($P < 0.05$), sin embargo, los meses con mayor temperatura (febrero, abril y mayo) no presentaron estas diferencias ($P = 0.567, 0.284$). Asimismo, con excepción de los meses de enero, octubre y diciembre, la cobertura de infraestructura mantiene una temperatura por encima de las demás superficies, seguida de la vegetación no arbórea. En lo que respecta a los cuerpos de agua, la temperatura se mantiene baja con respecto a las coberturas infraestructura y vegetación no arbórea, con un ligero incremento en el mes de octubre (Figura 5). Por otra parte, la cobertura arbórea presentó un mayor incremento en temperatura en los meses de octubre y diciembre respecto a los demás meses ($P < 0.05$).



Datum: WGS84. Proyección: UTM 15N. Fuente: USGS (2020). Elaboración: CCGS, CentroGeo; 2021.

Figura 4. Distribución de la temperatura superficial para el 24 de marzo de 2020 en la zona urbana de Villahermosa, Tabasco.

La comparación de las temperaturas superficiales para el mes de marzo de 2020 y por tipo de cobertura (Figura 6) mostró que la temperatura es mayor en la infraestructura que en los cuerpos de agua, vegetación no arbórea y vegetación arbórea ($P < 0.005$). La temperatura en los cuerpos de agua no fue diferente de la asociada con la vegetación no arbórea, pero sí de la asociada con vegetación arbórea ($P = 0.116, 0.005$). Entre la temperatura de la vegetación no arbórea y arbórea no hubo diferencias significativas ($P = 0.657$).

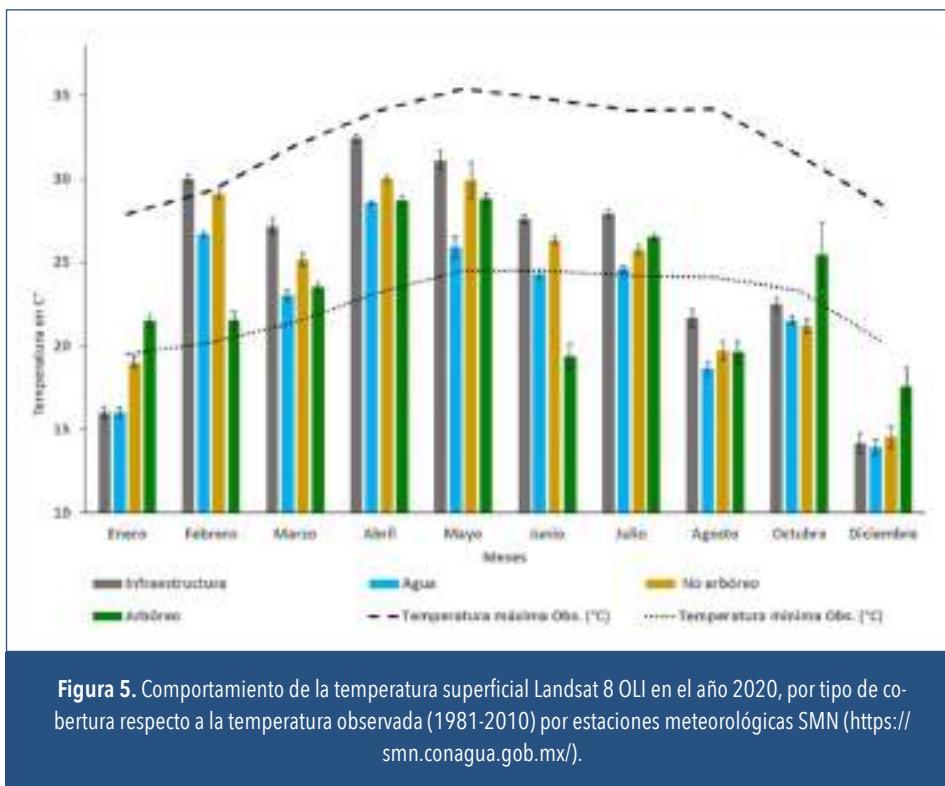


Figura 5. Comportamiento de la temperatura superficial Landsat 8 OLI en el año 2020, por tipo de cobertura respecto a la temperatura observada (1981-2010) por estaciones meteorológicas SMN (<https://smn.conagua.gob.mx/>).

3.4 Análisis exploratorio geoespacial entre elementos de entorno y temperatura superficial

El análisis univariado de la temperatura dio como resultado una IM global de 0.821, indicando una fuerte agregación espacial de los valores altos de temperatura, por un lado, y de los valores bajos por otro, confirmando la existencia de la ICU. En concordancia con esto, los análisis bivariados (Figura 7) indican una importante relación espacial inversa entre el NDVI y la temperatura, y una relación directa para la presencia de infraestructura con los mayores valores (IM = -0.578 e IM = 0.560, respectivamente), mostrando un posible efecto causal del ICU observado. Esto quiere decir que los valores altos de temperatura se asocian espacialmente a valores bajos de NDVI y a la presencia de infraestructura. El NDWI y el NDBI también tienen una rela-

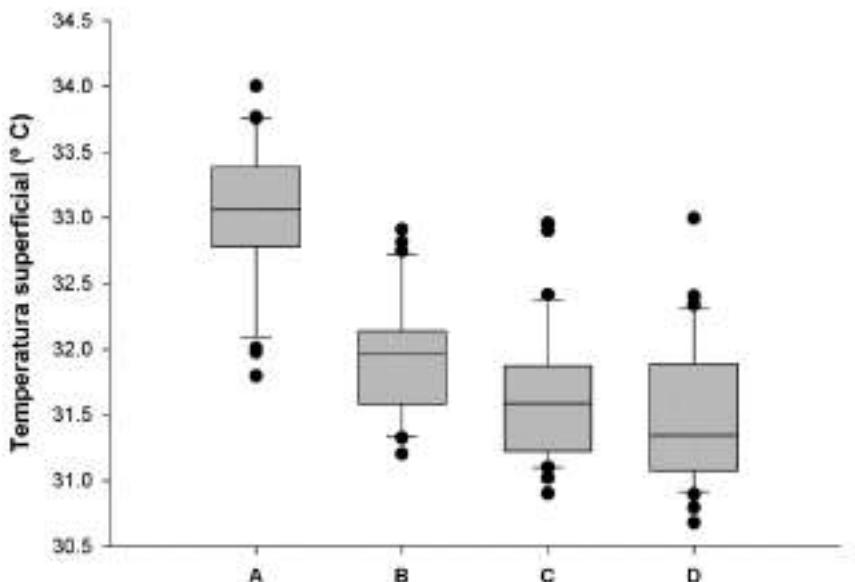
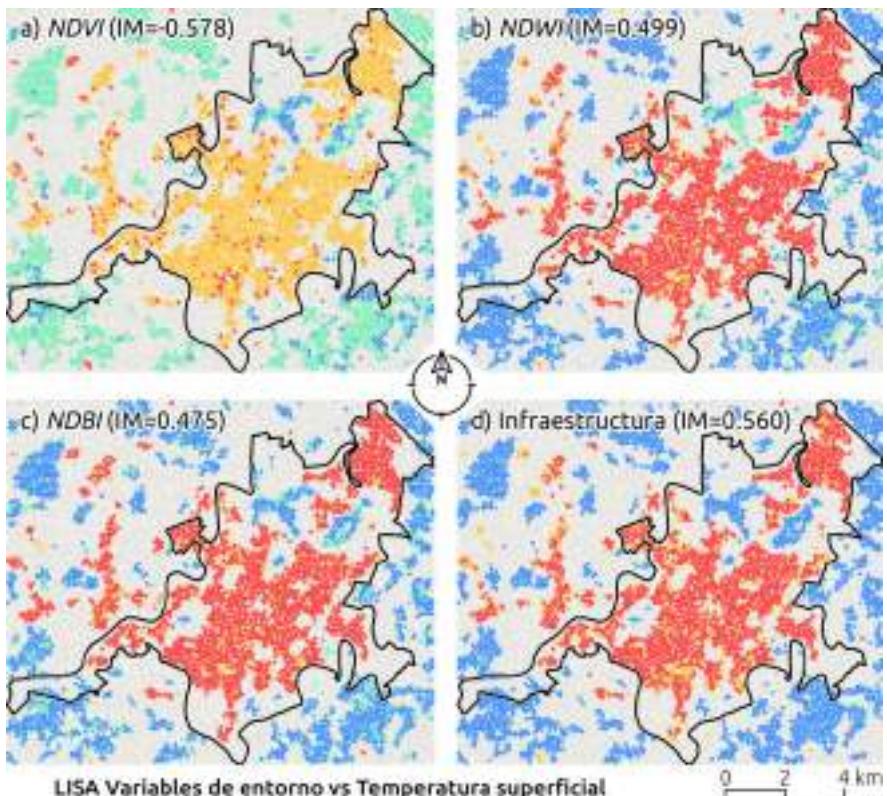


Figura 6. Temperatura de la superficie por tipo de cobertura: **A**, Infraestructura; **B**, cuerpos de agua; **C**, vegetación no arbórea; **D**, vegetación arbórea. Información obtenida de imagen Landsat (LTS), 24 de marzo de 2020.

ción positiva con la temperatura, pero de menor intensidad (respectivamente: IM = 0.499, e IM = 0.475). El valor menos relevante lo obtiene la presencia de cobertura arbórea (IM = -0.241), por lo que se descartó para el resto de los análisis. En todos los casos, se obtuvo una pseudosignificancia menor a 0.5. Los cuatro mapas en la Figura 7 muestran la formación de clústeres de temperatura alta en la mancha urbana y clústeres de temperatura baja en los grandes cuerpos de agua y en las zonas con vegetación (Figura 2).

3.5 Relación entre condiciones de temperatura e índices con variables socioeconómicas a nivel de manzana, sin considerar su relación espacial

El análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) se muestra en la Figura 8. De acuerdo con el *screeplot* se seleccionaron



LISA Variables de entorno vs Temperatura superficial

0 2 4 km

- Variable alta - Temperatura alta
- Variable baja - Temperatura baja
- Variable baja - Temperatura alta
- Variable alta - Temperatura baja
- No significativo

Dárum: WGS84. Proyección: UTM 15N.
Elaboración: CCGS, CentroGeo; 2021.

Figura 7. LISA entre las variables caracterizadoras del entorno y la temperatura superficial.

únicamente los tres primeros ejes, que explican el 61.96 % de la variación en las características socioeconómicas de las manzanas censales. De estos, solo los ejes 2 y 3 difieren del modelo nulo. El primer eje separa aquellas manzanas con condiciones socioeconómicas más favorables (mayor proporción de población con trabajo, más viviendas con servicios y piso de algún material, y más población con mayor grado de escolaridad) de las

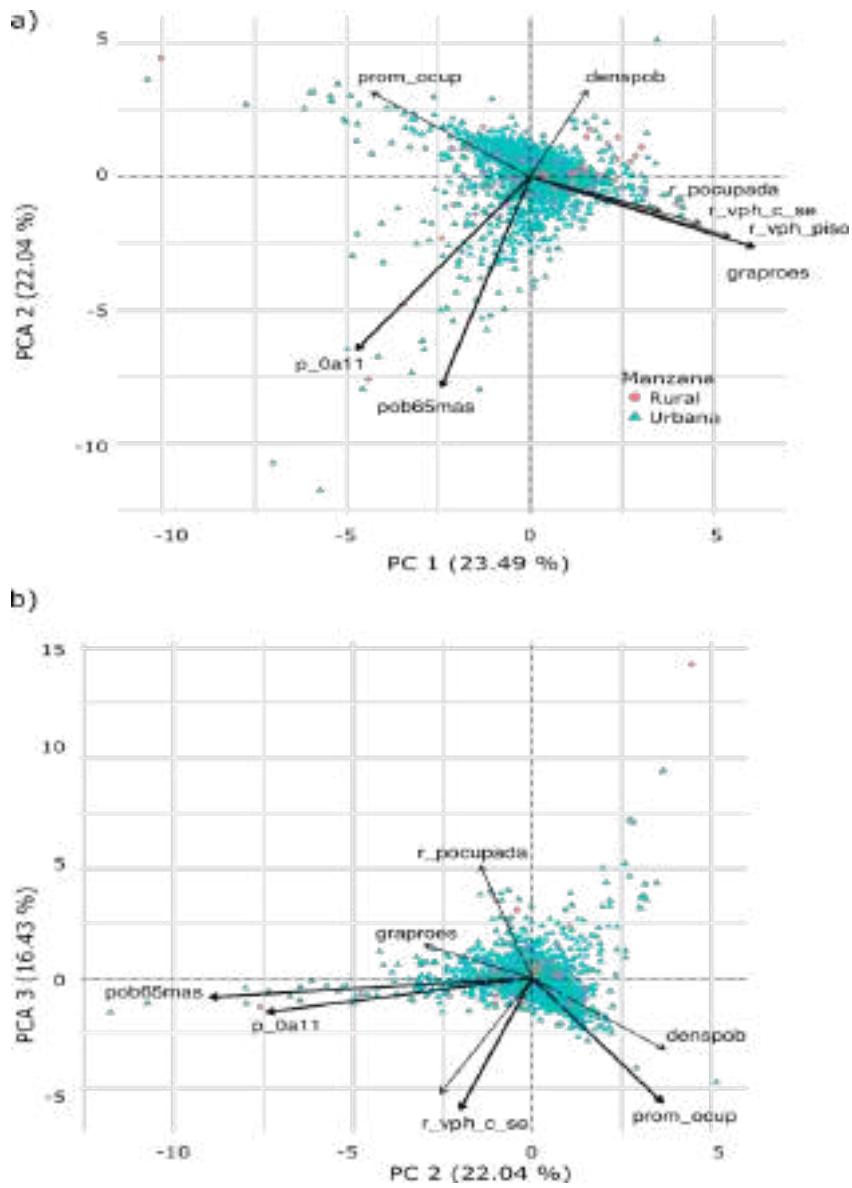


Figura 8. PCA de las variables socioeconómicas por manzana censal. a) Primer y segundo eje. b) Segundo y tercer eje. Las variables que contribuyen más en la ordenación de cada gráfico se muestran con flechas más gruesas.

que tienen condiciones menos favorables en esos rubros. El segundo eje principal muestra que las manzanas con mayor densidad de población y número de ocupantes en promedio por casa tienen menos habitantes en grupos vulnerables, es decir, mayores de 64 años y menores de 12 años. Finalmente, el eje 3 separa las manzanas con mayor promedio de ocupantes por vivienda y servicios de las manzanas donde predominan casas con mayor proporción de población ocupada.

En general, los ejes mostraron una baja correlación con la temperatura e índices (Figura 9). La mayor correlación se obtuvo entre el primer eje principal y la temperatura ($r = 0.34$). Las correlaciones del primer eje muestran que una porción de las manzanas con mayor proporción de población ocupada, con mayor grado de escolaridad y con más viviendas con servicios y piso, tienen una temperatura superficial más alta, una menor presencia de vegetación arbórea (correlación negativa con el NDVI) y un mayor porcentaje de infraestructura (Figura 9).

Las correlaciones del segundo eje muestran que una porción de las manzanas con mayor promedio de ocupantes por vivienda tiende a una menor presencia de vegetación arbórea y una mayor presencia de elementos construidos. Las correlaciones del tercer eje, las más bajas, indican que algunas de las manzanas con la mayor proporción de población con empleo tienen más vegetación arbórea (correlación positiva con NDVI) e infraestructura (Figura 9). Tanto el eje 2 como el 3 muestran una asociación negativa significativa con la temperatura, pero esta es marginal. Las correlaciones de los ejes con el NDWI deben tomarse con cautela, pues valores mayores no solo se asocian con cuerpos de agua, sino también con la reflectividad de los materiales de construcción, que dan una respuesta casi tan intensa como el agua.

3.6 Indicadores de asociación espacial local entre temperatura superficial por manzana y variables sociales

El análisis LISA entre las variables socioeconómicas con la temperatura superficial muestra diferentes áreas de la mancha urbana con vulnerabilidades; sin embargo, siempre tienden a concentrarse en la porción central y sobre todo sur de la mancha urbana (Figuras 10 y 11). En cambio, la

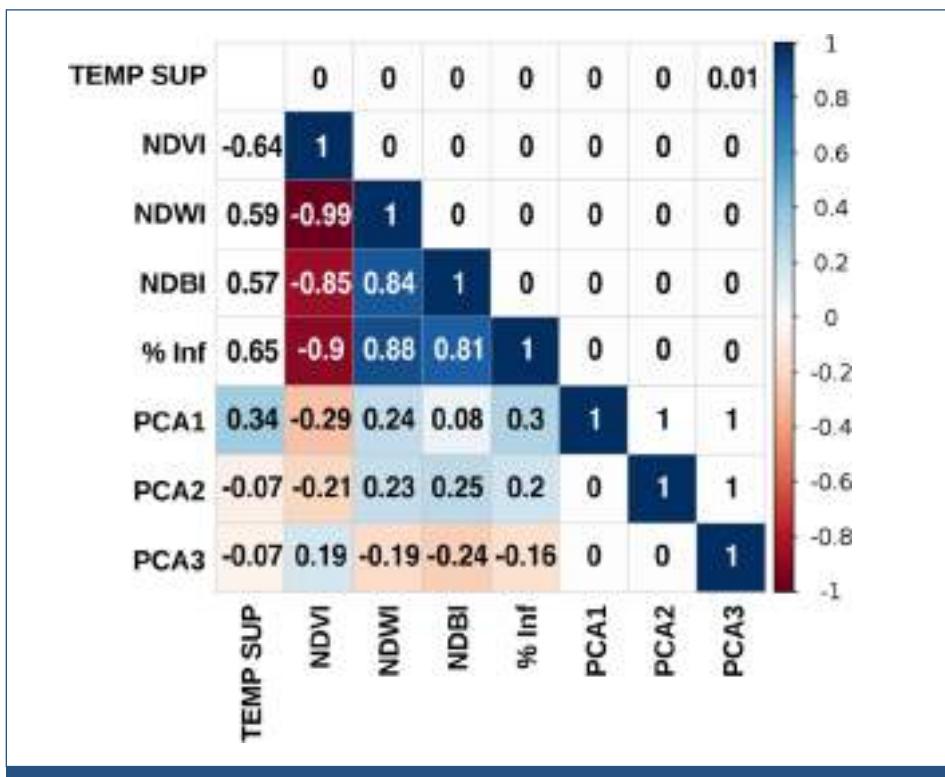


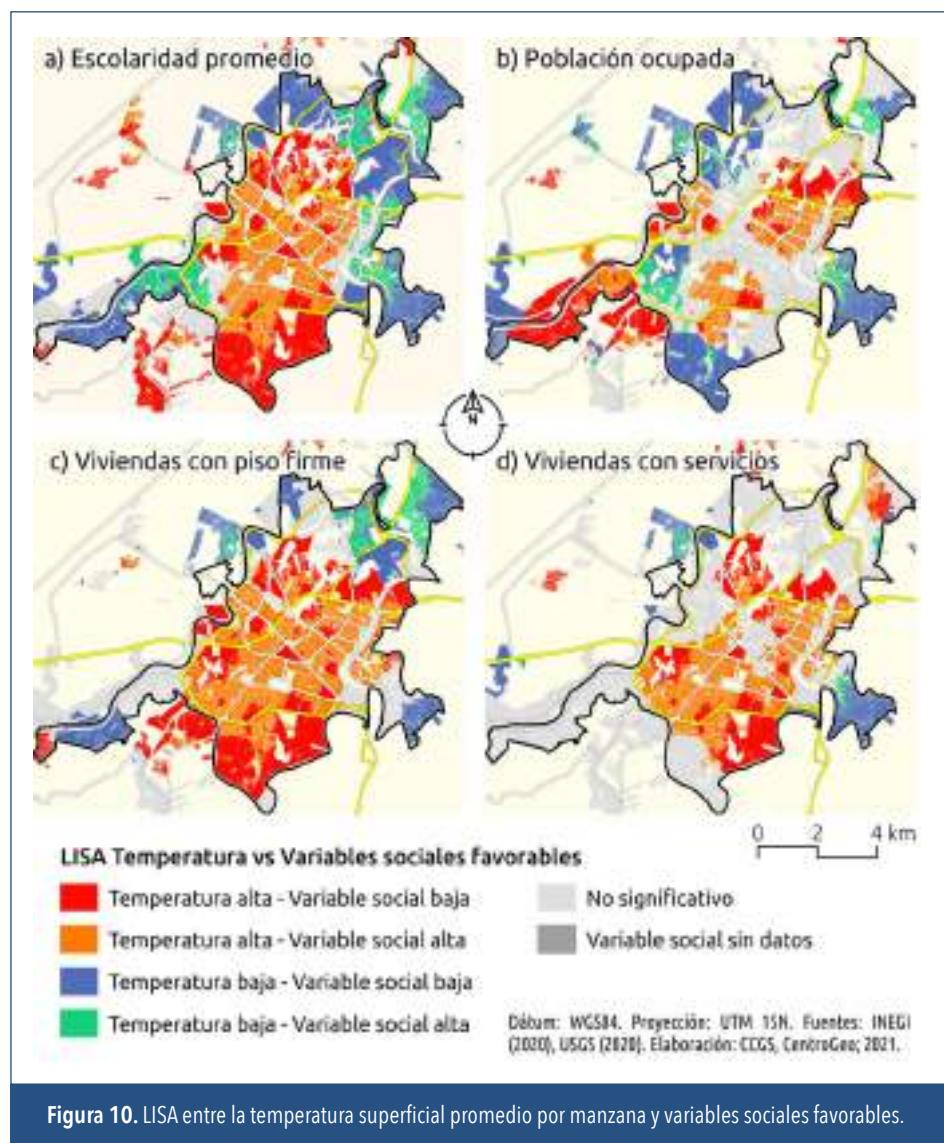
Figura 9. Correlaciones de Pearson entre los ejes 1 a 3 del PCA con la temperatura superficial, los índices diferenciales y el porcentaje de infraestructura. La parte inferior de la matriz (con color) muestra los coeficientes de correlación (r); y la superior, los valores de p . Los ejes del PCA no tienen correlación entre sí, pues por definición son ortogonales.

periferia de la ciudad, con menos infraestructura y más vegetación, tiene condiciones más favorables. En todos los casos se manejó una pseudosignificación menor a 0.5.

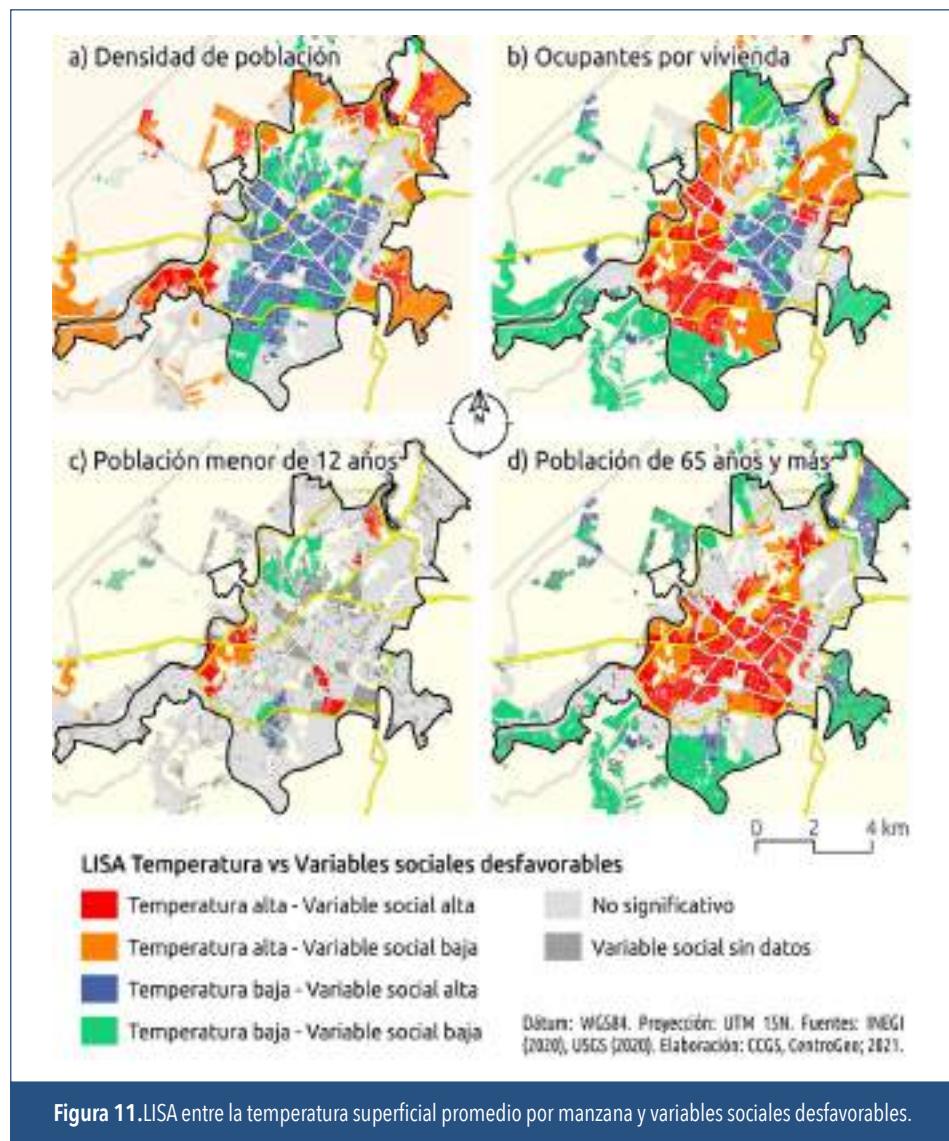
Las áreas vulnerables que se ubican al sur de la ciudad (zonas entre Ixtacomitán 1^{ra} sección y Plutarco E. Calles, Figura 1) y en una franja en el centro norte (desde la colonia Electricista hacia la colonia Casa Blanca) coinciden con una baja escolaridad promedio y baja proporción de viviendas con piso firme y con acceso a servicios públicos (color rojo en Figura 10a, 10c y 10d, respectivamente). Esta última zona corresponde a una de las áreas con mayor temperatura de la ciudad (Figura 4), además de ser un clúster con temperatura alta y una baja proporción de población ocupada

(Figura 10b). Por el contrario, solo dos sitios de la mancha urbana presentan condiciones favorables para los cuatro indicadores (color verde al norte en Figura 10, en Bosque de Saloya y la zona residencial de Ciudad Industrial).

En la Figura 11, las condiciones más desfavorables ocurren entre el pro-



medio de ocupantes por vivienda y la población de 65 años y más (Figura 11b y 11d, respectivamente), con el mayor foco de atención en la zona centro-suroeste de la ciudad: zonas de Tamulté y Atasta. También es importante señalar que una gran porción al interior de la ciudad presenta clústeres de alta temperatura y proporción de personas de la tercera edad.



Respecto a la densidad de población (Figura 11a), los clústeres alto-alto se ubican en las zonas más externas de la ciudad: Ciudad Industrial, Gaviotas Sur, Miguel Hidalgo; y son las mismas que presentaron un NDBI alto (Figura 2d). En el caso de la población menor de 12 años de edad (Figura 11c), los clústeres de cualquier tipo son escasos, lo que indica que la distribución espacial de esta variable, respecto a la temperatura superficial, no presenta patrones estadísticamente significativos.

4 DISCUSIÓN

Nuestros resultados señalan claramente la existencia de un efecto ICU sobre la mancha urbana de Villahermosa, así como una elevada relación entre los elementos de la escena estudiada con la temperatura superficial, resultado que reafirma lo señalado por la literatura (Hasanlou y Mostofi, 2015; Grover y Singh, 2015; Ghosh y Das, 2018; Jami et al., 2018; Kamboj y Ali, 2021; Erdem et al., 2021): el efecto ICU está altamente correlacionado con la cobertura, con la mayor disminución asociada a la vegetación arbórea (NDVI), y su mayor incremento con la presencia de elementos construidos (infraestructura), en concordancia con lo reportado por Cervantes-Pérez et al., (2000) para la ciudad de Villahermosa. Por el contrario, en la Figura 5 se observa que la vegetación arbórea mantiene temperaturas más altas que las otras coberturas durante los meses más frescos (diciembre, enero): probablemente esto se deba a que la vegetación arbórea, con follajes densos, puede mantener altas tasas fotosintéticas en esos meses en los que hay una combinación de agua disponible y menores temperaturas. Parte de la energía no absorbida por la clorofila es emitida como calor, lo que podría explicar una alta temperatura de sus tejidos y del aire altamente húmedo que las rodea. Sin embargo, esto requiere de un estudio puntual.

La elevada autocorrelación positiva de la temperatura con el NDWI, en primera apariencia, puede indicar un efecto opuesto al reportado para distintas ciudades sobre la relación inversa entre temperatura y humedad relativa (Ibrahim y Samah, 2011; Singh y Grover, 2015), y que en Villahermosa registran valores más bajos de humedad en las zonas comerciales y más altos en los cuerpos de agua (Cervantes-Pérez et al., 2000); no obstante,

el mapa de clústeres de la Figura 9b permite verificar que a los cuerpos de agua les corresponden clústeres de índice alto y temperatura baja. Además, los valores relativamente altos del índice sobre los elementos construidos (Figura 2c) a los que corresponden temperaturas altas, y que promueven la elevada IM, pueden atribuirse al complejo comportamiento espectral de estos materiales, que muestran colores claros (Figura 2a) y suelen tener una reflectancia mayor a la del agua en el rango espectral usado para el cálculo de este índice (Yao et al., 2015; Li et al., 2016).

El uso del NDBI como indicador de los elementos construidos es frecuente en el estudio de las ICU (Hasanlou & Mostofi, 2015; Jami et al., 2018; Kamboj & Ali, 2021; Erdem et al., 2021). Sin embargo, el uso de la presencia o ausencia de la infraestructura (según la clasificación de coberturas) muestra una mayor correlación estadística y geoestadística con la temperatura superficial. En particular, se espera este comportamiento debido a que se trata del resultado de la clasificación, que representa un nivel adicional de síntesis de la información contenida en la imagen satelital en comparación con el NDBI.

Una observación importante que resulta del análisis visual del mapa de temperatura superficial (Figura 4) es la confluencia en las áreas más calientes de zonas industriales, así como de centros comerciales, incluyendo el principal mercado de la ciudad y bodegas; todos caracterizados por infraestructuras y estacionamientos de asfalto que ocupan un gran espacio que absorbe la mayor parte de la radiación solar. Estas observaciones coinciden con las de Cervantes-Pérez et al. (2000), quienes reportan que el efecto ICU en Villahermosa coincide con las zonas comerciales de la ciudad. Esto genera una nueva pregunta sobre esta relación tan estrecha: ¿son los recubrimientos de estos establecimientos o el uso de equipos industriales de refrigeración y climatización los que provocan estos focos de calor? En la literatura se sostiene que ambos potencian el efecto ICU (de Munck et al., 2013; Magli et al., 2016; Liu et al., 2020; Lemoine-Rodríguez et al., 2021) Sin embargo, la falta de acceso a datos económicos (materiales de construcción, consumo eléctrico, equipos de refrigeración) impidió extender el estudio en este sentido.

Al asociar las condiciones socioeconómicas con la cobertura y temperatura, diversos estudios han observado una mayor mortalidad relacionada

con el calor extremo en las zonas urbanas con poca cobertura vegetal, las cuales suelen ser más evidentes en las comunidades urbanas con un menor ingreso (Limaye et al., 2018; Rosenthal & Brechwald, 2013; Donaldson et al., 2003). Debido a que en México existe una tendencia hacia desarrollos habitacionales horizontales más densos y con menos áreas verdes cuando se trata de infraestructura de menor valor en el mercado, planteamos la hipótesis de que el nivel socioeconómico de la población se relacionaría de forma inversa con la temperatura registrada en la ciudad. Sin embargo, a partir del análisis del PCA encontramos evidencia contraria a nuestra hipótesis. Aunque en Villahermosa existe una alta heterogeneidad en las condiciones socioeconómicas de las manzanas, es interesante observar que una proporción de ellas con las mejores condiciones socioeconómicas (reflejado como una alta proporción de la población con empleo, pisos y servicios en viviendas, y alto nivel educativo, eje 1) y otras con alta densidad de ocupantes y poca población vulnerable (eje 2) se asocian a un alto porcentaje de construcción y escasa presencia de vegetación. En ciudades tropicales como Villahermosa, condiciones como las descritas incrementan la temperatura, que junto con la elevada humedad relativa reducen la tasa de evaporación de humedad del cuerpo humano, principal vía de enfriamiento, lo que genera malestar térmico (Wong & Chen, 2009; Coffel et al. 2017). Esto coincide con estudios como el de Cervantes-Pérez et al. (2000), en el que las zonas de alta densidad poblacional y construcciones de concreto registraron mayores niveles de temperatura y humedad relativa, y, por ende, mayor sensación térmica.

Sin embargo, cuando se incluye en los análisis la autocorrelación espacial local, mediante los análisis LISA, se puede observar que efectivamente existen áreas en la porción sur de la mancha en la que coinciden altas temperaturas y población con condiciones socioeconómicas desfavorables, como baja escolaridad, baja proporción de población con trabajo y escasos servicios en las viviendas o piso (Figura 10). Además, una buena parte de la mancha urbana con altas temperaturas tiene un alto promedio de ocupantes por vivienda y población vulnerable de 65 años o más (Figuras 11b y 11d), particularmente en la zona centro-suroeste de la ciudad. Asimismo, se puede observar que las zonas señaladas como Carrizal (región oeste-suroeste del polígono) y Guayabal (región este-sureste del polígono)

están caracterizadas por tener altas temperaturas y una población con alta densidad de personas menores de 12 años y mayores de 65 años. Haciendo un análisis detallado, en esta zona confluyen infraestructuras y estacionamientos de asfalto que ocupan un gran espacio que absorbe la mayor parte de la radiación solar. Es importante señalar que, aunque la zona de Carrizal se encuentra entre el río Carrizal y una pequeña laguna con vegetación hidrófita, estas superficies no son capaces de reducir la temperatura de esta zona que supera, inclusive, a las temperaturas en áreas desprovistas de cualquier tipo de vegetación, como las del centro del polígono de la ciudad.

El calor extremo ejerce efectos dañinos a nivel social incluso cuando no es letal. Se ha observado que en las regiones que poseen altas temperaturas existe una mayor incidencia de partos prematuros, bajos pesos al nacer y muerte fetal (Chersich et al., 2020). También genera agotamiento por calor afectando el estado de ánimo, la conducta y la salud mental en todos los estratos socioeconómicos, con graves consecuencias como el aumento de la violencia, la tasa de suicidios y la reducción de la productividad laboral (Thompson et al., 2018; Wang et al., 2020). Asimismo, Ochoa-Torres et al. (2020) mencionan que el calor en zonas urbanas puede provocar un incremento en la mortalidad debido a la mayor concentración de construcciones y al hacinamiento, mientras que Royé et al. (2020) encontraron que las altas y bajas temperaturas ambientales se han relacionado con la mortalidad y morbilidad en diferentes climas. Esto enfatiza la necesidad de analizar datos de mortalidad de Villahermosa en relación a la ICU en estudios próximos, sobre todo bajo escenarios de cambio climático, en los que se esperan incrementos de la temperatura en el mediano plazo. Además, dada la estrecha asociación encontrada en Villahermosa entre la población mayor a 65 años con la presencia de altas temperaturas, es necesario definir si esta población vulnerable muestra mayores afecciones en su salud relacionadas con mayores temperaturas que otros adultos mayores habitando condiciones más benignas bajo similares condiciones socioeconómicas, pues de acuerdo con Ochoa-Torres et al. (2020) la población infantil (< 5 años) y la envejeciente (> 65 años) presentan un mayor riesgo de golpes de calor y afecciones diarréicas. Además, la ciudad, y en general el estado de Tabasco, se encuentran “en una etapa avanzada de la transición demográfica” (COPLADET, 2019), con una proporción creciente de población mayor (> 65 años).

La solución ante estos escenarios ha sido el desarrollo de tecnologías de enfriamiento dentro de las infraestructuras. Sin embargo, actualmente estas tecnologías presentan al menos dos grandes problemáticas: 1) el uso intensivo del aire acondicionado intensifica el efecto ICU en los meses de verano, pues al enfriar el interior de los hogares se libera calor residual al exterior (de Munck et al., 2013); y, 2) existen limitaciones de ingresos económicos que condicionan la adquisición de estos equipos y pagar los costes inherentes (González-Osorio & Beele, 2016). En el caso de México, Sánchez-Úbeda et al. (2021) observaron que la demanda eléctrica en los meses donde se registra mayor temperatura se tradujo en un incremento significativo del consumo debido al uso de los equipos de aire acondicionado. Además, González-Osorio & Beele (2016) reportan que cerca del 30 % del consumo eléctrico residencial en México es para el confort térmico en climas cálidos. Cuando a esto le sumamos la presencia de grandes superficies de asfalto e infraestructuras tendremos los elementos ideales para la generación de ICU, particularmente peligrosas en zonas con población vulnerable donde confluyen estos elementos con altas densidades de niños y adultos mayores (por ejemplo, las zonas de Carrizal y Guayabal).

Lograr condiciones más confortables sin incrementar el efecto ICU requiere de ventilación natural en edificios y casas, por lo que en Villahermosa es prioritaria la construcción de viviendas que maximicen la capacidad de enfriamiento. Para ello, debería considerarse una adecuada orientación, diseño y materiales que ayuden a minimizar la ganancia de calor solar, grandes espacios para la entrada de aire, techos que sobresalen de las paredes para producir sombra, además de maximizar la presencia de vegetación arbórea y otras tecnologías como los techos y paredes verdes (Wong & Chen, 2009). Se ha observado que, en ciudades tropicales, los techos verdes pueden disminuir la temperatura entre 5 y 10 °C en los días más cálidos (Wong & Chen, 2009). También es necesario tomar en cuenta otros factores antrópicos que repercuten en la temperatura de la ciudad, como una circulación vehicular no eficiente, o las numerosas quemas de basura y pastizales dentro y aledaños a la mancha urbana, que además de generar calor, contaminan el aire y deterioran la capacidad de una ventilación natural en los hogares.

Finalmente, en México, en el contexto actual marcado por la transmisión local de la enfermedad del covid-19 (SARS-CoV-2), la administración federal actual (2018-2024) ha optado por reducir el contacto social con medidas de aislamiento y restricciones de movilidad. En este escenario de confinamiento, y siendo la electricidad un servicio esencial, es muy probable que en Villahermosa haya ocurrido un incremento en el consumo eléctrico, con consecuencias potenciales en el ICU. García et al. (2020) reportan que la demanda eléctrica en el sector residencial en países latinoamericanos se ha incrementado debido al teletrabajo y al uso intensivo de los dispositivos en el hogar, mientras que Alves (2021) reporta un incremento en la demanda de electricidad en la última semana de abril de 2020 (a un mes de las medidas de distanciamiento social) atribuido al consumo residencial en México, especialmente por sistemas de refrigeración residencial y por algunas actividades comerciales. Esto enfatiza la necesidad de estudios futuros sobre el impacto de las medidas de confinamiento en el efecto ICU en Villahermosa.

5 CONCLUSIONES

En este estudio encontramos que la cobertura y usos de suelo tienen un fuerte efecto en la ICU. Aunque los cuerpos de agua y vegetación arbórea fueron los elementos más importantes, ejerciendo un efecto de enfriamiento, constituyen un porcentaje muy bajo de la superficie de la mancha urbana. Además, se encontraron áreas con alta vulnerabilidad, en las que se presenta una asociación de altas temperaturas con condiciones socioeconómicas desfavorables y la presencia de grupos de edad vulnerables. Si bien no se tienen estrategias únicas para atenuar el impacto del efecto ICU en las ciudades, las políticas eficaces han combinado iniciativas adaptadas a cada ciudad. Por ejemplo, el aumento de la vegetación y la plantación arbórea estratégica (tipo de especie, dirección del viento, evapotranspiración, humedad relativa, etc.), el cambio en el albedo de superficie (reflectividad), el uso de materiales de construcción de mayor eficiencia térmica, y la promoción del uso eficiente de equipos de refrigeración, han resultado en planes exitosos para mitigar el calor urbano. Las soluciones relativas

a la vegetación en Villahermosa deberían guiarse hacia el incremento de las áreas verdes con cobertura arbórea que sean capaces de disminuir la temperatura del aire y del suelo. El dosel arbóreo debe considerarse una infraestructura tan esencial como el alcantarillado o el sistema eléctrico, y aunque el mantenimiento de un bosque urbano con buena cobertura puede exigir tiempo y recursos a corto plazo, a largo plazo puede suponer un gran ahorro energético y económico para las ciudades, y una disminución en los casos de morbilidad y mortalidad relacionados con el calor, especialmente ante los efectos del cambio climático.

REFERENCIAS

- Abdullah, A., Doucouliagos, H. & Manning, E. (2015). Does education reduce income inequality? A meta-regression analysis. *Journal of Economic Surveys*, 29(2), 301-316.
- Aguilar-Zurita, N., Rebollo-Meza, J. & Martínez-Prats, G. (2018). La economía urbana de Villahermosa, Tabasco y su entorno social. En *Empresas, actores sociales e instituciones en la organización productiva del territorio y la innovación para el desarrollo local*. Universidad Nacional Autónoma de México / Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A. C.
- Alves, B. (2021). Peak electricity demand in Mexico between April 2019 and April 2020. [Statista](#).
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Anselin, L., Syabri, I. & Kho, Y. (2006). GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5-22.
- Atasoy, M. (2020). Assessing the impacts of land-use/land-cover change on the development of urban heat island effects. *Environment, Development and Sustainability*, 22(8), 7547-7557.
- Avdan, U. & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016.
- Ballinas, M. & Barradas, V. L. (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 157-166.

- Basu, R. (2009). High ambient temperature and mortality: A review of epidemiologic studies from 2001 to 2008. *Environmental Health*, 8(1), 1-13.
- Battistón, D., García-Domench, C. & Gasparini, L. (2014). Could an Increase in Education Raise Income Inequality. *Latin American Journal of Economics-Formerly, 51*(1), 1-39.
- Breiman, J. (2001). Random Forest. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Cartier, K. M. S. (2021). Growing equity in city green space. *Eos*, 102.
- Celemin, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18, 11-31.
- Cervantes-Pérez, J., Barradas-Miranda, V., Tejeda-Martínez, A., Angulo-Cordova, Q., Triana-Ramírez, C. & Gutiérrez-Tepach, G. (2000). Aspectos del clima urbano de Villahermosa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 16(31), 10-16.
- Chersich, M. F., Pham, M. D., Areal, A., Haghghi, M. M., Manyuchi, A., Swift, C. P., Wernecke, B., Robinson, M., Hetem, R., Boeckmann, M. & Hajat, S. [Climate Change and Heat-Health Study Group] (2020). Associations between high temperatures in pregnancy and risk of preterm birth, low birth weight, and stillbirths: systematic review and meta-analysis. *BMJ*, 371, m3811.
- Coffel, E. D., Horton, R. M. & De Sherbinin, A. (2017). Temperature and humidity based projections of a rapid rise in global heat stress exposure during the 21st century. *Environmental Research Letters*, 13(1).
- CONEVAL (2015). Pobreza urbana y de las zonas metropolitanas en México. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
- CONEVAL (2021). *Informe de Evaluación de la Política de Desarrollo Social 2020*. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
- COPLADET (2019). *Programa Especial de Población del Estado de Tabasco 2019-2024*. Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Tabasco, Gobierno del Estado de Tabasco.
- De la Garza Garza, O. J. & Vilchez Becerra, P. A. (2006). Efecto de la sobre-educación en el ingreso de las personas con estudios de nivel superior en México. *Ensayos*, XXV(2), 21-42.
- De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P. & Marchadier, C. (2013). How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *International Journal of Climatology*, 33(1), 210-227.

- Deilami, K., Kamruzzaman, M. & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67(December 2017), 30-42.
- Donaldson, G., Keatinge, W. & Näyhä, S. (2003). Changes in summer temperature and heat-related mortality since 1971 in North Carolina, South Finland, and Southeast England. *Environmental Research*, 91(1), 1-7.
- Erdem, U., Cubukcu, K. M. & Sharifi, A. (2021). An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island: the case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 7835-7859.
- ESA (2020). *Imágenes nivel 2A del sensor MSI de los satélites Sentinel-2*. European Space Agency.
- García, F., Moreno, A. & Schuschny, A. (2020). Análisis de los impactos de la pandemia del COVID-19 sobre el Sector Energético de América Latina y el Caribe. OLADE - Organización Latinoamericana de Energía.
- Ghosh, S. & Das, A. (2018). Modelling urban cooling island impact of green space and water bodies on surface urban heat island in a continuously developing urban area. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2), 501-515.
- González Osorio, L. M. & Beele, A. (2016). *Estudio de Caracterización del uso del Aire Acondicionado en Vivienda de Interés Social*. CONUEE - Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, Secretaría de Energía / GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Grover, A. & Singh, R. B. (2015). Analysis of Urban Heat Island (UHI) in Relation to Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): A Comparative Study of Delhi and Mumbai. *Environments*, 2(2), 125-138.
- Harlan, S. L. & Ruddell, D. M. (2011). Climate change and health in cities: Impacts of heat and air pollution and potential co-benefits from mitigation and adaptation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 126-134.
- Harlan, S. L., Brazel, A. J., Prashad, L., Stefanov, W. L., & Larsen, L. (2006). Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress. *Social Science & Medicine*, 63(11), 2847-2863.
- Hasanlou, M. & Mostofi, N. (2015). Investigating Urban Heat Island Effects and Relation Between Various Land Cover Indices in Tehran City Using Landsat 8 Imagery. Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Remote Sensing, 22 June–5 July. MDPI.

- Ibrahim, I. & Samah, A. A. (2011). Preliminary study of urban heat island: Measurement of ambient temperature and relative humidity in relation to landcover in Kuala Lumpur. 19th International Conference on Geoinformatics. IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers.
- IMCO (2018). *Califica a tu alcalde: manual urbano para ciudadanos exigentes*. Instituto Mexicano para la Competitividad.
- INEGI (2017). *Datos vectoriales de la Capa unión de Uso del suelo y vegetación*, serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- INEGI (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por AGEB y manzana urbana*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Summary for policymakers. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P. M. Midgley (eds.), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Jami Aymacaña, J. L., Mora Paspuezán, M. B., Padilla Almeida, O. & Kirby Powney, E. P. (2018). Análisis de la presencia de islas de calor en el Cantón Rumiñahui mediante el tratamiento de imágenes Landsat 7 ETM+. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE, 13(1), 5-8*.
- Johnson, D. P., Stanforth, A., Lulla, V. & Luber, G. (2012). Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data. *Applied Geography, 35(1-2), 23-31*.
- Kamboj, S. & Ali, S. (2021). Urban sprawl of Kota city: A case study of urban heat island linked with electric consumption. *Materials Today: Proceedings, 46(part 11), 5304-5314*.
- Karasiak, N. (2019). *Complemento dzetsaka v3.4.3*. Zenodo.
- Kindt, R. (2020). *Package ‘BiodiversityR’*.
- Leal Filho, W., Echevarria Icaza, L., Neht, A., Klavins, M. & Morgan, E. A. (2018). Coping with impacts of urban heat islands. A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. *Journal of Cleaner Production, 171, 1140-1149*.
- Legendre, P. & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3^{ra} ed.). Elsevier Academic Press.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. & Zepp, H. (2021). Intraurban heterogeneity of space-time land surface temperature trends in six climate-diverse cities. *Science of The Total Environment, 804*.

- Li, Y., Gong, X., Guo, Z., Xu, K., Hu, D. & Zhou, H. (2016). An index and approach for water extraction using Landsat–OLI data. *International Journal of Remote Sensing*, 37(16), 3611-3635.
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J. P. & Rybski, D. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, 11(1), 1-9.
- Liang, Z., Wu, S., Wang, Y., Wei, F., Huang, J., Shen, J. & Li, S. (2020). The relationship between urban form and heat island intensity along the urban development gradients. *Science of The Total Environment*, 708.
- Limaye, V. S., Vargo, J., Harkey, M., Holloway, T. & Patz, J. A. (2018). Climate change and heat-related excess mortality in the Eastern USA. *EcoHealth*, 15, 485-496.
- Liu, H., Huang, B., Zhan, Q., Gao, S., Li, R. & Fan, Z. (2021). The influence of urban form on surface urban heat island and its planning implications: Evidence from 1288 urban clusters in China. *Sustainable Cities and Society*, 71.
- Liu, Y., Li, Q., Yang, L., Mu, K., Zhang, M. & Liu, J. (2020). Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of the Total Environment*, 743.
- Magli, S., Lodi, C., Contini, F. M., Muscio, A. & Tartarini, P. (2016). Dynamic analysis of the heat released by tertiary buildings and the effects of urban heat island mitigation strategies. *Energy and Buildings*, 114, 164-172.
- Maxwell, K., Julius, S., Grambsch, A., Kosmal, A., Larson, L. & Sonti, N. (2018). *Built environment, urban systems, and cities*. En D. R. Reidmiller, C. W. Avery, D. R. Easterling, K. E. Kunkel, K. L. M. Lewis, T. K. Maycock & B. C. Stewart (eds.), *Fourth National Climate Assessment, Volume II: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States*. U.S. Global Change Research Program, pp. 438-478.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Ochoa-Torres, M. del P., Muños-Hernández, J. & Freyermuth-Enciso, G. (2020). Mortalidad y vulnerabilidad ambiental en los municipios de la cuenca y la ribera del Usumacinta del trienio 2014-2016. *Revista Pueblos y Fronteras Digital*, 15, 1-31.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoechs, E. & Wagner, H. (2016). Package “vegan.”
- ONU (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, Organización de las Naciones Unidas.

- Palomeque de la Cruz, M. Á., Galindo Alcántara, A., Sánchez, A. J. & Escalona Maurice, M. J. (2017). Pérdida de humedales y vegetación por urbanización en la cuenca del río Grijalva, México. *Investigaciones Geográficas*, 68, 151-172.
- Planet Labs Inc. (2020). Imágenes satelitales de alta resolución PlanetScope®.
- QGIS Development Team (2021). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Reid, C. E., O’Neill, M. S., Gronlund, C. J., Brines, S. J., Brown, D. G., Diez-Roux, A. V. & Schwartz, J. (2009). Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1730-1736.
- Rivera, E., Antonio-Némiga, X., Origel-Gutiérrez, G., Sarricolea, P. & Adame-Martínez, S. (2017). Spatiotemporal analysis of the atmospheric and surface urban heat islands of the Metropolitan Area of Toluca, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76, 225.
- Rodríguez-Rodríguez, E. (2002). *Las lagunas continentales de Tabasco*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Romo López, R. M. E. (2008). Hacia una historia ambiental de Tabasco. En J. A. Filigrana Rosique (ed.), *Anuario de Historia: Vol. III*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Rosenthal, J. K. & Brechwald, D. (2013). Climate adaptive planning for preventing heat-related health impacts in New York City. En J. Knieling & W. Leal Filho, *Climate Change Governance*. Springer, pp. 205-225
- Rosenthal, J. K., Kinney, P. L. & Metzger, K. B. (2014). Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006. *Health & Place*, 30, 45-60.
- Rouse Jr., J. W., Haas, R. H., Deering, D. W. & Schell, J. A. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation. Texas A&M University Remote Sensing Center.
- Royé, D., Íñiguez, C. & Tobías, A. (2020). Comparison of temperature–mortality associations using observed weather station and reanalysis data in 52 Spanish cities. *Environmental Research*, 183.
- Sakdapolrak, P. & Etzold, B. (2016). Editorial to the special section “Geographies of Vulnerability and Resilience – Critical Explorations”. *DIE ERDE - Journal of the Geographical Society of Berlin*, 147(4), 230-233.
- Sánchez, A. J., Salcedo, M. A., Florido, R., Mendoza, J. D., Ruiz-Carrera, V. & Álvarez-Pliego, N. (2015). Ciclos de inundación y conservación de servicios ambientales en la cuenca baja de los ríos Grijalva-Usumacinta. *Contactos, Revista de educación en ciencias e ingeniería*, 97, 5-14.

- Sánchez-Guevara, C., Núñez Peiró, M. & Neila González, F. J. (2017). *Isla de calor urbana y población vulnerable. El caso de Madrid*. En P. Mercader-Moyano (coord.), *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad de Sevilla. pp. , 545-556.
- Sánchez-Úbeda, E. F., Portela-González, J., Muñoz-San Roque, A., Chueca, J. E. & Hallack, M. (2021). *Impacto del COVID-19 en la demanda de energía eléctrica en Latinoamérica y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Energía.
- Singh, R. B. & Grover, A. (2015). Spatial Correlations of Changing Land Use, Surface Temperature (UHI) and NDVI in Delhi Using Landsat Satellite Images. En R. B. Singh (ed.), *Urban Development Challenges, Risks and Resilience in Asian Mega Cities*. Springer, pp. 83-98.
- Sleeter, B. M., Loveland, T., Domke, G., Herold, N., Wickham, J. & Wood, N. (2018). *Land cover and land-use change*. En D. R. Reidmiller, C. W. Avery, D. R. Easterling, K. E. Kunkel, K. L. M. Lewis, T. K. Maycock & B. C. Stewart (eds.), *Fourth National Climate Assessment, Volume II: Impacts, Risks, and Adaptation in the United States*. U.S. Global Change Research Program, pp. 202-231.
- SMN (2021). *Climogramas 1981-2010*. Servicio Meteorológico Nacional
- Sosa Olivier, J. A., Salvador Torres, I. I. & Laines Canepa, J. R. (2018). Evaluación piloto del efecto de tráfico vehicular en la sensación térmica en la vía pública. *Revista Ciencia UANL*, 21(90).
- SOTOP (2018). Carta Urbana de la Ciudad de Villahermosa. Sistema de Información Geográfica del Estado de Tabasco, Secretaría de Ordenamiento Territorial y Obra Pública.
- Tabasco. Comisión para el Desarrollo Urbano (1987). *El desarrollo urbano y Villahermosa*. Comisión para el Desarrollo Urbano, Gobierno del Estado de Tabasco.
- Thompson, R., Hornigold, R., Page, L. & Waite, T. (2018). Associations between high ambient temperatures and heat waves with mental health outcomes: a systematic review. *Public Health*, 161, 171-191.
- Wang, P., Goggins, W. B., Zhang, X., Ren, C. & Lau, K. K. L. (2020). Association of urban built environment and socioeconomic factors with suicide mortality in high-density cities: a case study of Hong Kong. *Science of The Total Environment*, 739.
- Wong, N. H. & Chen, Y. (2009). *Tropical urban heat islands*. Taylor & Francis.

- Wu, Z. & Zhang, Y. (2019). Water bodies' cooling effects on urban land daytime surface temperature: ecosystem service reducing heat island effect. *Sustainability*, 11(3), 787.
- Yao, F., Wang, C., Dong, D., Luo, J., Shen, Z. & Yang, K. (2015). High-resolution mapping of urban surface water using ZY-3 multi-spectral imagery. *Remote Sensing*, 7(9), 12336-12355.
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H. & Narciso de Lima, G. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), 1-12.
- Zha, Y., Gao, J. & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.
- Zhou, B., Rybski, D. & Kropf, J. P. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 7(1), 1-9.

Islas de calor urbano atmosférico y superficial en Guadalajara, México

Luz Elena Moreyra-González¹, Adalberto Tejeda-Martínez²,
Pablo Elías-López³

¹ Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0002-5757-6778. luzemoreyra@gmail.com

² Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana, Veracruz, México. ORCID: 0000-0002-2513- 34. atejeda.martinez@gmail.com

³ Departamento del Medio Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0001-6108- 8358. pdel@azc.uam.mx

RESUMEN

Este trabajo pretende delimitar la distribución térmica de la capa límite atmosférica sobre el área metropolitana de Guadalajara (AMG) para localizar la isla de calor urbano (ICU) atmosférico y su posible relación con la isla de calor urbano superficial (ICUS). Se utilizaron registros de diez estaciones meteorológicas localizadas al interior del área conurbada para el año 2016. A través de mapas de isotermas con valores interpolados se localizaron las zonas de mayor y menor sobrecalentamiento en la época cálida y fría. Los resultados muestran la presencia de una isla de calor diurno al centro del AMG y una isla de frío nocturno en el centro y oriente. Se concluye que no existe una relación causa-efecto entre la ICU atmosférico dentro del dosel urbano y la ICUS.

Palabras clave: isla de calor urbano superficial, isla de calor urbano atmosférico, Guadalajara (México).

ABSTRACT

This work aims to delimit the thermal distribution of the atmospheric boundary layer over the Guadalajara metropolitan area (AMG), in order to locate the atmospheric urban heat island (UHI) and its probable relation with the surface urban heat island. Records from ten meteorological stations located within the metropolitan area for 2016 were used. Through isotherm maps constructed from interpolated values, zones with the highest and lower overheating for the warm and cold season were located. The results show the presence of a diurnal heat island at the center of the AMG, and a nocturnal cold island at the east and center of the metropolitan area. Finally, it is concluded that there is no cause-effect relationship between atmospheric UHI within the urban canopy layer and the superficial UHI.

Key words: surface urban heat island, atmospheric urban heat island, interpolation methods.

1 ANTECEDENTES

Han transcurrido dos siglos desde las primeras mediciones de las alteraciones urbanas sobre el comportamiento térmico de la atmósfera, publicadas en una obra de título extenso que a la postre se ha popularizado simplemente como *The climate of London*; originalmente aparecida en dos tomos entre 1818 y 1820 y que en 1833 se amplió a tres (Howard, 2006). Dichas mediciones evidenciaron lo que años más tarde se llamaría *heat island*, término posiblemente acuñado por Balchin y Pye (1947) al estudiar el clima de Uppsala. Hoy se le conoce como *urban heat island* (UHI), lo que algunos autores en español traducen como isla urbana de calor y otros como isla de calor urbano (ICU).

La típica configuración de isotermas concéntricas, con un máximo en el centro de la urbe, es la ICU, pero también puede referirse al resultado de mediciones de la temperatura de la superficie urbana, o del aire inmerso entre los cañones urbanos, o por arriba de ellos, o incluso en el subsuelo.

De ahí que sea útil la clasificación propuesta por Oke et al. (2017, capítulo 7) en cuatro tipos, que en orden ascendente en altura son: 1) ICU subsuperficial, detectable con sensores en la superficie; 2) ICU superficial (ICUS), medible con sensores sobre la superficie o mediante imágenes satelitales, de avión o dron; 3) ICU del dosel urbano, a partir de sensores en puntos fijos o en vehículos que recorren la zona urbana y la rural para comparar las temperaturas del aire, o bien con sensores remotos como mini-sodar o mini-lidar, y 4) ICU de la capa límite, a partir de sensores por encima de azoteas, en torres, en globos-sonda o en vehículos aéreos (aviones o drones). Desde luego, las dos primeras clasificaciones no se refieren al aire urbano, si bien pueden tener influencia sobre él.

De manera más estricta, en un estudio crítico sobre la metodología, Stewart (2011) establece nueve condiciones para considerar como válidos los estudios de la ICU: 1) que se refieran al dosel urbano, 2) que el documento haga explícita la intensidad de la ICU, 3) que se describan los instrumentos de medición utilizados, 4) que los metadatos (mapas a escala local, fotografías o similares) describan de manera clara la superficie expuesta, 5) que la configuración de los emplazamientos instrumentales sea representativa de los ambientes locales (materiales de la superficie, geometría, actividad humana), 6) que contengan la cantidad de mediciones suficientes para cuantificar la magnitud de la ICU, 7) que las mediciones hayan ocurrido en condiciones meteorológicas estables (sin frentes, sin advección importante y sin precipitación), 8 y 9) que en el análisis de los datos se corrijan errores por diferencias en las elevaciones o por o asincronía de las mediciones. Adicionalmente, establece las escalas de la ICU entre 10^2 a 10^4 m y en períodos de días, meses o años, a lo más.

Siguiendo las consideraciones anteriores, este capítulo tratará fundamentalmente sobre la ICU en la capa límite del área metropolitana de Guadalajara (AMG), y de manera tangencial se ocupará de algunas mediciones satelitales de la ICU superficial.

El AMG abarca $3,265 \text{ km}^2$ (326,500 ha), por lo que es la tercera zona metropolitana más grande del país, solo por debajo de la de Monterrey y la Ciudad de México.

Para el dosel urbano, Jáuregui et al. (1992) mostraron que la tendencia al incremento de la temperatura entre 1931-1970 (0.3 K/década) estaba

relacionada con el crecimiento urbano. Observaron que la intensidad de la ICU era mayor durante la estación seca, si bien en las horas del atardecer, en esa misma época, se presentaron temperaturas menores en la ciudad, lo que atribuyeron a que la urbe actuaba como una fuente de humedad. Usaron seis estaciones climatológicas de superficie, cuatro de ellas urbanas, una suburbana y una rural, más la estación de radiosondeo-viento del aeropuerto.

Davydova-Belitskaya et al. (1999) analizaron información de ocho estaciones de la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA) de 1994 a 1996. En el mapa de la temperatura media anual se nota una diferencia de 1.5 K entre el sur-sureste de la zona urbana (Tlaquepaque) y el oeste (Bosque la Primavera), lo que de alguna manera evidencia la presencia de la ICU, pero por dos razones esa no puede ser una conclusión absoluta: porque se trata de temperaturas medias anuales y porque los gradientes térmicos en parte se deben al gradiente altitudinal; además, como el propósito de la RAMA es la medición de la calidad del aire, algunas estaciones están dentro del dosel urbano y otras en la capa límite. En cambio, un dato revelador sobre la ICU es la tendencia observada en la estación climatológica del Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara, localizado al centro-poniente de la ciudad, de 0.59 °C/década, prácticamente el doble de lo obtenido por Jáuregui et. al. (1992) para las cuatro décadas que van de 1931 a 1970, pero del mismo orden que lo encontrado por Tereschchenko y Filonov (2001) para el periodo 1926-1994 (0.50 K/década). Estos autores usaron la misma estación del Instituto de Astronomía y Meteorología más otras dos de la Comisión Nacional del Agua (Guadalajara y Experiencia). Además de la tendencia al calentamiento ya mencionada, encontraron para el verano una isla de frío en el centro de la zona metropolitana, similar al fenómeno vespertino descrito por Jáuregui et al. (1992).

La detección de la ICU superficial en la ciudad de Guadalajara ha sido documentada en diversas publicaciones no indexadas y, por tanto, de difusión relativamente estrecha. Todas ellas se refieren a imágenes satelitales, y en parte se centran en la descripción de los métodos de conversión de las imágenes en campos térmicos, pero coinciden en la detección de fuertes contrastes de temperatura entre el centro de la ciudad y el Bosque de la Pri-

mavera: de 12 K para el 11 de marzo de 2006 a las 5:54 a. m. de tiempo local (Galindo-Estrada, 2014), de 4 K en promedio para el mes de agosto de 1997 entre 1 y 7 a. m., de 4.4 K entre 7 a. m. y 11 a. m., y de 3 K entre 1 p. m. y 9 p. m. de la misma fecha, con mayores intensidades cuando se trata de mediciones momentáneas: 5 °C, 4 a. m., marzo 18; 9 a 10 K a las 10 a. m. del 10 de marzo y a las 15:45 del 15 de marzo de 1998 (Galindo Estrada, 2010). Resultados similares fueron reportados por Galindo (2009) y Hernández-Ceballos (2011). En estos estudios las temperaturas en la parte central de la ciudad pueden superar los 40 °C, pero debe tomarse en cuenta que se trata de las temperaturas de las superficies pavimentadas y no del aire.

En un estudio sobre ondas de calor, Davidova & Alamilla (2019) encontraron que la temperatura mínima ha tenido una tendencia de 0.94 K/10 años y la temperatura máxima de 2.27 K/10 años durante el periodo 1996-2018, que superan a las tendencias reportadas en el trabajo ya citado de Davydova-Belitskaya et al. (1999).

López García (2018), con el propósito de modelar el riesgo por calor extremo, usó datos de diez estaciones de monitoreo de calidad del aire con veintiún años para detectar que el periodo cálido de el AMG transcurre entre marzo y junio, cuando se rebasa el promedio histórico de 26.7 °C de temperatura ambiente. No ubicó la ICU del dosel urbano, sino que a partir de imágenes satelitales LANDSAT 8 obtuvo un mosaico térmico superficial, y no la configuración de una isla. Combinando esa información con datos demográficos y de vulnerabilidad, encontró que el riesgo al bienestar térmico tiene una distribución dispersa, que en el 90 % del territorio está entre muy bajo y moderado, y solo el 10 % restante alcanza valores de alto y muy alto.

Lo anterior es compatible con lo estimado por Tejeda-Martínez et al. (2021): en promedio para el periodo 1979-2012 los habitantes de la ciudad de Guadalajara debieron requerir 7,000 horas-grado de enfriamiento contra 24,000 de calefacción al año, es decir, que energéticamente son mayores las necesidades de calefacción que de refrigeración para el confort humano. Hacia el último tercio de este siglo los consumos eléctricos para refrescar los ambientes interiores habrán de incrementarse respecto de 2012 entre 12 y 10kWh/habitante, ya sea que se considere o no el efecto de la ICU (o 200 a 150 GW h para toda la metrópoli); es decir, que la aportación

de la ICU será del 20 al 30 % respecto de lo que demandará el crecimiento urbano junto con el calentamiento planetario. En cambio, las necesidades de calefacción habrán de reducirse un 45 % por el calentamiento global, y un 50 % si a este se le agrega el efecto de la ICU.

Otra forma de detectar la ICU es mediante la evaluación de tendencias en series de tiempo de temperatura, específicamente de las temperaturas extremas (Oke et al., 2017, capítulo 7). García-Cueto et al. (2021) aplicaron diversas técnicas estadísticas a datos anuales de temperaturas del aire (aunque no queda claro si dentro del dosel o en la capa límite urbana), y encontraron que entre 1957 y 2013 la tendencia fue negativa en la temperatura máxima extrema, de aproximadamente 2 K en 45 años, y positiva en la mínima extrema en el mismo periodo con 4 K. Es decir, de acuerdo con la literatura antes citada, la ICU se presenta en las noches y madrugadas, mientras que en el periodo diurno predomina el efecto oasis (área fresca rodeada por zonas más cálidas).

2 ZONA DE ESTUDIO

El INEGI (2020) registró que el AMG contaba con 5.268 millones de habitantes en una superficie de 3,265 km², lo que resulta en una densidad de población de 1,613 hab/km². De 2010 a 2020 hubo un incremento del 13.6%, con una tasa de crecimiento promedio anual del 1.3 %.

La parte conurbada del municipio de Zapopan presenta la mayor densidad poblacional del AMG con 9,721 hab/km²; Guadalajara, 1,491 hab/km² (que corresponde a la media de densidad en el AMG); y la parte conurbada del municipio de Acatlán de Juárez presenta la menor densidad, con 133 hab/km². Lo anterior indica una amplia dispersión de habitantes en el AMG. Por una parte, Zapopan, que presenta la mayor densidad de habitantes, también presenta una alta densidad de construcción y a su vez una mayor densidad de área arbolada. Por su parte, zonas de baja densidad poblacional no necesariamente coinciden con baja densidad de construcción: en algunas zonas con fraccionamientos de bajo costo construidos de manera industrial es alta la densidad de construcción y muy baja la cantidad de arbolado.

Además de la distribución heterogénea de la población en el AMG, INEGI (2020) indica que al menos el 75 % de la industria jalisciense se encuentra en el AMG, lo que provoca también una densidad de construcción y áreas verdes heterogénea.

Con respecto al clima, de acuerdo con la clasificación del INEGI (2020), al AMG le corresponde un tipo semicálido húmedo.

En este estudio se recopilan datos de temperatura, precipitación pluvial y humedad relativa de ocho estaciones meteorológicas (EM) localizadas dentro del AMG, pertenecientes al Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco (SIMAJ) de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) estatal, y dos más de la Comisión Nacional del Agua (<https://www.gob.mx/conagua>).

En la Tabla 1 se enlistan las EM con sus coordenadas geográficas y altitud, elegidas por la homogeneidad en el sistema de medición de datos, y en la Figura 1 se observa su distribución geográfica en el AMG. El rango promedio de distancia entre las estaciones se encuentra entre 8-12 km. La diferencia máxima de altitud es de 103 m.

TABLA 1. LISTA DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS (EM)

Núm.	Nombre	Clave	Latitud	Longitud	Altitud (m)
1	Vallarta	VALL	20°40'48"	-103°23'54"	1640
2	Tlaquepaque	TLA	20°38'27"	-103°18'45"	1622
3	Águilas	AGU	20°37'51"	-103°25'00"	1633
4	Oblatos	OBL	20°42'01"	-103°17'47"	1608
5	Atemajac	ATM	20°43'10"	-103°21'19"	1563
6	Miravalle	MIR	20°36'52"	-103°20'36"	1622
7	Loma Dorada	LDO	20°37'45"	-103°15'50"	1645
8	Las Pintas	PNT	20°34'36"	-103°19'35"	1543
9	Gdl. DGE	GDE	20°40'35"	-103°20'46"	1550
10	La Experiencia	EXP	20°40'13"	-103°17'09"	1550



Figura 1. Localización de las EM por municipio, y en color cian la delimitación por municipios.

2.1 Zonas climáticas locales

Con base en la clasificación de zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés) (Steward & Oke, 2012), considerando un área circundante de 0.5 km, se catalogan las zonas en que se encuentran las diez EM. La LCZ más abundante (Tabla 2) fue la 03, de disposición compacta de baja altura (*Compact Low Rise*) que, de acuerdo a los autores, describe zonas con edificaciones de 1 a 3 niveles, fundamentalmente de uso habitacional, con materiales impermeables y duros (como el concreto), y calles mayoritariamente pavimentadas. En dos de las zonas se añadieron los subíndices 2 o 4 que corresponden a presencia de construcciones secundarias no predominantes de altura media de 3 a 9 niveles, o con hasta 15 niveles, respectivamente.

Como parte final de la clasificación se hace énfasis en el tipo de cobertura, que puede ser: A, árboles densos con cobertura permeable; B, árboles dispersos con cobertura permeable; C, vegetación baja con suelo desnudo,

o E, pavimento típico de flujo urbano. La cantidad y tipo de distribución de cobertura, arbolado y áreas vegetadas resulta relevante entre las distintas zonas estudiadas debido al calor latente que aportan dentro las ciudades.

TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LAS EM SEGÚN SU LCZ A PARTIR DE STEWART Y OKE, 2012. (X_Y/Z, X: DISPOSICIÓN DOMINANTE DE CONSTRUCCIONES, Y: PRESENCIA DE CONSTRUCCIONES SECUNDARIAS, Z: TIPO DE COBERTURA).

Núm.	Nombre	LCZ	Uso de suelo
1	Vallarta	3_2/B Disposición compacta de baja altura con elementos de altura media y cobertura de árboles dispersos	Comercial, habitacional
2	Tlaquepaque	03/B Disposición compacta de baja altura con cobertura de árboles dispersos	Comercial, habitacional, industrial
3	Águilas	06/B Disposición abierta de baja altura con cobertura de árboles dispersos a densos	Habitacional, comercial
4	Oblatos	06/E Disposición abierta de baja altura con cobertura de pavimento para flujo urbano	Habitacional, comercial
5	Atemajac	03/E Disposición compacta de baja altura con cobertura de pavimento para flujo urbano	Habitacional, comercial
6	Miravalle	03/E Disposición compacta de baja altura con cobertura de pavimento para flujo urbano	Comercial
7	Loma Dorada	07/B Disposición ligera de baja altura con cobertura de árboles dispersos	Habitacional, comercio pequeño
8	Las Pintas	07/C Disposición ligera de baja altura con cobertura de arbustos y suelo desnudo	Comercial, industrial
9	Gdl. DGE	3_4/B Disposición compacta de baja altura con edificios altos dispersos y cobertura de árboles dispersos	Comercial
10	La Experiencia	03/B Disposición compacta de baja altura con cobertura de árboles dispersos	Habitacional, comercial

La EM más al norte, Atemajac, muestra usos de suelo comercial y habitacional, y manzanas con estructuras internas irregulares. Su retícula urbana es en general ortogonal y compacta con alturas aleatorias de 2 a 3 niveles. Su cobertura vegetal en superficie es baja o nula, con presencia de arbolado disperso.

Un poco más al sur poniente, la zona de Vallarta, en el límite entre los municipios de Guadalajara y Zapopan, presenta manzanas con distribuciones internas heterogéneas, con alturas irregulares de 2 a 9 niveles. La retícula urbana es irregular y con variedad en su uso de suelo, se presentan grandes zonas comerciales. La cobertura vegetal en superficie es mayor con respecto de las otras zonas analizadas debido a la presencia de camellos, banquetas ajardinadas, así como zonas de arbolado denso.

Al poniente, en Las Águilas, en el municipio de Zapopan, la configuración de manzanas es ordenada en retículas ortogonales continuas con calles amplias en todos sus ejes. Su uso de suelo es predominantemente habitacional con áreas internas ajardinadas, lo que permite que la cobertura vegetal en superficie sea la mayor de las zonas estudiadas, además de contar con bloques de arbolado denso, así como áreas de arbolado discontinuo sobre las calles.

Al nororiente, la EM Oblatos está rodeada de manzanas estrechas con relación al largo, de forma rectangular; las calles son amplias y asfaltadas, principalmente de uso habitacional; la vegetación superficial es nula y el arbolado es disperso.

Tlaquepaque, perteneciente al municipio del mismo nombre, es una zona con usos de suelo comercial, habitacional e industrial. La estructura de sus manzanas es compacta, con calles estrechas y retícula ortogonal. Su nivel de vegetación en superficie es de nula a baja con arbolado disperso.

Loma Dorada, en el municipio de Tonalá, es una zona predominantemente habitacional con edificaciones de tipo “autoconstrucción”, lo que fomenta la variedad de materiales y conformaciones de las superficies construidas. Su estructura de manzanas es abierta a través de calles anchas y ejes dispersos. Presenta cobertura vegetal en banquetas y calles, así como arbolado disperso.

Las Pintas cuenta con una estructura de manzanas pequeñas de uso habitacional de 1 a 2 niveles que se cruzan con áreas industriales dispersas.

Se observa casi nula presencia de vegetación tanto en cobertura de suelo como de arbolado, incluso con riesgo de erosión, con áreas de siembra que se han transformado en terrenos de uso industrial. Su cobertura de suelo se acerca a las clasificadas en los LCZ como C o F, es decir, con pequeños arbustos sobre suelos arenosos y sin aporte de humedad.

Miravalle y Las Pintas, al sur poniente, en conjunto con la parte continua de Tlaquepaque, concentran a la principal zona industrial del AMG.

Las zonas de las EM Gdl. DGE y Experiencia al centro y centro-oriente del AMG muestran un uso de suelo que oscila entre comercial y habitacional en manzanas de mediano tamaño en retículas ortogonales. Presentan estructuras superficiales compactas con edificaciones de alturas variadas, de medianas a altas. La Experiencia muestra vegetación escasa y dispersa, a diferencia de las zonas centro y norponiente que muestran mayor presencia de vegetación tanto en el espacio público como en el privado, es decir, avenidas y casas habitación. La EM Gdl. DGE presenta vegetación y arbolado principalmente en superficies de banquetas y espacios públicos.

3 DATOS Y MÉTODOS

3.1 Termo-higrometría 2016

Se procesaron registros de temperatura, humedad relativa y precipitación de 10 EM: ocho EM de la Red Automática del Sistema de Monitoreo Atmosférico de Jalisco (SIMAJ) correspondientes al año 2016 (la de mayor cobertura con aproximadamente 10 % de datos faltantes) y dos estaciones más, pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN); además de las normales climatológicas de precipitación del periodo de 1981-2010 del Observatorio Astronómico y Meteorológico de la Universidad de Guadalajara (Figuras 2, 3 y 4).

Las EM del SIMAJ son estaciones fijas, colocadas a una altura promedio de 12 m sobre el suelo con registro de datos horarios de cinco tipos de contaminantes, además de elementos climáticos como: temperatura, humedad, dirección y rapidez de viento, y, en algunos casos, radiación

solar. Todas las EM del SIMAJ cuentan con registros desde 1996, con excepción de la EM Las Pintas, con inicio en 2011 (<http://sigal.jalisco.gob.mx/aire/>).

La Figura 2 indica que el comportamiento del año 2016 no discrepa sustancialmente de la precipitación normal del periodo 1981-2010; durante 1981-2010 en promedio ocurrió 90 días al año, que representó una precipitación pluvial media anual de 737 mm, mientras que para el año 2016, precipitaron 829 mm en 88 días. Por lo tanto, es razonable suponer que el año 2016 se comportó como un año típico, en términos pluviométricos, y dado que la precipitación es uno de los principales inhibidores de la ICU, se infiere que la configuración y evolución de la ICU en 2016 arrojará resultados representativos del fenómeno en general.

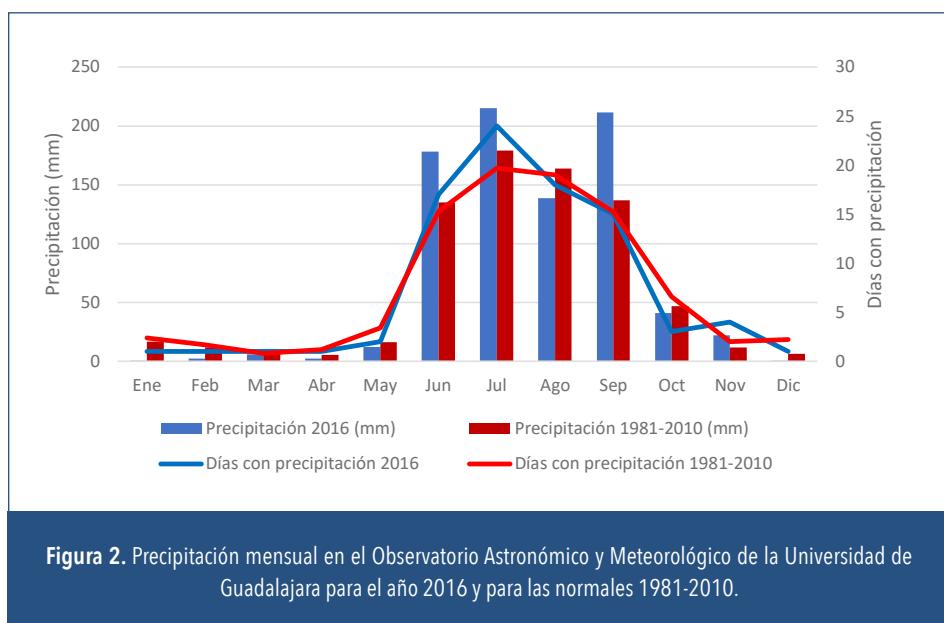


Figura 2. Precipitación mensual en el Observatorio Astronómico y Meteorológico de la Universidad de Guadalajara para el año 2016 y para las normales 1981-2010.

En la Figura 3 se muestra la variación térmica en cada una de las EM durante 2016 para el mes más frío del año (enero, caja de la izquierda) y más cálido (mayo, caja de la derecha); en ambos casos, se observa que la temperatura tiene un comportamiento a lo largo del año similar a una distribución gaussiana. Para enero se observa que las estaciones Águilas,

Atemajac y Loma Dorada presentan los valores más bajos, tanto en su promedio como en los límites del segundo y cuarto cuartiles. Los valores más altos se registran en Miravalle y Las Pintas. Esta última destaca al presentar una mayor amplitud térmica en este mes, mientras que Las Águilas presenta la menor variación térmica.

Desde la perspectiva de las LCZ, las EM de Miravalle y Las Pintas presentan coberturas de suelo similares a las categorías C (pequeños arbustos) y E (pavimentado). Por su parte, la zona de Las Águilas con características similares a la categoría de cobertura de suelo B (árboles dispersos y suelos permeables) aporta estabilidad térmica.

Para mayo, el mes más cálido, Oblatos y Las Pintas son las de promedio y tercer cuartil mayores, y Las Águilas la de temperaturas más bajas, con poca variación en comparación con el resto de las estaciones. También es claro que las variaciones térmicas son menores que la variación térmica de enero, y que en Oblatos y Las Pintas las variaciones son más extremos que en el resto de las EM.

Las zonas de Oblatos y Las Pintas, con LCZ de características similares a coberturas de suelo C (pequeños arbustos) y E (pavimentado), presentan los valores más altos. Las Pintas presenta aportes de calor propios de un uso de suelo industrial y comercial, en donde se observa presencia de tráfico constante. En contraste, Las Águilas presenta vegetación y bloques de arbolado denso que aportan a la estabilidad térmica. Al tener un uso de suelo predominantemente habitacional, factores distintos como el tráfico no representan un aporte significativo de calor.

La x representa el promedio, los extremos de las barras limitan el segundo y tercer cuartil, y los extremos de los alambres el primer y cuarto cuartil. Las abreviaturas en el eje horizontal corresponden a los nombres de las EM según la Tabla 1.

La Figura 4 ilustra el comportamiento hídrico en el AMG, pero su interpretación no es tan sencilla puesto que la humedad relativa depende directamente del contenido de vapor de agua en el aire e inversamente de la temperatura. De manera general se observa que la humedad relativa tiene una amplia variabilidad, aproximadamente entre el 10 y el 90 %, con promedios que oscilan alrededor del 40 % para enero y 35 % para mayo. La humedad relativa en enero es mayor que en mayo, mes que corresponde al final de la

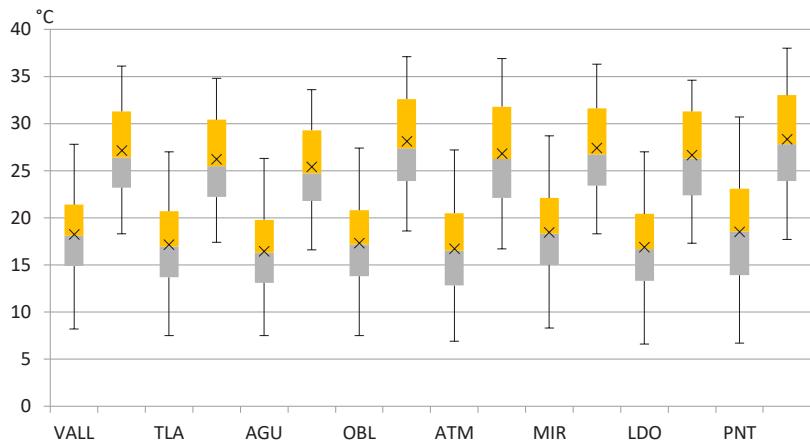


Figura 3. Cajas y alambres de temperatura (°C) de ocho estaciones para enero (izquierda) y mayo (derecha) de 2016 de la Red SIMAJ.

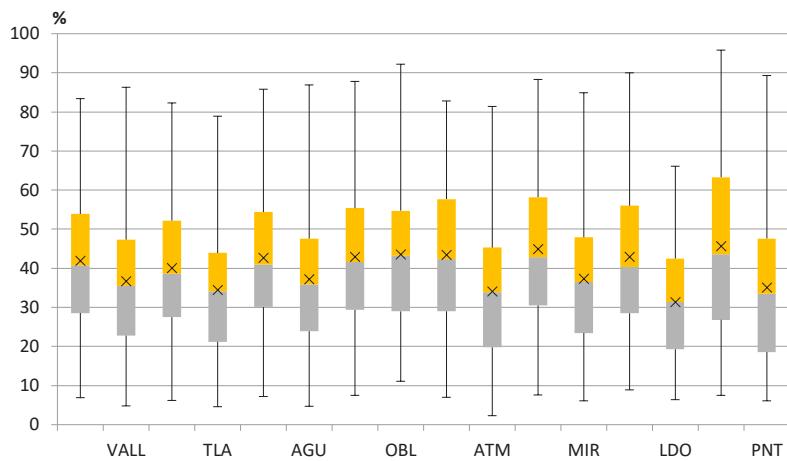


Figura 4. Similar a la Figura 3, pero para la humedad relativa (%).

temporada de estiaje (ver Figura 2) y, por tanto, con bajo contenido de vapor de agua en la atmósfera, y cuando ocurren las máximas temperaturas.

3.2 Procedimientos cartográficos

Para generar los mapas de las Figuras 5 a 12 se procesaron los datos de temperaturas horarias del mes más frío, enero, y del mes más cálido, mayo, de 2016. También se detectó el día más frío (cuando se alcanzó la temperatura mínima del mes frío) y el día más cálido (día de temperatura máxima del mes cálido), que resultaron el 28 de enero y 25 de mayo. En esta etapa del procedimiento se detectó que la temperatura alcanza los mínimos diarios entre 6 y 7 a. m. hora local, y los máximos entre las 4 y 5 p. m.

Las EM de la Figura 1 se georreferenciaron de acuerdo a las coordenadas indicadas en la Tabla 1; se usó el programa Surfer (2021) para tazar las isoterma y se exportaron en formato KMZ a la plataforma Google Earth. Para los mapas de las Figuras 5 a la 12, Surfer generó una malla de 99 filas por 100 columnas para un área comprendida entre los 20° 31' N a los 20° 47' N de latitud y los 103° 11' W a los 103° 30' W de longitud, cubriendo una extensión en X de 33125.4 m y en Y de 30078.8 m. Para las elevaciones se seleccionó el *level method simple*. Los límites entre las isoterma máxima y mínima varían entre mapas en función del día y de la temporada, pero la escala es la misma para todos los mapas, de 6 a 36°C, y se utilizaron intervalos de 0.2 y 0.4°C, dependiendo del caso. Las isolíneas se obtuvieron con los métodos de interpolación (Borrough & McDonnell, 1998) Kriging y Radial Basis Function (RBF); este último fue el seleccionado para la elaboración de todos los mapas de este documento, debido a que las isoterma resultaron más suaves y con mejor correspondencia con los distintos usos del suelo, tipo de superficie y topografía de la zona de estudio. Para los mapas de las Figuras 13 a 16 las isoterma corresponden a las fechas y, en su caso, horas aproximadas señaladas en los pies de figura; fueron sobreuestas a las imágenes satelitales previamente publicadas según la referencia indicada en cada figura.

4 ISLA DE CALOR URBANO ATMOSFÉRICO

Para el análisis se evalúan y contrastan los mapas interpolados en cuatro diferentes momentos: temperaturas máximas y mínimas del día más frío de enero de 2016 (enero 28) y del día más cálido de mayo del mismo año (mayo 25).

4.1 El día frío

La Figura 5 corresponde a las temperaturas máximas del día 28 de enero. Se aprecian tres núcleos o islas de isotermas concéntricas al oriente, poniente y sur de la ciudad separadas por una especie de parteaguas térmico que atraviesa la ciudad del suroriental al norponiente. La isla del oriente alcanza los 22.8 °C en la EM La Experiencia, casi 4 K por arriba del sector frío del poniente, con 18.4 °C en la EM Las Águilas.

La coincidencia del parteaguas térmico, en un alto porcentaje de su área, con la Av. Lázaro Cárdenas, probablemente representa un aporte de calor

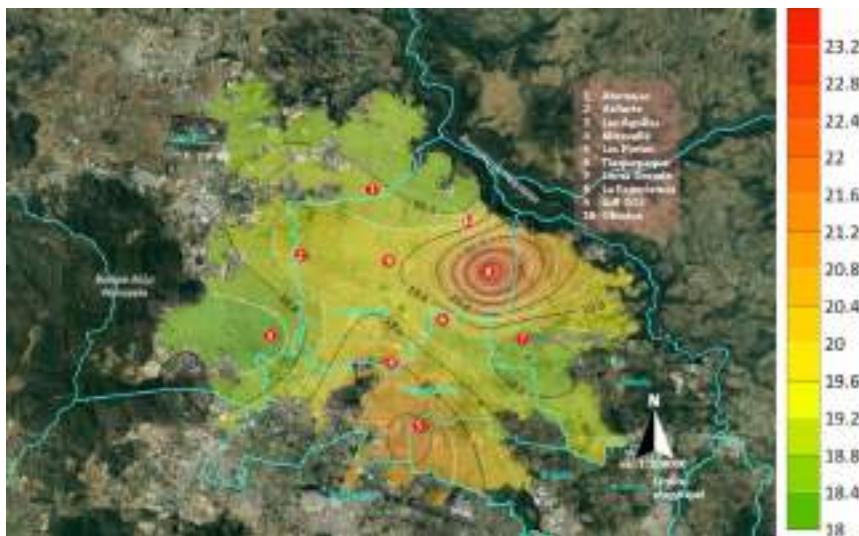


Figura 5. Isotermas de temperaturas máximas, día frío, 28 de enero.

antropogénico dado su uso de suelo comercial y la presencia de saturación vial con mayor intensidad en horas pico de la mañana y tarde como de 6 a. m. a 10 a. m. y de 5 p. m. a 9 p. m., respectivamente.

Las temperaturas mínimas de ese mismo día se presentan en la Figura 6. Los núcleos ahora presentan una diferencia de 3.6 K entre la zona más fría (La Experiencia), al oriente del AMG, y la zona más cálida (Las Pintas), localizada al sur poniente. En las horas de mínimas, las zonas del centro y oriente, DGE y Experiencia, presentan las temperaturas más bajas con 6.2 y 5.6 °C, respectivamente.

Oblatos, Atemajac, Tlaquepaque y Loma Dorada muestran comportamientos térmicos similares entre sí. Exceptuando la zona de Oblatos, que presenta una retícula urbana estrecha, el resto de las EM mencionadas están rodeadas de estructuras de manzanas amplias y de mediana densidad en el número de edificaciones, propiciando una menor acumulación del calor a nivel del dosel urbano, lo que es probable que provoque una “isla fría” nocturna. La EM de Las Pintas, al igual que durante las horas

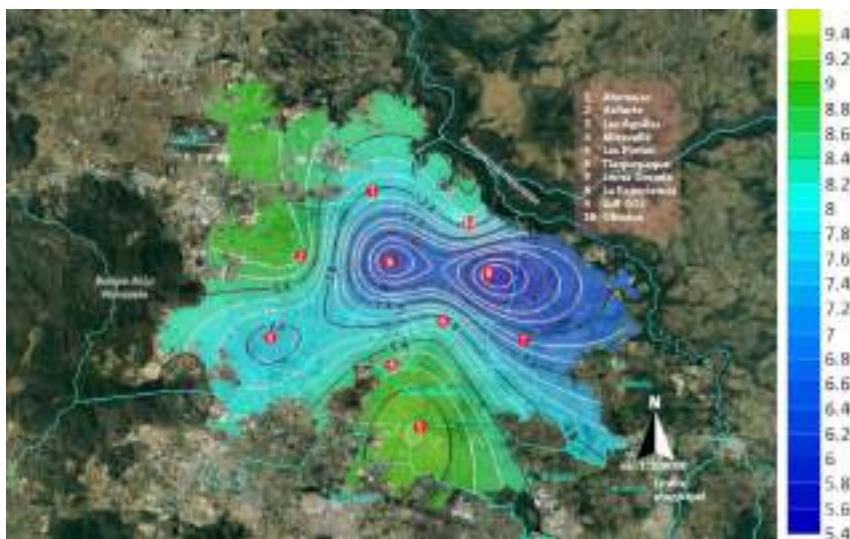


Figura 6. Isothermas de temperaturas mínimas, día frío, 28 de enero.

de máximas temperaturas, alcanza el valor más alto cuando ocurren las temperaturas mínimas en el sur del AMG, probablemente como resultado del uso de suelo de comercial a industrial prevaleciente de la zona, con altos flujos de circulación vehicular tanto en el día como por la noche.

En el oriente del AMG la EM de La Experiencia presenta tanto las temperaturas más altas al momento de las temperaturas máximas (Figura 5) como las más bajas al momento de las temperaturas mínimas, acompañada de un núcleo adyacente en el centro del área urbana que corresponde a la EM de Gdl. DGE (Figura 6).

Las temperaturas máximas se explican como el efecto de las altas ganancias por radiación solar sobre su cobertura altamente pavimentada y de materiales de alta capacidad calorífica en las construcciones, sumado a una mínima presencia de vegetación con arbolado disperso. Por otro lado, el comportamiento de las temperaturas mínimas se asocia con el efecto de la Barranca de Huentitán y los posibles vientos procedentes del cambio en la topografía.

4.2 Día cálido

En la Figura 7 se observa una diferencia máxima de 4 K entre las zonas con mayores temperaturas presentes al nororiente y al sur, y las zonas de menor temperatura, al sur oriente y sur poniente del AMG, durante el día 25 de mayo.

Las EM La Experiencia y Las Pintas presentan las mayores temperaturas al momento de las temperaturas máximas, con 37.2 y 37.4 °C, respectivamente. Estos núcleos coinciden con los presentados para el día frío (Figura 5). Lo anterior indica la recurrencia de una zona de sobrecalentamiento atmosférico en ambas zonas, tanto en el periodo frío como en el cálido.

Igualmente se repite la presencia de una zona amplia con sobrecalentamiento al centro entre las EM Gdl. DGE, Atemajac, Vallarta, Miravalle y Tlaquepaque, con variaciones de 0.5 a 0.8 K entre ellas, con temperaturas alrededor de los 35 °C. Los valores menores al momento de las temperaturas máximas se registran en las zonas de Las Águilas y Loma Dorada, con temperaturas de 34 °C. Ambas EM presentan el máximo de diferencia de altitud entre estaciones (aproximadamente 103 m), variable que es posible

afecte a través del gradiente vertical de temperatura. En el caso particular de la EM Las Águilas, la cercanía con el Bosque de La Primavera y su aporte de humedad puede estar contribuyendo a contrarrestar el alza en las temperaturas.

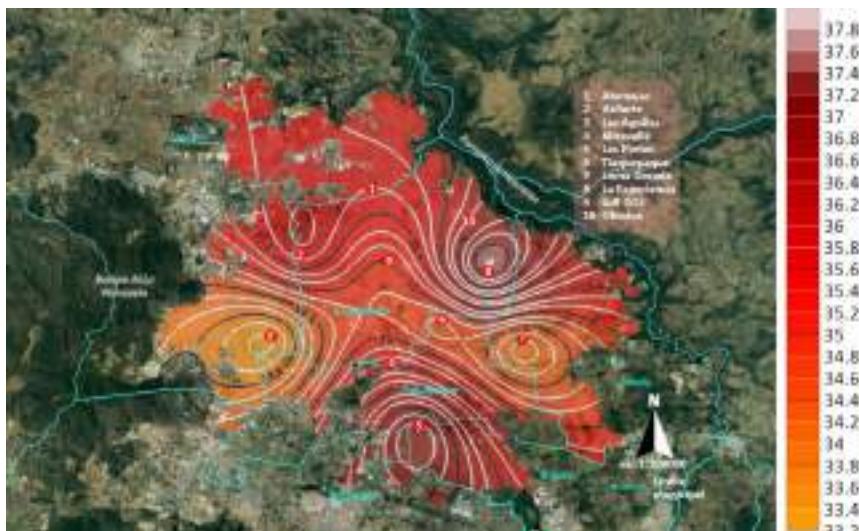


Figura 7. Isotermas de temperaturas máximas, día cálido, 25 de mayo.

En el día cálido 25 de mayo, al momento de las temperaturas mínimas (Figura 8), se presenta la diferencia más amplia con un máximo de 6.8 K. Sin embargo, durante las madrugadas las zonas del centro y centro-oriente son las de menor sobrecalentamiento. A diferencia de los comportamientos de los análisis previos, la EM Las Águilas presenta temperaturas más altas que las partes centrales, junto con estaciones circundantes al centro del AMG, como por ejemplo Tlaquepaque, Vallarta u Oblatos. Esto refuerza la idea de la presencia de una isla fría en las partes centrales de la ciudad.

Desde el punto más cálido, la EM Loma Dorada, con 23 °C, el sobrecalentamiento urbano nocturno se extiende hacia el área de Miravalle y Las Pintas. Es importante notar que estas tres EM coinciden con un uso de

suelo industrial. El aumento de circulación de automóviles por zonas industriales y comerciales puede estar promoviendo un sobrecalentamiento debido a la presencia de contaminantes provenientes de la industria y el transporte.

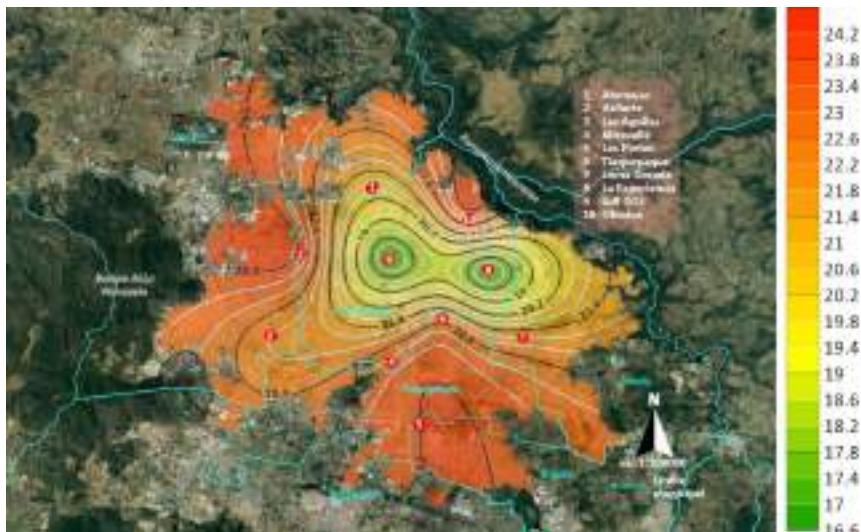


Figura 8. Isotermas de temperaturas mínimas, día cálido, 25 de mayo.

4.3 Isotermas promedio

La Figura 9 representa las temperaturas máximas promedio del mes de enero de 2016. Se confirma una zona de sobrecalentamiento al centro del AMG dentro de la isoterma de los 23.6 °C, abarcando gran parte del centro y norte del AMG. Se observan puntos más frescos en zonas periféricas, como es la zona de Loma Dorada, Guadalajara DGE y Las Águilas, está última con 22.6 °C. Los puntos más cálidos se mantienen al sur y noroeste en la zona de las EM Las Pintas y La Experiencia, con 26.2 y 25.6 °C, respectivamente. Es decir, una diferencia máxima de 3.6 K entre el núcleo más caliente y el más frío.



Figura 9. Isothermas de temperatura máxima promedio de enero de 2016.

Por su parte, la Figura 10 corresponde a las temperaturas máximas promedio de mayo de 2016. Se observa un calentamiento medio en la parte del centro del AMG, conteniendo a las zonas de las EM Gdl. GDE, Tlaquepaque, Loma Dorada y Miravalle, con alrededor de 33.6 °C. La zona de alto calentamiento se mantiene al norte y sur del AMG, comprendiendo las zonas de las EM Experiencia y Oblatos, ambas con 35.4 °C; Atemajac y Vallarta, con 34.6 y 34 °C, respectivamente; y al sur, con el mayor calentamiento, Las Pintas, con 35.8 °C. Es decir, una diferencia máxima de 3.8 K entre Las Pintas y Las Águilas, y una diferencia de 3.4 K entre la zona central en La Experiencia y Las Águilas.

El contraste entre las Figuras 9 y 10 permite identificar zonas con sobrecalentamiento moderado en el mes frío, principalmente en partes del centro del AMG, y zonas con mayor intensidad de sobrecalentamiento en el mes cálido, principalmente al sur, en Las Pintas, y al nororiente, sobre las zonas de Oblatos y La Experiencia. Para ambos meses las zonas más frescas se mantienen al oriente y poniente en zonas cercanas a Las Águilas y Loma Dorada.

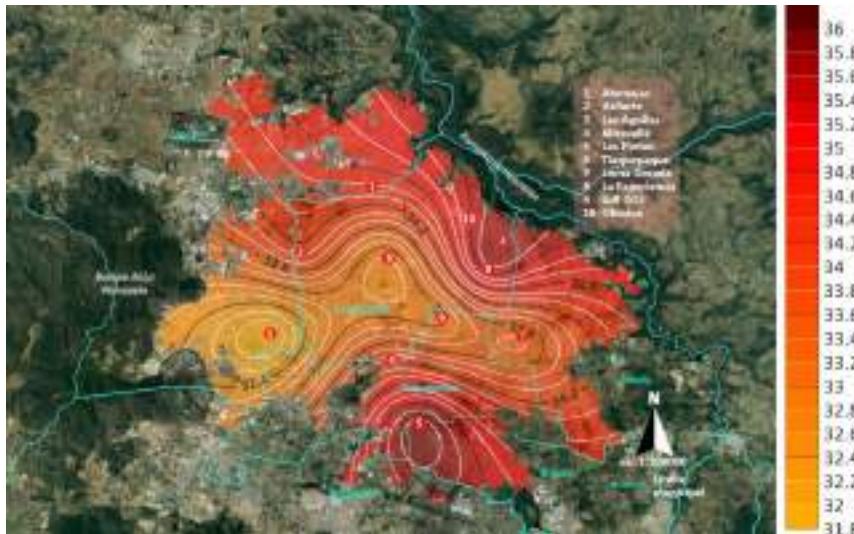


Figura 10. Isotermas de temperatura máxima promedio de mayo de 2016.

En el presente análisis se observa que, durante las horas diurnas, los modificadores urbanos al comportamiento térmico se pueden deber a las edificaciones y las características de los cañones urbanos, a diferencia del análisis puntual (Figuras 5 y 7), en el que se identifica mayor preponderancia de zonas viales y de actividad industrial.

La Figura 11 presenta los promedios de temperaturas mínimas para enero de 2016. Alrededor de la EM de La Experiencia se extiende una isla fría dentro, con 7.8 °C. La isoterma de los 11.36 °C contiene gran parte del centro y sur poniente. Las zonas más cálidas en horas de la madrugada se presentan al norponiente y suroriente, conteniendo los límites de zonas cercanas a las EM Vallarta, con 12.6 °C; Loma Dorada, con 11.4 °C; y Las Pintas, con 11 °C. Es decir, una diferencia máxima de 4.8 K entre la EM Vallarta y La Experiencia.

Como se observa en la Figura 12, en el promedio de temperaturas mínimas para mayo de 2016 hay una alta congruencia con los valores puntuales del día 25 de mayo (Figura 8). Gran parte del AMG se mantiene dentro de la isoterma de los 20.2 °C. Al centro, se observa de nuevo una isla fría

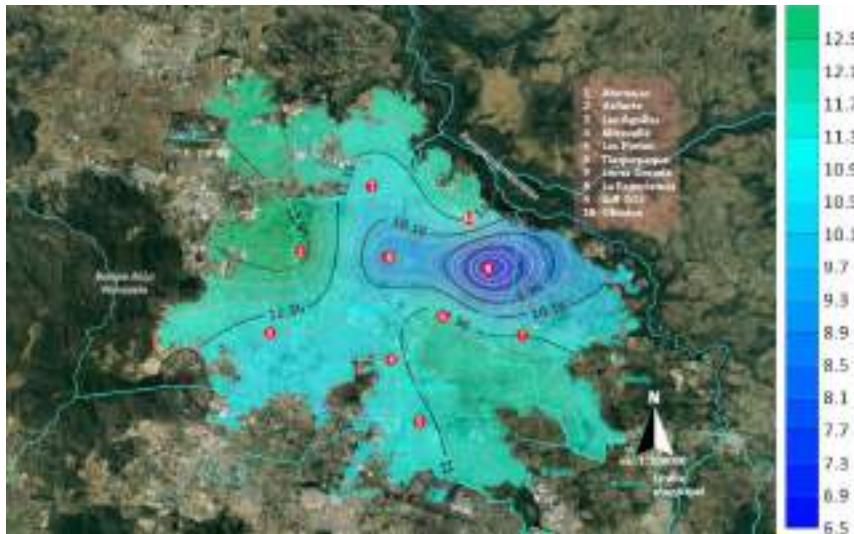


Figura 11. Isotermas de temperatura mínima promedio, enero de 2016.

que envuelve las estaciones de Guadalajara GDE y La Experiencia, con un descenso de 3.4 K en las temperaturas promedio con 16.8 °C. Al igual que en los valores puntuales del día cálido, 25 de mayo (Figura 8), las temperaturas más altas se presentan en las EM Las Pintas, Miravalle, Vallarta y Oblatos, con temperaturas de 21.4 °C, es decir, 1.2 K por arriba de gran parte del AMG y hasta 4.6 K por arriba del centro en la EM La Experiencia.

Se puede afirmar que los mapas mostrados en las Figuras 5, 6, 7 y 8, correspondientes a las isotermas de temperaturas máximas y mínimas para el día más frío y más cálido de 2016, muestran congruencia con los mapas de isotermas promedio de las Figuras 9, 11, 10 y 12. Se observa que, en temperaturas máximas, tanto del mes frío como del mes cálido, el centro presenta un sobrecalentamiento medio. Las zonas del norte y sur, como Oblatos y Las Pintas, respectivamente, presentan núcleos de mayor sobrecalentamiento, mientras que Las Águilas y Loma Dorada mantienen comportamientos más frescos. En temperaturas mínimas, horas en las que la ICU debería de ser más evidente, se observa la presencia de una isla fría en la parte centro y nororiental, con mayor magnitud en el mes más cálido.

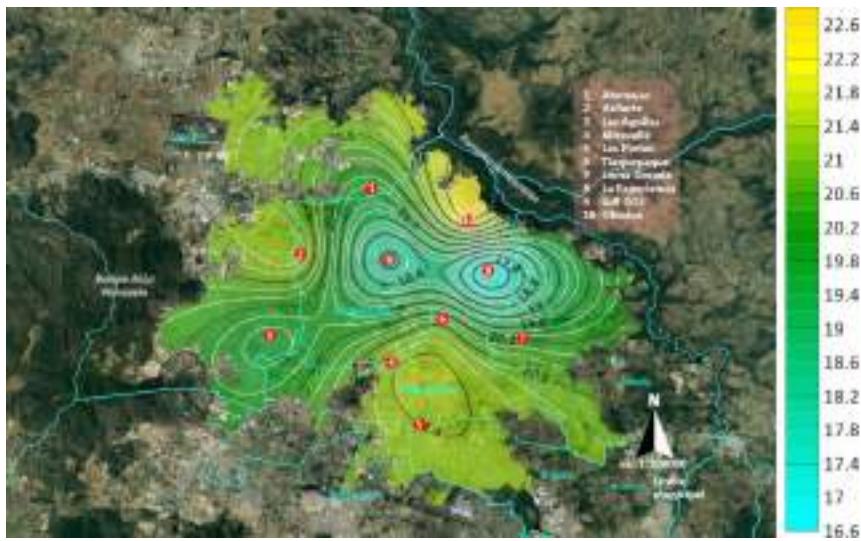


Figura 12. Isothermas de temperatura mínima promedio, mayo de 2016.

5 ISLA URBANA DE CALOR SUPERFICIAL

El fenómeno de la ICU es difícil de relacionar con un solo factor causa-efecto. El sistema atmosférico de las ciudades resulta del balance de formas y funciones dentro de la estructura urbana. Como se verá en esta sección, la capa sobre la cual se analice el sistema podrá o no estar interaccionando, de manera directa, con las otras capas.

En el 2010, Galindo (2010) presentó la identificación de ICU para las ciudades de Guadalajara y Colima. Con una metodología basada en técnicas de percepción remota, en combinación con un sistema de información geográfica, estimó la distribución espacial de la temperatura de superficie de la isla urbana (Hernández, 2010).

Al trabajo de Galindo (2010) se superpusieron las isothermas generadas a partir de los registros de EM (Figura 1). La Figura 13, de isothermas, muestra una coincidencia parcial al oriente y poniente del AMG entre la isla de calor atmosférico (isothermas en líneas continuas) y la isla de calor

superficial (isotermas en manchas de color), (Galindo, 2010). Los mapas de temperatura superficial (Galindo, 2010) muestran que las zonas norte y sur presentan menores temperaturas, con una zona central de mayor temperatura; sin embargo, las isotermas generadas a partir de los registros de EM unen el norte con el sur, generando un patrón diferente; es decir, que en este caso la ICU superficial respecto a la ICU atmosférico tienen poca relación.

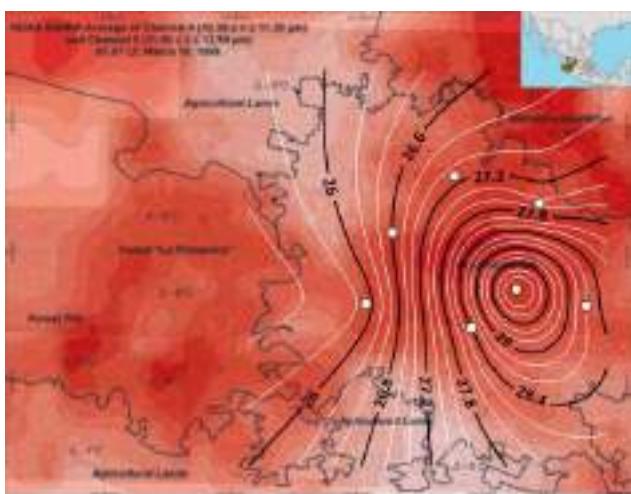


Figura 13. Isotermas atmosféricos vs. isotermas superficiales, hora 1:57, marzo de 1998. Con base en Galindo (2010).

En la Figura 14 se observa una diferencia cuantitativa evidente. Por una parte, la ICU superficial presenta valores que rondan los 40 °C, mientras que las isotermas de las EM presentan valores que rondan los 28 °C. Desde un punto de vista cualitativo, los mapas coinciden parcialmente en la zona sureste del AMG. Sin embargo, en la parte norte del AMG la ICU muestra algunas islas de calor que no se pueden explicar desde el punto de vista de las mediciones de las EM. De hecho, Galindo (2010) señala que al generar esta imagen satelital ocurría un incendio forestal cercano al bosque de La Primavera.

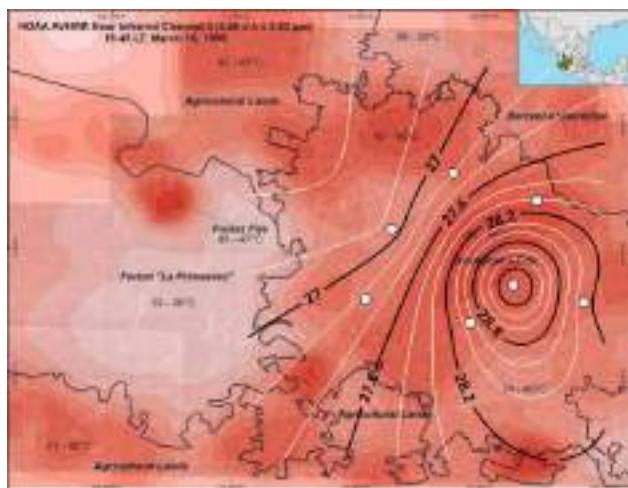


Figura 14. Isotermas atmosféricos vs. isotermas superficiales, hora 15:45, marzo de 1998. Con base en Galindo (2010).

En la Figura 15 hay muy poca relación entre las ICU superficial y atmosférico. Mientras que la ICU atmosférico muestra una isla de calor en torno al centro del AMG, la ICU superficial muestra una especie de archipiélago.

En la Figura 16 se presenta una diferencia muy marcada e interesante entre las ICU estudiadas. Por una parte, la ICU atmosférico muestra una zona de calor concéntrica al AMG, por su parte la ICU superficial muestra zonas de calor excéntricas al AMG, ubicando al norte la zona más caliente. Sin embargo, tal como se ha mencionado al comentar las figuras anteriores, las imágenes satelitales no reflejan la presencia de la barranca de Huentitán.

6 CONCLUSIONES

Stewart (2013) refiere la alta dificultad de establecer una relación causa-efecto para explicar las variables espaciales y temporales con el sistema atmosférico en las ciudades.

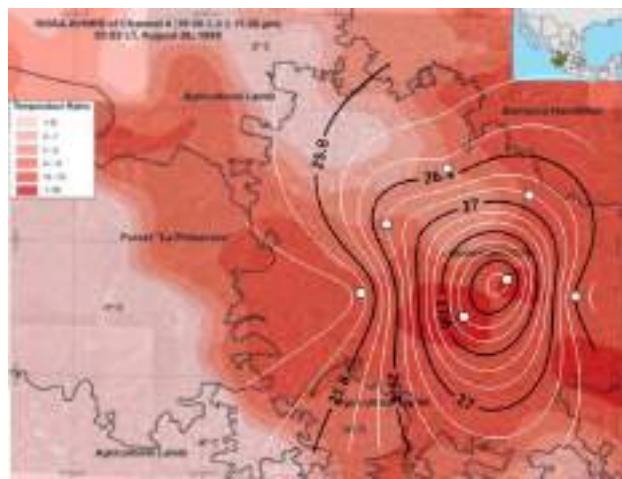


Figura 15. Isotermas atmosféricos vs. isotermas superficiales, hora 03:53, agosto de 1998. Con base en Galindo (2010).

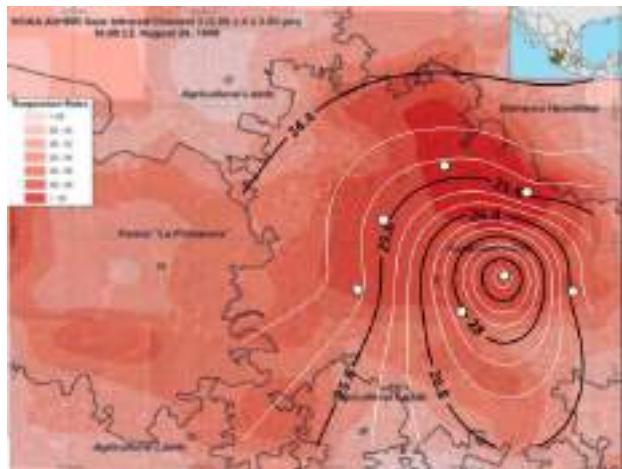


Figura 16. Isotermas atmosféricos vs. isotermas superficiales, hora 16:05, agosto de 1998. Con base en Galindo (2010).

Respecto a la presencia de la ICU, en las Figuras 6, 8, 11 y 12 se observa concentración de temperaturas altas al interior del AMG, al igual que en las Figuras 7 y 9, donde se observan varios núcleos o archipiélagos de calor, siendo las EM de La Experiencia, al centro, y Las Pintas, al sur, las más destacadas.

Respecto a la intensidad de la ICU, las diferencias son de 3.7 K entre la zona de mayor y menor sobrecalentamiento, considerando las isoterma de temperaturas máximas promedio (Figuras 9 y 10), y de 4.7 K en las temperaturas mínimas promedio (Figuras 11 y 12) para el día frío y el cálido, respectivamente.

Con respecto a su temporalidad, se observa una presencia de la ICU principalmente diurna, y por las noches se observa un fenómeno de oasis fresco en diversas zonas de la ciudad. En el segmento diurno, las EM La Experiencia y Las Pintas presentan las temperaturas máximas más altas tanto en el día frío como en el día cálido. Lo anterior indica la recurrencia de una zona de calentamiento atmosférico diurno en ambas zonas. En el horario nocturno, al momento de las temperaturas mínimas, Las Pintas permanece siempre con los valores más altos, mientras que La Experiencia cambia a presentar los valores más bajos. Al comparar las ICU atmosférico con las superficiales publicadas por Galindo (2010) (Figuras 13, 14, 15 y 16) es posible determinar que no solo son de intensidades diferentes, sino que además sus configuraciones y ubicaciones también difieren. Sin embargo, para el estudio del clima y bioclima urbano proporcionan información complementaria para lograr una mejor comprensión del fenómeno del calentamiento urbano.

Conviene apuntar que, no obstante la no simultaneidad de los mapas de temperaturas atmosféricas (de 2016) y de la superficie (de 1998, publicadas por Galindo, 2010), es de esperarse que no haya una coincidencia en las distribuciones espaciales de ambos campos térmicos, como lo prefiguran los mapas incluidos en el presente trabajo, aunque debe tomarse en cuenta que las variables que inciden en el desempeño térmico de cada uno de los dos medios, superficies de materiales y capa límite atmosférica, dependen de distintos mecanismos, y establecer las razones de las diferencias en la interacción entre ambos involucra una gran variedad de factores, cuyo estudio a profundidad queda como trabajo a realizar en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

A Jaime Omar Castro Díaz y Adrián Álvarez Pérez, de la licenciatura en Ciencias Atmosféricas de la Universidad Veracruzana, por su apoyo en la elaboración de los mapas de isotermas; a la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial del Estado de Jalisco, que proporcionó los registros de las estaciones meteorológicas de la red SIMAJ, y al Instituto de Astronomía y Meteorología Universidad de Guadalajara, que proporcionó registros de la estación meteorológica a su cargo.

REFERENCIAS

- Balchin, W.G.V. & Pye, N. (1947). A micro-climatological investigation of bath and the surrounding district. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 73, 297-323.
- Borrough, P.A. & McDonnell, R.A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press.
- Davidova, V. & Alamilla, D. (2019). Variación de la temperatura relacionada con el intenso desarrollo de la zona conurbada de Guadalajara, México (1996-2018) En N. J. Zapata-Montes (coord.), *Biología y Ciencias Agrícolas*. ECORFAN-México.
- Davydova-Belitskaya, V., Skiba, Y. N., Bulgakov, S. N. & Martínez, A. A. (1999). Modelación matemática de los niveles de contaminación en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México. Parte 1. Microclima y monitoreo de la contaminación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 15(2), 103-111.
- Galindo, I. A (2009). A Satellite Time Slots Climatology of the Urban Heat Island of Guadalajara Megacity in Mexico from NOAA /AVHRR THERMAL Infrared Monitoring (TIR). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11.
- 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. En *Primer Encuentro Académico CONAVI-CONACYT*.
- Galindo-Estrada, I. (2014). Las islas urbanas de calor: un problema creciente. En R. Valladares-Anguiano (coord.), *Diálogos entre ciudad, medio ambiente y patrimonio*. Universidad de Colima, pp. 151-155.

- García-Cueto, O. R., López-Velázquez, J. E., Bojórquez-Morales, G., Santillán-Soto, N. & Flores-Jiménez, D. E. (2021). Trends in temperature extremes in selected growing cities of Mexico under a non-stationary climate. *Atmósfera* 34(3), 233-54.
- Hernández, A. (2010). *Detección satelital de la isla de calor de la ciudad de Guadalajara*. Tesis para optar al grado de Ingeniero Topógrafo Geomático. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima.
- Hernández-Ceballos, A. M. (2011). *Detección satelital de la isla urbana de calor de la ciudad de Guadalajara*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Colima.
- Howard, L. (2006). *The Climate of London* [edición facsimilar a partir de los 3 volúmenes de 1833]. International Association for Urban Climate.
- INEGI (2020). *Geomédiana Landsat*.
- Jáuregui, E., Godinez, L. & Cruz, F. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment* 26B(3), 391-396.
- López García, A. R. (2018). Modelación espacial del riesgo por calor extremo en el Área Metropolitana de Guadalajara, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5, 52-63.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200-207.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Surfer (2021). *Surfer version 16.3.408*.
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I. R. & Cruz-Pastrana, D.A. (2022). Domestic electricity consumption in Mexican metropolitan areas under climate change scenarios. *Atmósfera*, 35(3).
- Tereschchenko, I. E. & Filonov, A. E. (2001). Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico, from 1926 to 1994 in relation to urban growth. *International Journal of Climatology*, 21(4), 483-494.

Variabilidad espaciotemporal de la isla de frescor urbano: Un estudio sobre las temperaturas rurales elevadas en el noreste de Brasil

Max Anjos¹, Gabriel Leitoles²

¹ Departamento de Geografía, Universidad Federal de Río Grande del Norte, Brasil. ORCID: 0000-0001-6394-1324. maxanjos@campus.ul.pt

² Departamento de Ciencias de la Terra, Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil. ORCID: 0000-0001-5527-6897. leitolesgabriel@gmail.com

RESUMEN

Aunque varios estudios han mostrado a las ciudades como puntos focales de las islas de calor urbano (ICU) y resaltado las numerosas ocasiones en las que estas tienen una intensidad significativa, son pocos los intentos de profundizar en la isla de frescor urbano (IFU), fenómeno que coexiste con la ICU y hace referencia al momento en que el ambiente de la zona rural es más cálido que el de la zona urbana. La evaluación de las IFU es importante ya que advierte sobre las altas temperaturas en las zonas rurales, que generalmente son desatendidas en los estudios de clima de ciudades tropicales. Investigamos la presencia significativa de IFU en Aracaju, una ciudad costera en el noreste de Brasil, a través de un monitoreo de patrones térmicos. Los resultados muestran que la IFU ocurre diariamente, representando el 12 % de las ocurrencias (1,843/15,640), lo que indica un evento más que aislado o esporádico en el contexto de diferencias térmicas urbano-rurales. A las intensidades horarias de la IFU se sumaron las condiciones meteorológicas, en las que se observó una máxima de 4.1 °C en condiciones de mucha nubosidad y tormenta. Mapeamos las IFU diurnas interpolando las

temperaturas del aire usando la clasificación de las zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés) y observamos que la atmósfera cercana a la superficie de las áreas rurales y periurbanas, clasificadas como LCZ 6, LCZ 7, LCZ 9, así como las clases de vegetación LCZ A y LCZ B, fueron 5.0 °C más cálidas que el área central, clasificada como LCZ 3 y LCZ 4. Este estudio también propone pautas climáticas para minimizar el exceso de calor en áreas rurales y urbanas y la transición entre áreas urbanas y rurales.

Palabras clave: isla de calor urbano, isla de frescor urbano, zonas climáticas locales, nordeste de Brasil.

ABSTRACT

Although several studies have pointed out many tropical cities as excellent examples of the existence of the urban heat island (UHI) phenomenon and stressed the numerous occasions it has significant magnitude, there have been few attempts to provide an in-depth analysis of the urban cool island (UCI), a phenomenon co-exists with UHI. It occurs when the atmosphere in the rural area is warmer than that of the urban one. The evaluation of UCI is essential because it draws attention to high rural temperatures generally negligible by the urban climate studies in tropical cities. Based on long-term monitoring of yearlong local thermal patterns, we evaluate the meaningful existence of the UCI in a mid-rise low-density Brazilian coastal city (Aracaju). The outcomes show that UCI occurs diurnally with 12 % of frequencies (1.843/15.640), indicating that UCI is more than an isolated or sporadic event in the context of urban-rural thermal differences. We aggregated the meteorological conditions to hourly UCI intensities and observed a maximum of 4.1 °C under Very cloudy and Thunderstone. Furthermore, we mapped the daytime UCI by interpolating the air temperatures derived from the Local Climate Zones (LCZ) classification, and we noted the near-surface air temperature in the rural or periurban areas, classified as LCZ 6, LCZ 7, LCZ 9, as well as types of natural LCZ A e LCZ B, were 5.0 °C warmer than the central areas, classified as mainly LCZ 3 and LCZ 4. This study also proposes

climatic guidelines to reduce the heat excess in urban and rural areas and transition between urban areas and rural ones.

Keywords: urban heat island, urban cool island, Local Climate Zones, Northeast of Brazil.

1 INTRODUCCIÓN

Las islas de calor urbanas (ICU) nos han ayudado a comprender el papel de las ciudades en el aumento localizado de la temperatura del aire y el consiguiente empeoramiento del malestar térmico, el consumo de energía y agua, y la contaminación del aire. La señal de que hay una Isla de Calor Urbano (ICU) se presenta cuando el aire en las áreas urbanas está más caliente que en las zonas no urbanas cercanas (Oke et al., 2017). La diferencia de temperatura positiva entre las zonas urbanas y rurales ha dado lugar a una gran cantidad de estudios sobre las causas y los efectos de las ICU en todo el mundo. Sin embargo, el aumento de la temperatura de las áreas rurales, en comparación con la de las áreas urbanas, se ignora constantemente en las ciudades tropicales, especialmente en Brasil.

La isla de frescor urbano (IFU) se refiere a la situación en la que el ambiente de la zona rural es más cálido que el de la zona urbana. La diferencia de temperatura rural positiva en relación con la urbana es el mecanismo más importante que subyace en la intensidad de la IFU y no debe confundirse aquí con la diferencia de temperatura puntual, por ejemplo, las temperaturas reducidas en las áreas verdes en relación con su área urbana circundante. La IFU se atribuye a las mismas causas que la ICU: el balance de calor urbano-rural, que produce diferentes tasas de calentamiento y enfriamiento cerca de la superficie mediadas por diferentes propiedades físicas de los usos del suelo y condiciones meteorológicas (Alonso et al., 2007; Mendonca, 2009; Taha, 1997; Yang et al., 2017). Después del amanecer, las superficies rurales comienzan a calentarse más rápidamente que las superficies urbanas debido a la admitancia térmica (efusividad térmica o inercia térmica), es decir, la capacidad de la superficie para almacenar y liberar calor (Chow & Roth, 2006). La geometría de los edificios, más altos

en las zonas centrales, bloquea la entrada de radiación directa de onda corta a la superficie, reduciendo la temperatura del aire durante el día. Otros factores parecen estar involucrados en la formación de la IFU, incluyendo la turbulencia y la advección del viento (Gedzelman et al., 2003; Morris & Simmonds, 2000), y el aumento de la radiación de onda larga producida por las nubes (Morris et al., 2001; Oke et al., 1991).

La IFU explica las bajas intensidades medias de la ICU o incluso su posible inexistencia en ciudades tropicales. Por ejemplo, Jauregui et al. (1992) reportaron una IFU de -1.5 °C en Guadalajara, México, durante la tarde, y sugirieron que la ciudad actúa como fuente de mezcla en la estación seca. En la India, Kumar et al. (2017) mostraron que más del 60 % de las áreas urbanas experimentaron una IFU durante el día con un rango de -1 a -5 °C. En Brasil se han documentado IFU por ejemplo en São Paulo con una media de -1 °C (Ferreira et al., 2013), con máximas de -1 °C en Florianópolis (Rocha et al., 2022) y -3 °C en Curitiba (Mendonça y Dubreuil, 2005), -5 °C en Santa Maria (Rovani et al., 2012) y -6 °C en Londrina (Anjos et al., 2020). Sin embargo, la comprensión de la IFU y las altas temperaturas rurales asociadas con ella han sido todavía poco exploradas.

Este capítulo está dedicado a investigar la variabilidad espaciotemporal de la IFU en Aracaju, una ciudad costera en el noreste de Brasil, con base en el monitoreo térmico local que permitió capturar diferentes patrones térmicos dentro de un amplio espectro de condiciones meteorológicas. El clima es tropical y húmedo con una estación cálida (octubre-marzo) e inviernos templados (abril-septiembre), cuyas temperaturas medias mensuales varían entre 27 y 24 °C, respectivamente. El incremento de la temperatura rural en unos grados puede impactar negativamente las áreas urbanas y el bienestar térmico de las personas. Por lo tanto, una mejor comprensión de las IFU conduce a nuevos e importantes conocimientos científicos, especialmente útiles para la evaluación bioclimática y para crear medidas para combatir el exceso de calor en las ciudades. En este sentido, este capítulo ofrece una serie de medidas y estrategias de intervención climática para reducir los efectos adversos de la IFU y mejorar el confort térmico en las zonas urbanas y rurales, así como en las zonas de transición entre ellas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio y monitoreo térmico

Aracaju presenta condiciones naturales y sociales favorables para estudiar las IFU. Ubicada en la costa noreste de Brasil, Aracaju es una de las ciudades planificadas más antiguas de Brasil, donde actualmente residen 640,000 personas con una densidad de población promedio de 3,000 habitantes por km² (IBGE, 2016). Su ubicación geográfica (10°51' y 11°07' Sur, 37°02' y 37°09' Oeste) y elevación (altitud máxima de 100 m.s.n.m.) exponen a Aracaju a una amplia gama de tipos de clima asociados con los diversos sistemas de macro y mesoescala, incluidos los vórtices ciclónicos de nivel superior, los vientos alisios y el sistema de brisa marina, que dan forma a los patrones térmicos locales (Anjos et al., 2020). La precipitación media anual supera los 1,300 mm y la humedad relativa media anual es de 70 %. La ciudad tiene niveles muy altos de insolación solar diaria, de 5 kWh m⁻² día⁻¹ en promedio durante todo el año (Anjos y Lopes 2017). Como la mayoría de las ciudades medianas de Brasil, el área central de Aracaju se caracteriza por un patrón compacto de edificios de densidad media con tres a nueve pisos y pocos espacios verdes, mientras que el área rural o periurbana contrasta con un patrón de edificaciones dispersas de hasta tres plantas y una mayor presencia de vegetación y superficies naturales.

Se realizaron monitoreos horarios de temperatura y humedad relativa entre 2014 y 2016 con el fin de estudiar patrones térmicos locales en Aracaju. La red meteorológica urbana constaba de siete sensores tipo HOBO (U23 Pro v2 Temperature/Relative Humidity Data Logger U23-001, Onset Computer Corporation®, Bourne, MA, USA) que operan con una precisión de ±0.21°C y una resolución de 0.02 a 25 °C, y contaba con dos estaciones meteorológicas automáticas más, administradas por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET) y la Fuerza Aérea.

Para una correcta evaluación de los climas locales, la instalación de sensores siguió una serie de principios y conceptos definidos para áreas urbanas (Oke, 2006), a saber:

- Los sensores fueron instalados en diferentes categorías de uso de suelo de acuerdo a las LCZ. Estas zonas se definen como regiones con

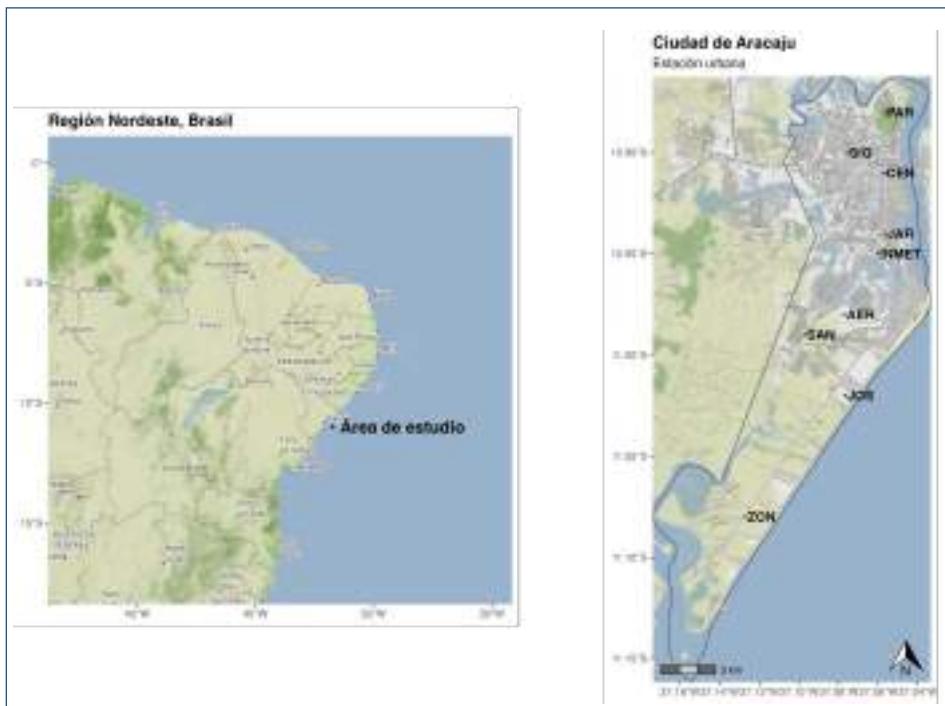


Figura 1. Ubicación geográfica de Aracaju en el contexto de América Latina y el nordeste de Brasil. Los círculos negros en el mapa de Aracaju son los sensores de temperatura y humedad relativa, llamados estación urbana, que se describen a continuación: Parque da Cidade (PAR), Siqueira Campos (SIQ), Centro de la Ciudad (CEN), Jardins (JAR), Santa María (SAN), Praia José Sarney (JOS) y Zona de Expansão (ZON). Las estaciones meteorológicas automáticas son INMET y Aeropuerto (AER).

Fuente cartográfica: colaboradores de OpenStreetMap, 2022.

características similares en términos de cobertura superficial, estructura, materiales de construcción y actividades humanas, y se extienden desde cientos de metros hasta varios kilómetros en escala horizontal (Stewart & Oke, 2012). La ubicación de los sensores en cada LCZ permite captar los mayores contrastes térmicos de la ciudad. Para mapear la LCZ utilizamos LCZ Generator: una aplicación web para crear mapas de zonas climáticas locales (Demuzere et al., 2021), disponible en <https://lcz-generator.rub.de/>.

- Todos los sensores se colocaron a 3.5 m sobre el suelo para representar los cambios de temperatura que ocurren en la capa de dosel urbano o

Urban Canopy Layer, la capa de aire vertical entre la superficie y el centro de la parte superior de los edificios (Oke et al., 2017).

- Todos los sensores se colocaron en sitios con valores de factor de visibilidad del cielo (FVC) mayores a 0.6 a fin de garantizar que no haya influencia de la sombra en las mediciones de temperatura y en ubicaciones paralelas a la costa este para capturar la penetración de los vientos alisios y el sistema de brisas, frecuentes en la región.
- Los metadatos, información sobre los sensores y ubicaciones (Tabla 1) fueron elaborados con el fin de controlar la calidad de los datos, la transparencia de los métodos y la correcta interpretación de los datos (Muller et al., 2013).

TABLA 1. METADATOS DE LAS ESTACIONES URBANAS EN ARACAJU

Estaciones urbanas	Parámetros físicos ¹						
	FVC (0-1)	PAC (%)	PAV (%)	PAI (%)	z_0 (m)	zd (m)	zH (m)
PAR	0.948	5.5	73	7.5	0.6	19.7	0.4
JAR	0.768	46	12	51	1.9	20	16
CEN	0.708	69	2.3	93	1.0	9.8	10
SIQ	0.808	76	3.5	95	1.6	13	11
SAN	0.953	25	9.5	50	0.37	9.0	5.8
JOS	0.965	12	6.0	23	0.25	3.7	6.7
ZON	0.981	50	26	48	0.10	1.6	6.5

¹FVC significa factor de visibilidad del cielo; PAC, proporción de área construida; PAV, proporción de área con vegetación; PAI, proporción de área impermeable; z_0 , rugosidad aerodinámica en metros; zd, altura del plano de desplazamiento en metros; zH, altura de los edificios en metros. Sugerimos al lector consultar a Oke et al. (2017) para obtener más detalles sobre estos parámetros físicos.

2.2 Anomalías térmicas y LCZ

Para evaluar las diferencias de temperatura influenciadas por las clases de LCZ, calculamos la anomalía térmica de cada estación urbana $\Delta T'_{F(i)}$ usando la siguiente ecuación (Alexander & Mills, 2014; Kotharkar & Bagade, 2018; Anjos, et al., 2020):

$$\Delta T'_{F(i)} = T_{F(i)} - \frac{\sum T_{F(i)}}{n}, \quad (1)$$

Donde $T'_{F(i)}$ es la temperatura media de las estaciones/LCZ urbanas y n es el número de estaciones de las LCZ. Esta ecuación se aplicó en el turno diurno (8:00 a 17:00 h) referente a las estaciones de primavera (septiembre, octubre y noviembre), verano (diciembre, enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo) e invierno (junio, julio y agosto) en el periodo 2014-2016.

2.3 Definiendo la IFU

Definimos la intensidad de la IFU adoptando la metodología utilizada por Anjos y Lopes (2017), quienes categorizaron los puntos de observación en tres grupos con similitud térmica a partir de la técnica de análisis de conglomerados combinada con los valores de las propiedades físicas dentro del área de amortiguamiento (500 m), como se ilustra en la Figura 1. Los grupos son:

Grupo 1: formado por las estaciones Jardins, Centro y Siqueira Campos, ubicadas en las áreas centrales y caracterizadas por densidad media: FVC < 0.70, proporción de área construida (PAC) entre 60 y 70 %, proporción de área impermeable (PAI) de 70 %, z_0 2.0 m y proporción de área con vegetación (PAV) de hasta 12 %.

Grupo 2: formado por las estaciones Zona de Expansão, Santa Maria y Praia José Sarney, ubicadas en áreas periurbanas y rurales, al sur de la ciudad, y caracterizadas por bajas densidades: FVC > 0.80, PAC entre 12 y 23 %, PAI entre 23 y 49 %, z_0 0.25 m y PAV entre 6 y 24 %.

Grupo 3: formado por la estación Parque da Cidade, ubicada en el norte de la ciudad, representativa de la influencia de las áreas verdes. La superficie interior de la zona de amortiguamiento está cubierta por un 73 % de vegetación con árboles y arbustos.

Con base en estos grupos de similitudes térmicas, calculamos la intensidad de IFU de la siguiente manera:

$$\text{IFU} = \text{Tr}(\text{promedio del grupo 2}) - \text{Tu}(\text{promedio del grupo 1}), \quad (2)$$

Donde Tr es la temperatura media horaria de las estaciones del grupo 2 y Tu es la temperatura media horaria de las estaciones del grupo 1 (IFU = valores positivos). Cabe señalar que la utilización de la temperatura media entre estaciones de los grupos 1 y 2, y no simplemente la temperatura de una única estación representativa de la zona urbana y otra de la zona rural, evita que influencias microclimáticas, propias de cada punto, prevalezcan sobre la escala local. Así, combinando las medias de temperatura de los grupos y adoptando únicamente diferencias rural-urbanas > 0.3 °C por posibles errores de sensor entre 0 y 0.2 °C, garantizamos la representatividad térmica local necesaria para definir la existencia e intensidad de la IFU.

2.4 Mapeo de la IFU

Las temperaturas fueron interpoladas combinando las clases LCZ con kriging y el enfoque de cuadrícula (Alexander & Mills, 2014; Anjos et al., 2020). La idea implícita es que el valor de temperatura de una estación urbana dentro de una celda de cuadrícula muestreada con una clase LCZ se puede asignar a celdas de cuadrícula no muestreadas con la misma clase LCZ. Por lo tanto, creamos una cuadrícula de celdas de 500 x 500 m en ArcMap/ARCGIS y la superpusimos en el mapa LCZ previamente vectorizado para seleccionar las celdas muestreadas y no muestreadas y las respectivas clases LCZ muestreadas y no muestreadas. Luego, las temperaturas muestreadas, medidas en la estación urbana (celda), se transfirieron a las celdas sin muestrear y se interpolaron utilizando el método de

kriging ordinario. Con esto mapeamos el campo térmico representativo de la máxima intensidad de la IFU. La ventaja de combinar la interpolación y el mapa LCZ está respaldada por la extensa validación del sistema LCZ en varios contextos climáticos y los límites espaciales bien definidos de las clases de las LCZ. La limitación de este método radica en cuán correctamente se clasifican las LCZ así como en la densidad de puntos de observación compatibles con el área de interés. Por lo tanto, la evaluación del mapa de campo térmico presentado en este capítulo es limitada y debe tomarse con cautela en una eventual aplicación en la planificación urbana, ya que solo se utilizaron siete puntos de observación y se clasificaron con LCZ y, con ello, los valores de temperatura derivados de la interpolación estadística pueden subestimar o sobreestimar los valores reales.

2.5 **Condiciones meteorológicas**

Investigamos las condiciones meteorológicas que favorecen el desarrollo de IFU aplicando datos meteorológicos medidos en la estación del Aeropuerto (Aeropuerto/Santa María/SBAR, 0.98 °S, 37.07 °W, Figura 1) recopilados en la plataforma Weather Underground (www.wunderground.com). Esta plataforma proporciona informes con datos continuos y por hora en formato de código METAR; por ejemplo, SBAR 010300Z 32005KT 9999 SCT017 SCT070 22/21 Q1016. Los detalles sobre cómo descifrar los códigos METAR se pueden encontrar en el MANUAL METEOROLÓGICO FEDERAL No. 1 – FMH1/OFCM/2005. En este estudio, usamos promedios por hora de la velocidad del viento y las condiciones climáticas que se dividen en condiciones del cielo e intensidad de la precipitación (Tabla 2). Las condiciones del cielo (o nubosidad) se definieron en cuatro categorías: cielo despejado (0 octas), parcialmente nublado (entre 1/8 y 4/8 octas), muy nublado (entre 5/8 y 7/8 octas) y completamente nublado cubierto (8 octas); mientras que la intensidad de la precipitación se categorizó en: precipitación baja (2-4 mm por hora), precipitación moderada (5-9 mm/hora), precipitación fuerte (10-40 mm/hora) y tormenta (> 40 mm/hora).

TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL CIELO E INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN

		Criterio ¹	Definición ²	Unidad de medida
Condiciones del cielo	Cielo despejado	Sin nubes	0	octas
Intensidad de precipitación	Parcialmente nublado	Pocas nubes y dispersas	1/8-4/8	octas
	Muy nublado	Racimos de nubes	5/8-7/8	octas
	Cielo completamente cubierto	Cielo completamente cubierto por nubes	8	octas
	Poca precipitación	Gotas dispersas de tamaño hasta 2.54 mm por hora y máximo 0.25 mm ⁻¹ en 6 minutos	2-4	mm/hora
	Precipitación moderada	Gotas individuales entre 2794 y 7.62 mm ⁻¹ por hora o entre 0.25 y 0.762 mm ⁻¹ en 6 minutos	5-9	mm/hora
	Elevada precipitación	Gotas individuales mayores a 7.62 mm ⁻¹ por hora o mayores a 0.762 mm ⁻¹ en 6 minutos	10-40	mm/hora
	Tormenta	Tormenta local producida por nubes cumulonimbus y que puede ir acompañada de relámpagos o truenos. La lluvia y los vientos fuertes pueden o no ocurrir	>40	mm/hora

¹Criterios adaptados de FEDERAL METEOROLOGICAL HANDBOOK No. 1 – FMH1/OFCM/2005 y Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos - CPTEC/INPE.

²Definición basada en la Organización Meteorológica Mundial.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de los patrones térmicos a través de las LCZ

El mapa de la Figura 2 muestra la diversidad de uso del suelo en Aracaju y su región con base en LCZ. La combinación particular de propiedades físicas de cada clase de LCZ influye en la temperatura del aire cerca de la superficie, cuyo mapeo nos da una imagen aproximada de los climas locales

"potenciales", aunque sea conceptualmente. A partir de la Figura 2a, es posible identificar la dominancia de la clase LCZ 3 en el área central (ocupación compacta y edificios bajos), seguida de parches de suelo cubiertos por LCZ 4 (ocupación abierta y edificios altos), LCZ 5 (ocupación abierta y edificios medianos) y LCZ 7 (ocupación desordenada y edificios bajos). Mientras que las superficies de las áreas rurales y periurbanas están cubiertas por la mezcla de clases tipo construidas y naturales, como LCZ 9 (ocupación poco densa con edificios aislados), LCZ 6 (ocupación abierta y edificios bajos), LCZ A (vegetación densa) y LCZ B (vegetación abierta).

La fiabilidad del mapa LCZ en relación con las características reales del terreno se puede medir a partir de las métricas de la Figura 2b: fiabilidad general (OA, *Overall Accuracy* en inglés), fiabilidad general de las clases urbanas de LCZ (OA_u), fiabilidad global de las clases LCZ con edificaciones versus natural (OA_{bu}), fiabilidad ponderada (OA_ω) y las métricas F1. Para obtener más información sobre estas métricas, consulte Demuere et

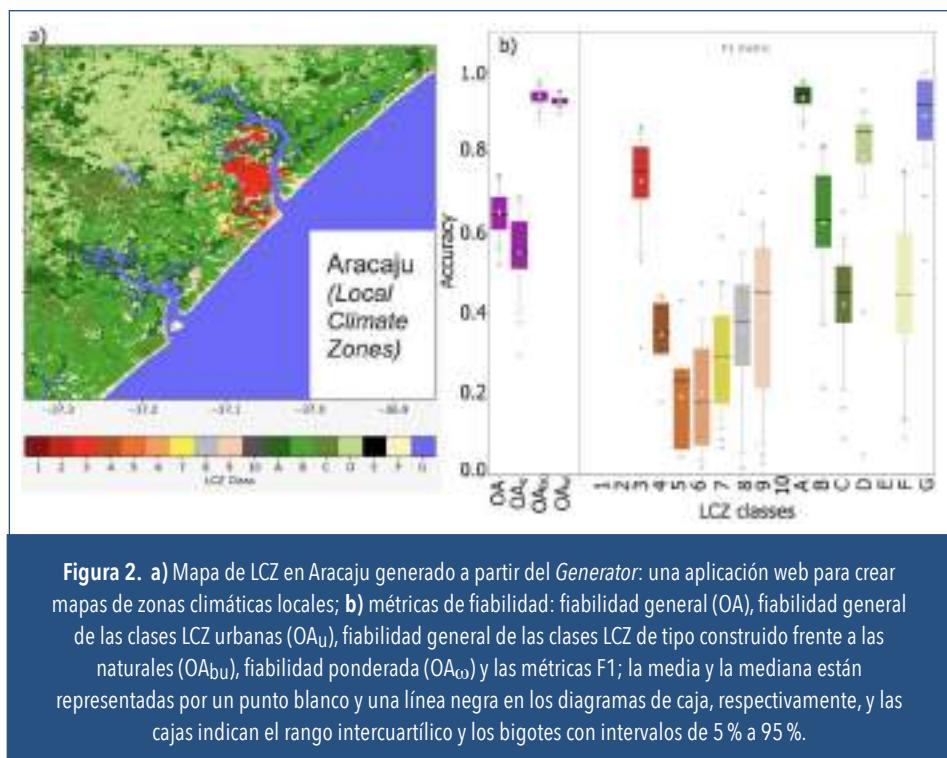


Figura 2. a) Mapa de LCZ en Aracaju generado a partir del *Generator*: una aplicación web para crear mapas de zonas climáticas locales; b) métricas de fiabilidad: fiabilidad general (OA), fiabilidad general de las clases LCZ urbanas (OA_u), fiabilidad general de las clases LCZ de tipo construido frente a las naturales (OA_{bu}), fiabilidad ponderada (OA_ω) y las métricas F1; la media y la mediana están representadas por un punto blanco y una línea negra en los diagramas de caja, respectivamente, y las cajas indican el rango intercuartílico y los bigotes con intervalos de 5 % a 95 %.

al. (2021). Por ejemplo, la LCZ 3, que representa la clase más grande de la ciudad, ocupando un área de 8.2 km², tiene una precisión del 93.8 %, mientras que la LCZ 8 tiene un 14 % debido a la confusión con las clases similares LCZ 6, 5 y 7 en el proceso de clasificación. En general, los resultados de estas métricas demuestran una precisión razonablemente satisfactoria de la clasificación LCZ para el contexto local.

Si se consideran las anomalías relativas de temperatura diurna y estacional de cada LCZ, calculadas por la Ecuación 1, podemos ver en la Figura 3 que las mayores anomalías positivas ocurrieron durante el invierno, asociadas a la LCZ de tipo construido, como la LCZ 8 con 1.5 °C y LCZs 3

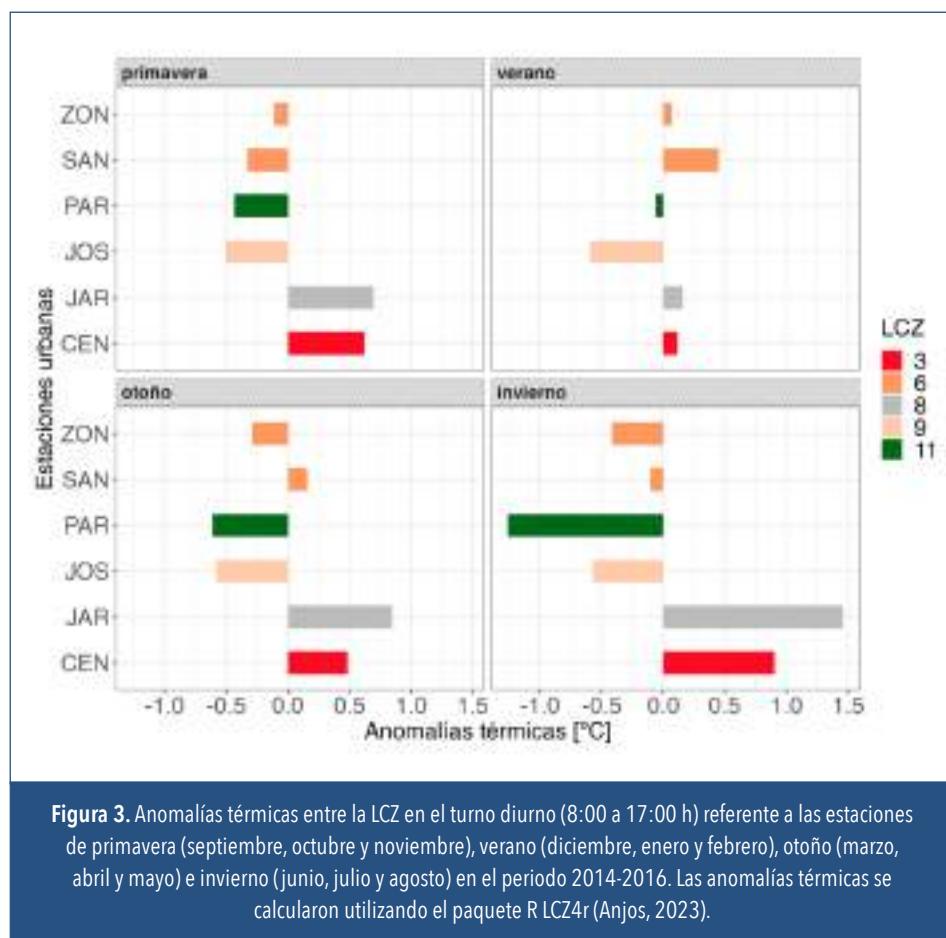


Figura 3. Anomalías térmicas entre la LCZ en el turno diurno (8:00 a 17:00 h) referente a las estaciones de primavera (septiembre, octubre y noviembre), verano (diciembre, enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo) e invierno (junio, julio y agosto) en el periodo 2014-2016. Las anomalías térmicas se calcularon utilizando el paquete R LCZ4r (Anjos, 2023).

con 0.8 °C; mientras que las anomalías negativas fueron con LCZ del tipo escasamente construido, LCZ6 (-0.4 °C) y LCZ 9 (-0.5), y el tipo natural LCZ A con -1.2 °C. Esto corrobora el hecho de que la clasificación de la cobertura del suelo en forma de LCZ refleja, en promedio, los patrones térmicos inherentes a cada clase de LCZ.

3.2 IFU y condiciones meteorológicas

La IFU convive diariamente con la ICU de Aracaju, representando el 12 % de las ocurrencias (1,843 de un total de 15,640 en el periodo 2014-2016), con un promedio general de 0.8 °C, lo que indica que es un evento más que aislado o esporádico en el contexto de temperaturas intraurbanas. La ausencia de diferencias térmicas rural-urbanas, entre 0 y 0.2 °C, sumó el 8 % (1,251/15,640) del total de la muestra, que sumadas a las frecuencias de la IFU representan el 20 % de aquellas situaciones en las cuales no se produjo la ICU. Como se muestra en la Figura 4, la IFU está presente durante todo el día con un máximo de 270 casos a las 07:00 y 08:00 h y un mínimo de 80 a las 18:00 h. Las intensidades máximas de IFU, todas ellas superiores a 2 °C, se registraron regularmente a lo largo del día, con un máximo de 4.1 °C a las 12:00 h (Figura 5).

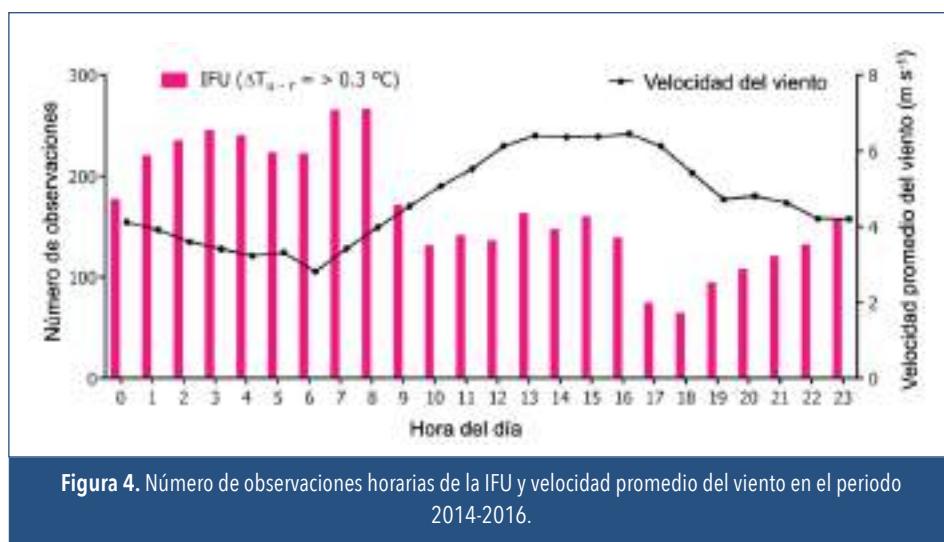


Figura 4. Número de observaciones horarias de la IFU y velocidad promedio del viento en el periodo 2014-2016.

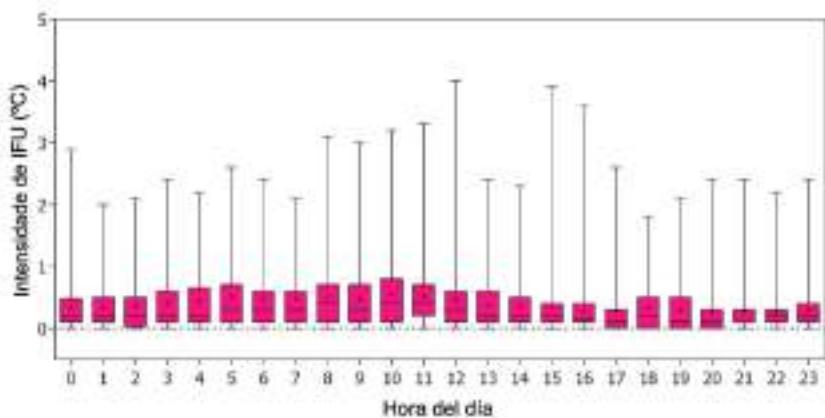


Figura 5. Boxplots horarios con valores IFU máximos en el periodo 2014-2016. El signo + indica los valores medios y encuadra los percentiles 25 y 75.

En comparación con las grandes ciudades, el área central de Aracaju tiene una densidad relativamente baja (valores promedio de FVC > 0.70 y z_0 hasta 2.0 metros) y esto hace que la estructura urbana sea más eficiente en la disipación y advección del calor almacenado en las superficies urbanas o cañón, generando así un equilibrio radiativo entre el centro de la ciudad y las zonas rurales. La zona rural o periurbana, por su parte, se caracteriza por el predominio de superficies naturales como LCZ clases 12 (arbolado disperso), D (vegetación baja), 9 (edificación escasa) y la presencia de suelos desnudos y secos que tienen una alta admitancia térmica en relación con las superficies urbanas. En dos ciudades brasileñas, Londrina y Maringá, en el sur de Brasil, Mendonça (2009) reportó una IFU con intensidad de hasta -4.5 °C durante el verano, cuando el suelo cultivable estaba desnudo y seco. La alta insolación diaria de $5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ es indicativa de cuánto están expuestas las superficies urbanas y rurales la mayor parte del día, y esta condición natural destaca el rápido calentamiento de las superficies rurales, lo que contribuye a un aumento de su temperatura.

El viento es otro factor importante para la formación de las IFU. El clima en Aracaju está influenciado por el mar y, en particular, la incursión de los vientos alisios provenientes del este y sudeste constituyen la principal fuente de traslado de masas de aire húmedo del océano Atlántico a la ciudad.

Entre las 06:00 y 07:00 h, cuando se registraron los mayores valores de IFU (Figura 4), la velocidad del viento tuvo el promedio más bajo de 3.0 m s^{-1} , lo que sugiere que es un factor determinante no solo para reducir la intensidad de la ICU de Aracaju, como se reporta en estudios previos (Anjos & Lopes, 2017), sino también un factor que favorece el desarrollo de IFU.

El histograma de la Figura 6 muestra la relación entre el número de observaciones IFU por hora y las condiciones meteorológicas, es decir, las condiciones del cielo y la intensidad de las precipitaciones. Encontramos que las IFU ocurrieron mayoritariamente en condiciones de nubosidad parcial, que corresponden al 78.8 % de las ocurrencias (1,274 de un total de 1,659 en las que las diferencias rural-urbanas son mayores a $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), indicando un posible efecto parcial de las nubes sobre la formación de la IFU.

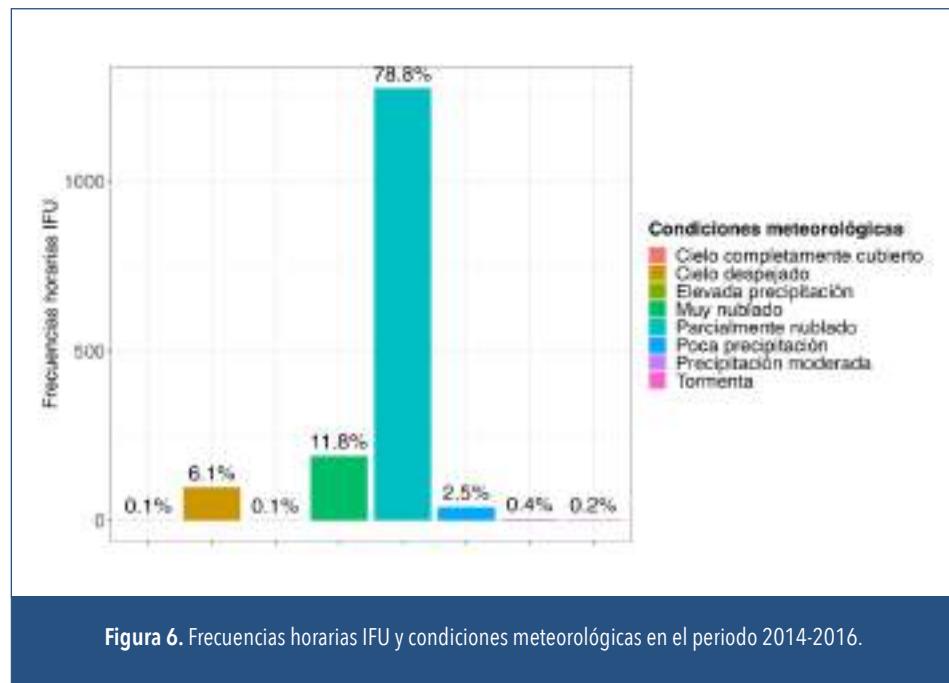


Figura 6. Frecuencias horarias IFU y condiciones meteorológicas en el periodo 2014-2016.

El aumento de la radiación de onda larga producida por las nubes ha sido documentado en la literatura como una de las posibles causas del desarrollo de IFU (Morris et al., 2001; Oke et al., 1991). En el caso de Aracaju,

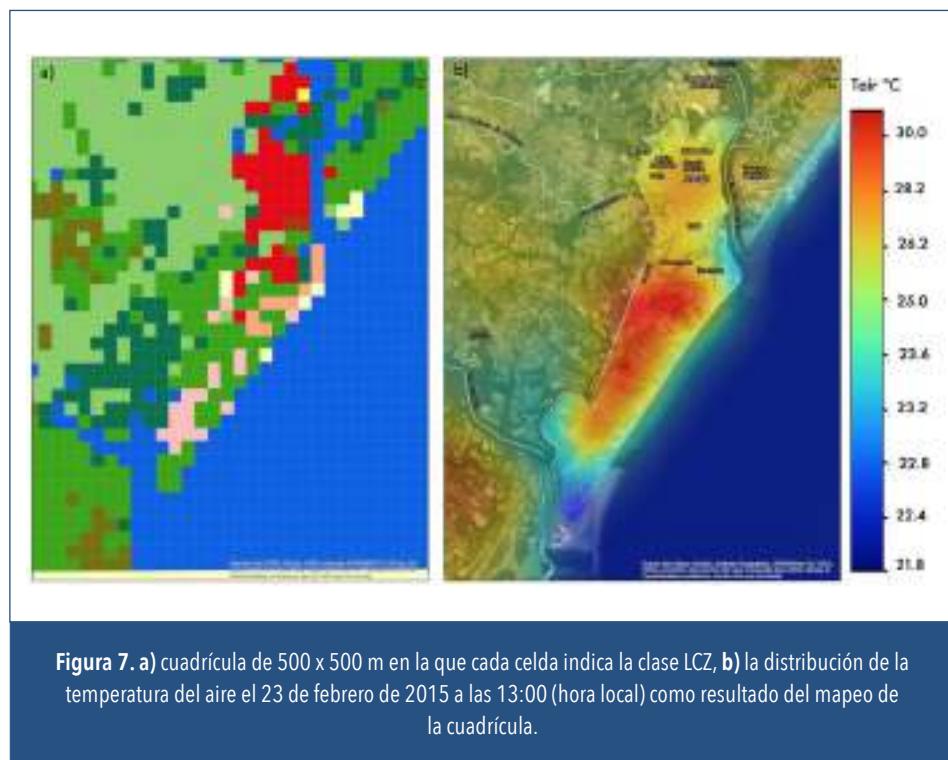
nuestra hipótesis es que la variación espacial de la nubosidad sobre el área cambia el equilibrio de la radiación de onda corta y larga que llega a la superficie terrestre, influyendo en el desarrollo de la IFU. Por ejemplo, condiciones de cielo despejado sobre el área rural implicarían un mayor aporte de radiación solar directa, contribuyendo positivamente al aumento de las temperaturas rurales cercanas a la superficie. Otro punto que vale la pena mencionar es el papel de la brisa marina, que en el noreste de Brasil ha sido identificada como frente de brisa, una línea de nubes tipo cumulimbus que se forma paralela a la costa (Planchon et al., 2006). En estudios recientes, Anjos et al. (2019; 2020) demostraron que el movimiento progresivo del frente de brisa marina hacia el interior de la región modifica el equilibrio nuboso y, en consecuencia, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie. Encontraron que los días con frente de brisa se asocian con un aumento promedio de la radiación solar de 80 w m^{-2} y 1.0°C en la temperatura del aire, generando un aumento del malestar térmico, lo que podríamos suponer aquí una ganancia adicional en los valores de radiación solar responsable del desarrollo de las IFU. Por otra parte, la posible acción de la brisa terrestre puede influir en los patrones térmicos locales y, por ende, en la dinámica de las IFU, algo a lo que debe darse importancia en futuras investigaciones.

La IFU no está bien definida cuando está acompañada de eventos de precipitación. Observamos una intensidad máxima extrema de 4.1°C en condiciones muy nubladas y tormentosas. Algunos estudios (por ejemplo, Steinecke, 1999) reportan casos de ICU incipientes bajo inversiones con tormentas frecuentes, mientras que otros estudios (Bornstein & Lin, 2000; Dixon & Mote, 2003; Jauregui & Romales, 1996) abordan el posible efecto de la ICU en el inicio de tormentas eléctricas o en el aumento de las anomalías de precipitación convectiva relacionadas con las áreas urbanas. Sin embargo, es muy poco probable que tales efectos ocurran en Aracaju debido a la baja densidad compacta de los edificios, que son insuficientes para crear una zona de convergencia responsable de eventos de lluvia y tormentas. La presencia de IFU en condiciones de lluvia ligera y tormenta (Figura 6) apunta a sistemas sinópticos de mesoescala que producen precipitación, como por ejemplo los vórtices de ciclones de nivel superior, como las posibles causas de la variabilidad de IFU inducida por la intensidad de

la precipitación. Por ejemplo, Anjos et al. (2020) muestran que los vórtices de ciclones de nivel superior corresponden al 81 % de los días del verano de 2015 en Aracaju, incluida la mayor parte de los totales de precipitación acumulada en la madrugada y el inicio de la mañana.

3.3. Mapeo diurno de la IFU

El mapa de la Figura 7 ilustra el campo térmico diurno de Aracaju el 23 de febrero de 2015 a las 13:00 h, caracterizado por condiciones favorables para el desarrollo de la IFU, como mucha nubosidad y viento del este de 6.7 m s^{-1} . Se observa que la atmósfera cercana a la superficie de las zonas rurales y periurbanas, clasificadas como LCZ 6, LCZ 7, LCZ 9, así como por clases de vegetación LCZ A y LCZ B, fue 5.0°C más cálida que la zona central de la ciudad, clasificada por LCZ 3 y LCZ 4.



4 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Este capítulo llama la atención sobre la variabilidad espacio-temporal de la IFU. Los posibles efectos indeseables de la IFU en la salud de la población relacionados con el calor invitan a pensar en intervenciones urbanas especializadas. Las directrices climáticas tienen como objetivo combatir eficientemente las IFU y son un conjunto de medidas y herramientas encaminadas a reducir el exceso de calor y mejorar el confort térmico, la ventilación y la calidad del aire. Las orientaciones climáticas se basan fundamentalmente en Unidades de Respuesta Climática Homogénea (URCH) (Alcoforado, 1999), comúnmente conocidas como climatopos (Scherer et al., 1999), definidas como áreas homogéneas desde el punto de vista físico, en términos de morfología urbana y posición topográfica, que interactúan de una manera particular con la atmósfera. A cada climatopo le corresponderá su propio clima local, lo que condicionará de manera diferente la vida y las actividades humanas y, por tanto, requerirá de medidas específicas para reducir los impactos negativos, además de aprovechar las características positivas del clima urbano (Alcoforado et al., 2005).

Recientemente, Anjos et al. (2021) definieron la URCH de Aracaju y sugirieron una serie de recomendaciones para combatir la ICU. Aquí prestaremos especial atención a las recomendaciones que reducen el exceso de calor en las zonas rurales que, dado el proceso de expansión urbana, necesitan una intervención más regulada para garantizar unas condiciones climáticas agradables en el futuro.

Con base en la variabilidad espacio-temporal de las IFU, proponemos y concluimos este capítulo con las siguientes pautas climáticas:

- Reducir o evitar áreas densamente construidas (volumen del edificio y número de pisos) en la planificación futura, manteniendo una alta relación altura-longitud de los edificios para reducir el calor almacenado en las estructuras urbanas.
- Utilizar material de construcción y techo de baja conductividad con alto albedo.
- Promover áreas sombreadas preferiblemente con estructura verde para evitar la radiación solar excesiva.

- Mantener los espacios verdes existentes y favorecer el mantenimiento de pequeños jardines con vegetación arbórea y perenne, lo más densa posible, evitando espacios demasiado abiertos y expuestos a una radiación solar excesiva.
- Alinear la disposición de las futuras edificaciones con los vientos predominantes del este, noreste y sudeste para facilitar el flujo de aire y, al mismo tiempo, evitar la inclusión excesivamente densa de árboles de tamaño arbóreo en las calles y espacios abiertos orientados en estas direcciones.
- Evitar la construcción de edificios altos o medianos con la fachada orientada paralela al mar, permitiendo la libre circulación de los vientos.
- Mantener y promover corredores de ventilación verdes abiertos perpendiculares u oblicuos al mar, preservando los bosques de ribera fluviales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Alyson Fortuna por su importante contribución en la operación y el mantenimiento de la red de monitoreo en Aracaju.

REFERENCIAS

- Alcoforado, M. (1999). Aplicação da climatologia ao planeamento urbanístico: alguns apontamentos. *Finisterra: Revista Portuguesa de Geografia*, 34 (67-68), 83-94.
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Andrade, H. & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa*. Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa.
- Alexander, P. & Mills, G. (2014). Local Climate Classification and Dublin's Urban Heat Island. *Atmosphere*, 5(4), 755-744.
- Alonso, M., Fidalgo, M. & Labajo, J. (2007). The urban heat island in Salamanca (Spain) and its relationship to meteorological parameters. *Climate Research*, 34(1), 39-46.

- Anjos, M. (2017). *Orientações climáticas para o planejamento urbano numa cidade costeira do nordeste do Brasil : Aracaju-SE*. Tesis de doctorado. Universidad de Lisboa.
- Anjos, M. (2023). LCZ4r: Tools for Local Climate Zones and Urban Heat Island Analysis. R package version 0.1.0.
- Anjos, M. & Lopes, A. (2017). Urban heat island and Park cool island intensities in the coastal city of Aracaju, North-eastern Brazil. *Sustainability*, 9(8), 1379.
- Anjos, M., Lopes, A., Lucena, A. J. de & Mendonça, F. (2020). Sea Breeze Front and Outdoor Thermal Comfort during Summer in Northeastern Brazil. *Atmosphere*, 11(9), 1013.
- Anjos, M., Targino, A. C., Krecl, P., Oukawa, G. Y. & Braga, R. F. (2020). Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. *Building and Environment*, 185, 107268.
- Anjos, M., Lopes, A., Alves, E., Correia, E. & Mendonça, F. (2021). Assessment of Climatic Guidelines and Urban Planning in North-Eastern Coast of Brazil. En R. B. Singh, S. Chatterjee & M. Mishra (eds.), *Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development: Experiences from the Global South*. Springer.
- Bornstein, R. & Lin, Q. (2000). Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*, 34(3), 507-516.
- Chow, W. T. L. & Roth, M. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2243-2260.
- Demuzere, M., Kittner, J. & Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9.
- Dixon, P. G. & Mote, T. L. (2003). Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island-Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 42(9), 1273-1284.
- Ferreira, M. J., de Oliveira, A. P. & Soares, J. (2013). Diurnal variation in stored energy flux in São Paulo city, Brazil. *Urban Climate*, 5, 36-51.
- Gedzelman, S. D., Austin, S., Cermak, R., Stefano, N. & Partridge, S. (2003). Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 29-42.
- Jauregui, E. & Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 30(20), 3383-3389.
- Jauregui, E., Godinez, L. & Cruz, F. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26(3), 391-396.

- Kotharkar, R. & Bagade, A. (2018). Local Climate Zone classification for Indian cities: A case study of Nagpur. *Urban Climate*, 24, 369-392.
- Kumar, R., Mishra, V., Buzan, J., Kumar, R., Shindell, D. & Huber, M. (2017). Dominant control of agriculture and irrigation on urban heat island in India. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.
- Mendonça, F. (2009). Urban heat and urban cool islands: influences of vegetation and soil surface in some cities, southern Brazil. [The Seventh International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan. June 29–July 3].
- Mendonça, F. & Dubreuil, V. (2005). Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (região metropolitana de curitiba/pr). *RA'E GA - O Espaco Geografico Em Analise*, 8(9), 25-35.
- Morris, C. J. G. & Simmonds, I. (2000). Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. *International Journal of Climatology*, 20(15), 1931-1954.
- Morris, C. J. G., Simmonds, I. & Plummer, N. (2001). Quantification of the Influences of Wind and Cloud on the Nocturnal Urban Heat Island of a Large City. *Journal of Applied Meteorology*, 40(2), 169-182.
- Muller, C. L., Chapman, L., Grimmond, C. S. B., Young, D. T. & Cai, X. M. (2013). Toward a Standardized Metadata Protocol for Urban Meteorological Networks. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), 1161-1185.
- Oke, T. (2006). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. Instruments and Observing Methods (IOM): Report No. 81. World Meteorological Organization.
- Oke, T. R., Johnson, G. T., Steyn, D. G. & Watson, I. D. (1991). Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56(4), 339-358.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Planchon, O., Damato, F., Dubreuil, V. & Gouery, P. (2006). A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing. *Meteorological Applications*, 13(3), 225-234.
- Rovani, F. F. M., Rodrigues, E. da C., Sartori, M. da G. B. & Cassol, R. (2012). Ilhas de calor e frescor urbanas no bairro Camobi, Santa Maria /RS, em um dia sob domínio da massa polar velha ou modificada na primavera. *Revista Brasileira de Climatologia*, 10, 21-29.

- Scherer, D., Fehrenbach, U., Beha, H.-D. & Parlow, E. (1999). Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 4185-4193.
- Silveira da Rocha, G., Dubreuil, V. & de Assis Mendonça, F. (2020). A estabilidade atmosférica e a ilha de calor urbana na área conurbada de Florianópolis-SC. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27, 900-901.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99-103.
- Yang, X., Li, Y., Luo, Z. & Chan, P. W. (2017). The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, 37(2), 890-904.

SECCIÓN II

PERSPECTIVAS REGIONALES Y NACIONALES DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO

Tendencias de temperatura de la superficie terrestre en dos ciudades medias de México y sus periferias agrícolas durante el periodo 2003-2020

Richard Lemoine-Rodríguez¹, Azucena Pérez-Vega², Jean-François Mas³

¹Estudios Geolingüísticos, Universidad de Würzburg, Alemania; y Centro de Observación de la Tierra, Centro Aeroespacial Alemán. ORCID: 0000-0002-3679-6958. richard.lemoine-rodriguez@uni-wuerzburg.de

²Universidad de Guanajuato, México. ORCID: 0000-0002-9683-4207. azupv@ugto.mx

³Laboratorio de Análisis Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. ORCID: 0000-0002-6138-9879. jfmas@ciga.unam.mx

RESUMEN

El aumento de las temperaturas dentro de las ciudades es uno de los ejemplos mejor documentados de cambio climático local. Por el contrario, la comunidad científica ha prestado poca atención a las dinámicas del clima en áreas periurbanas. Esto representa un gran reto para la planeación regional, ya que en dichas zonas se encuentran grupos sociales vulnerables que en muchas ocasiones carecen de infraestructura adecuada para hacer frente al incremento de temperaturas. Además, gran parte de la producción agrícola que abastece a las ciudades se desarrolla en sus periferias, por lo que la disminución en la producción agrícola debido al aumento de temperaturas representa un riesgo para la productividad y por tanto para la seguridad alimentaria. En este estudio se analizaron las tendencias de temperatura de la superficie terrestre (TST) de las áreas urbanas y periferias de Celaya y León, dos ciudades mexicanas de tamaño medio, durante el periodo 2003-2020. Adicionalmente, se analizó la diferencia de

TST entre cada ciudad y sus alrededores (isla de calor urbano superficial, ICUS), así como la TST y sus tendencias en cada tipo de cubierta y uso del suelo de ambas periferias urbanas. Se emplearon imágenes de TST diurnas y nocturnas derivadas del sensor MODIS, capas de uso de suelo y vegetación e imágenes de satélite Sentinel-2 y Landsat 8. Las áreas urbanas y las periferias de ambas ciudades presentan tendencias de aumento de TST, con pendientes diurnas muy similares. En cambio, el indicador de ICUS no refleja este aumento en la TST urbana, ya que su pendiente es negativa. En las periferias urbanas, las áreas cubiertas por agricultura exhiben TST muy similares a las de los polígonos urbanos en 2020. Además, la pendiente de incremento de la TST diurna en áreas de cultivo es mayor que la de la clase urbana durante el periodo de estudio.

Palabras clave: clima urbano, periferia urbana, cambio climático, isla de calor urbano, urbanización.

ABSTRACT

Increasing urban temperatures are one of the most documented examples of local climate change. Contrastingly, the scientific community has paid little attention to the climate dynamics of periurban areas. This represents a challenge for regional planning, since vulnerable social groups, which often lack the adequate infrastructure to cope with climate change live in such areas. In addition, part of the agricultural production that supplies cities takes place on their outskirts. Therefore, the decrease in crop production due to increasing temperatures represents a risk for food security. In this study, the land surface temperature (LST) trends of the urban and periurban areas of Celaya and León, two medium-sized Mexican cities, were analyzed during the 2003-2020 period. The LST difference between each city and its surroundings (surface urban heat island; SUHI) was analyzed, as well as the LST trends in each land use/cover type in both urban peripheries. We employed daytime and nighttime LST images derived from the MODIS sensor, land cover/use spatial layers, and Sentinel-2 and Landsat 8 satellite images. Urban areas and the outskirts of both cities

showed increasing LST trends, with similar LST slopes. In contrast, the SUHI indicator does not reflect the urban LST increase, since its slope is negative. In the urban peripheries, the areas covered by agriculture exhibit similar LST to those of the urban polygons in 2020. In addition, agricultural areas exhibited a higher diurnal LST increase than the urban polygons during the study period.

Keywords: urban climate, urban periphery, climate change, urban heat island, urbanization.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los ejemplos más documentados de la influencia humana en el clima local son las islas de calor urbano (ICU). Las ICU se definen como la presencia de temperaturas mayores en el interior de las ciudades respecto a sus periferias, comúnmente denominadas como las zonas de referencia “rural” (Oke, 1982). Este fenómeno es consecuencia de las propiedades térmicas de los elementos que conforman el tejido urbano (por ejemplo, superficies impermeables), las actividades humanas (por ejemplo, transporte, industria) y la configuración espacial de la forma urbana (Oke et al., 2017; Lemoine-Rodríguez et al., 2022c). Sin embargo, no todas las ciudades presentan mayores temperaturas que sus áreas circundantes. Debido a las condiciones locales, ciudades ubicadas en climas áridos pueden presentar menores temperaturas diurnas que sus periferias (Chakraborty & Lee, 2019; Lemoine-Rodríguez et al., 2022b).

Los primeros trabajos enfocados en analizar el clima urbano emplearon temperaturas del aire medidas por medio de estaciones climáticas fijas a la altura del dosel, que es la capa que se extiende desde el nivel del suelo hasta la cima de las edificaciones urbanas (Oke et al., 2017). Esta capa brinda información sumamente importante, ya que representa el nivel del tejido urbano en el que la población experimenta las temperaturas en las ciudades. Sin embargo, los análisis basados en temperaturas del aire suelen estar limitados a un número reducido de observaciones (esto es, estaciones climáticas) a lo largo de las ciudades, lo que no permite analizar la

heterogeneidad del clima urbano de forma espacialmente continua (Voogt & Oke, 2003).

En las últimas décadas, la creciente disponibilidad de insumos de percepción remota ha permitido representar la heterogeneidad espacial y temporal del clima urbano mediante datos de temperatura de la superficie terrestre (TST), es decir, las temperaturas a nivel del suelo (Arnfield, 2003; Lemoine-Rodríguez et al., 2022b; Voogt & Oke, 2003). La TST es un indicador importante, ya que esta capa del clima local influye en el nivel inferior de la capa de temperaturas del dosel urbano. Además, aunque las ICU basadas en temperaturas del aire no son iguales a las ICU superficiales (ICUS, cuantificada mediante TST), se ha demostrado que ambos indicadores están relacionados, por lo que las ICUS pueden brindar información relevante para la planeación urbana (Mostovoy et al., 2006; Nichol et al., 2009).

Otra tendencia en aumento en el campo de la investigación sobre el clima urbano es el análisis de la TST de la dimensión material de la forma urbana, empleando diversos datos derivados de sensores remotos (Lemoine-Rodríguez et al., 2022c). En estos enfoques, el tejido urbano ha sido mayormente representado mediante capas de cubierta y uso del suelo. El aumento en la disponibilidad de datos más detallados sobre la forma urbana ha permitido la representación de la densidad de edificaciones y vegetación (por ejemplo, zonas climáticas locales), así como la altura y volumen de superficies construidas (Bechtel et al., 2019; Demuzere et al., 2021; Lemoine-Rodríguez et al., 2022c; Stewart & Oke, 2012). Así, se han detectado diferencias entre la TST de distintas cubiertas y configuraciones espaciales dentro de las ciudades, demostrando diversas e incluso contrastantes tendencias de TST dentro de ciudades ubicadas en distintos tipos de climas (Lemoine-Rodríguez et al., 2022c).

Debido a que los ejemplos más claros del cambio climático local se observan en las ciudades, y estas representan las zonas donde la mayor cantidad de población sufre los efectos de este fenómeno directamente, la mayoría de los trabajos de investigación se han enfocado en el análisis de las temperaturas urbanas (Huang et al., 2019; Oke et al., 2017). Por el contrario, poca atención ha sido prestada al clima local de las periferias de las ciudades, las cuales representan las áreas más dinámicas en términos

de cambios de cubierta y uso del suelo (Lemoine-Rodríguez et al., 2019). Un importante vacío en la literatura respecto al clima urbano es que no se conoce de forma precisa si, a pesar de ser menores, las TST en las periferias urbanas están aumentando más rápido que en el interior de las ciudades (Lemoine-Rodríguez et al., 2022b). Esto es de suma importancia, ya que los asentamientos humanos irregulares habitados por grupos sociales vulnerables suelen localizarse en las periferias urbanas, especialmente en países ubicados en Asia, África y América Latina. La mayor parte de la población que habita en dichas zonas carece de la infraestructura y la capacidad adaptativa para mitigar los efectos del aumento de temperaturas (Huang et al., 2019; Inostroza et al., 2016). Adicionalmente, las áreas periurbanas son sumamente importantes, ya que albergan remanentes de la vegetación local y, en muchos casos, son las áreas donde se desarrolla parte de la producción agrícola que abastece de suministros a las ciudades a las cuales rodean (Lemoine-Rodríguez et al., 2019). Las actividades agrícolas requieren de grandes volúmenes de agua para el desarrollo de los cultivos (especialmente la agricultura de riego). Lo anterior posiciona a la actividad agrícola como una de las más vulnerables ante los procesos de cambio climático, y, en consecuencia, la seguridad alimentaria también se verá afectada (IPCC, 2014; Schidhuber y Tubiello, 2017). Los escenarios climatológicos mundiales prevén un aumento en la temperatura media global de entre 2 y 5°C y menor precipitación para finales de este siglo, lo que afectará gravemente a la producción agrícola (IPCC, 2014; Sheridan & Bickford, 2011, Schidhuber & Tubiello, 2017). En consecuencia, se espera una menor cantidad y calidad de cultivos, por lo que los gobiernos y productores deben adaptar sus sistemas agrícolas a las temperaturas en aumento (Schidhuber & Tubiello, 2017).

Una región altamente vulnerable ante este escenario es América Latina, donde se han detectado aceleradas tendencias de expansión física de las ciudades en las últimas décadas (Inostroza et al., 2013; Lemoine-Rodríguez et al., 2020). Los futuros escenarios proyectan que esta tendencia continuará afectando a la población y a los ecosistemas locales debido al aumento de temperaturas, sequías y disminución de la producción agrícola, haciéndola una de las regiones que se verán más afectadas por el cambio climático (IPCC, 2014; Huang et al., 2019). A pesar de lo anterior,

aún es escasa la información sobre las tendencias climáticas locales en zonas urbanas de América Latina, especialmente en el caso de ciudades de tamaño medio (Lemoine-Rodríguez et al., 2022a; Palme, 2021). A pesar de su relevancia para grupos sociales vulnerables y la seguridad alimentaria, la información sobre las tendencias de las temperaturas en áreas periurbanas de ciudades de América Latina es prácticamente nula, lo cual representa una limitación importante para la planeación tanto local como regional.

Con la finalidad de contribuir al conocimiento sobre las dinámicas del clima local en ciudades medias de América Latina y sus periferias, el presente estudio evalúa las tendencias de la TST de las ciudades y áreas periurbanas de Celaya y León, ubicadas en el estado de Guanajuato, México. Nuestros objetivos fueron: 1) analizar las tendencias de TST diurna y nocturna al interior de cada ciudad y sus respectivas periferias y comparar sus patrones de cambio, 2) evaluar multitemporalmente la intensidad de las ICUS de ambas ciudades, así como su heterogeneidad espacial y 3) detectar los patrones espaciotemporales de la TST y su relación con los distintos tipos de cubierta y uso del suelo presentes en cada ciudad y su periferia. Para esto empleamos imágenes MODIS diurnas y nocturnas con 1 km de resolución espacial, datos de cubierta y uso de suelo escala 1:250,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017), un Modelo Digital de Elevación (MDE) del INEGI con 100 m de resolución espacial e imágenes Sentinel-2 (ESA, 2012) y Landsat 8 (USGS, 2020) con resolución espacial de 10 y 30 m, respectivamente.

2 MÉTODOS

2.1 Áreas de estudio

El estado de Guanajuato, ubicado al centro de la república mexicana, es un nodo económico que conecta a las tres ciudades más grandes del país: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. Guanajuato ocupa el vigésimo segundo lugar por su superficie en comparación con el resto de los treinta y dos estados del país. Sin embargo, se posiciona en el sexto lugar

considerando su densidad de población (201.5 habitantes por kilómetro cuadrado), con una población urbana que alcanza el 79 % (INEGI, 2020). Guanajuato es el tercer estado con mayor superficie utilizada en actividades de agricultura extensiva en México, con 47.8 % de su territorio ocupado por agricultura de riego y temporal, 7.2 % por pastizales inducidos y 2.6 % por asentamientos urbanos (Coll-Hurtado y Godínez, 2003; INEGI, 2017).

La porción sur del estado de Guanajuato constituye el bajío guanajuatense, región conocida como el “granero de México”, que fisiográficamente corresponde al Sistema Neovolcánico Transmexicano, con un promedio de



Figura 1. Ubicación geográfica de Celaya y León. En el recuadro de la esquina superior derecha el estado de Guanajuato, en el centro de México, está representado en rojo. El cuadro en blanco corresponde a la porción del estado que contiene León (esquina superior izquierda) y Celaya (esquina inferior derecha).

temperatura anual de 28 °C y una precipitación anual promedio entre 600 y 700 mm (Martínez-Arredondo et al, 2015). En esta región se ha desarrollado uno de los corredores agroindustriales más importantes de México, compuesto por León (1,579,803 hab., con una tasa de crecimiento anual urbanizada, TCAU, del 9 %), Irapuato (452,090 hab., TCAU de 9.2 %), Celaya (378,143 hab., TCAU de 9.9 %) y Salamanca (160,682 hab., TCAU de 11 %; INEGI, 2020), todas ellas, ciudades rodeadas por importantes superficies de agricultura de riego y temporal.

Debido a su importante desarrollo industrial y acelerado proceso de urbanización, en este estudio elegimos a León y Celaya como áreas de estudio (Figura 1). León cuenta con la industria peletera más importante del país, y Celaya con producción automotriz y agroindustrial. Ambas ciudades constituyen dos de los polos de atracción económica más importantes de México (Morales & Saavedra Silva, 2016). Ambas ciudades están establecidas sobre una extensa planicie de suelo de tipo vertisol, considerado el suelo más apto para la producción agrícola (Torres et al., 2016).

2.2 Bases de datos

Se emplearon todas las escenas diurnas y nocturnas de TST disponibles del producto MYD11A2, derivadas del sensor MODIS Aqua de la NASA para el periodo 2003-2020 (1,656 imágenes por ciudad). Los datos fueron descargados del servidor LP DAAC de la NASA mediante el paquete MODISstsp de R (Busetto y Ranghetti, 2016). Se usaron datos del sensor MODIS Aqua en vez de Terra debido a que su hora de captura de información es más cercana al pico de TST diario. Los productos MYD11A2 Aqua incluyen compuestos del promedio de TST en períodos de ocho días, tomados durante el día (~13:30 hora local) y la noche (~01:30), con una resolución espacial de un 1 km. Los productos de TST MODIS han sido validados mediante datos de campo, alcanzando niveles de error promedio ±1 K (Wan, 2014).

Para describir el límite espacial de Celaya y León se emplearon las capas vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI). La cubierta del suelo en

ambas ciudades y sus alrededores fue representada mediante el Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250,000 de la serie VI del INEGI (2017). Se usaron también imágenes Landsat 8 (USGS, 2020) y Sentinel-2 (ESA, 2012) del 8 de mayo de 2003 y del 1 de octubre de 2020 con una resolución espacial de 30 y 10 m respectivamente. La elevación del terreno fue representada empleando un Modelo Digital de Elevación (MDE) del INEGI con 100 m de resolución espacial derivado de curvas de nivel a escala 1:50,000 (INEGI, 2000).

2.3 Preprocesamiento de imágenes

Para emplear solo celdas MODIS de alta calidad, las escenas de TST fueron filtradas por medio del paquete LSTtools en R (Lemoine-Rodríguez & Mas, 2020; R Core Team, 2020), manteniendo solo datos con un nivel de error inferior a 2 K. Los productos MODIS fueron proyectados del sistema sinusoidal a la proyección UTM zona 14 norte, correspondiendo al sistema de coordenadas del resto de la información espacial empleada. Los valores de TST fueron convertidos de kelvin a grados Celsius. Las series de tiempo MODIS de TST diurna y nocturna fueron agregadas a promedios anuales para cada celda, obteniendo un volumen final de 18 imágenes (es decir, una por año) para cada ciudad y cada tiempo de medición (es decir, día y noche), correspondientes al periodo 2003-2020.

Con la finalidad de simplificar el sistema clasificatorio de los datos de uso de suelo y vegetación del INEGI, las clases fueron generalizadas a agricultura de riego, agricultura de temporal, bosque templado (primario y secundario), cuerpos de agua, pastizal, áreas sin vegetación, selva baja secundaria arbórea, selva baja secundaria arbustiva y uso urbano. Debido a la baja resolución espacial de los datos derivados del sensor MODIS (1 km), diversas celdas de estas imágenes corresponden a una mezcla de diferentes tipos de cubierta. Para mitigar este efecto, se seleccionaron celdas con alto grado de homogeneidad espacial, en las cuales más de 80 % de su área corresponde a una sola categoría de cubierta o uso del suelo. Este proceso de selección se llevó a cabo con base en la interpretación

visual de imágenes Landsat 8 y Sentinel-2 del inicio y del fin del periodo de estudio. Todos los procesamientos y análisis posteriores se llevaron a cabo en el ambiente para análisis estadístico R (R Core Team, 2020), empleando los paquetes LSTtools (Lemoine-Rodríguez & Mas, 2020), raster (Hijmans, 2021) y trend (Pohlert, 2020).

2.4 Análisis de TST e ICUS

Se emplearon distintas unidades espaciales para analizar la evolución de la TST en ambas áreas de estudio. Se calculó el promedio de TST anual para cada ciudad y su periferia. Las periferias fueron definidas espacialmente por un área de influencia (o “buffer”) de 10 km a partir del límite urbano de cada ciudad. Al calcular el promedio dentro de la periferia se excluyeron celdas con una elevación ± 50 m respecto a la elevación mínima y máxima dentro de cada ciudad. Esto permitió evitar sesgos provocados por áreas particularmente elevadas dentro del área externa que representan microclimas no comparables con la zona urbana en términos de temperatura (Chakraborty & Lee, 2019). Además del filtro de elevación, al calcular la temperatura promedio del área externa se emplearon solo celdas cubiertas por vegetación, excluyendo las clases urbano, agua y sin vegetación. Esto permitió contar con un área de referencia apropiada para ser comparada con los polígonos urbanos y evaluar sus diferencias.

Las ICUS diurna y nocturna de cada año fueron calculadas como la diferencia entre la TST promedio dentro de cada ciudad y la TST promedio dentro del buffer externo de 10 km. Con el objetivo de analizar el comportamiento temporal de la TST diurna y nocturna en las ciudades y su periferia, así como de sus respectivas ICUS, se ajustaron regresiones lineales, utilizando la TST promedio anual como variable dependiente, y el tiempo (años) como variable predictiva. Para evaluar si los valores de temperatura incrementan o disminuyen significativamente durante el periodo de estudio, se utilizó la prueba estadística no paramétrica de Mann-Kendall (Gibbons y Chakraborti, 2003; Kendall, 1975). Adicionalmente, se calculó la pendiente de Sen para cuantificar la tasa de

cambio lineal. La pendiente de Sen se calcula como la mediana de todas las pendientes entre pares de observaciones de una serie de tiempo (Sen, 1968).

Con la finalidad de analizar a detalle el estado actual de la TST diurna y nocturna, se calcularon estadísticas descriptivas con base en los valores del año 2020 para cada ciudad. Posteriormente, se estimaron las ICUS a nivel de celda, para poder conocer la heterogeneidad y distribución espacial de la intensidad de las ICUS actuales. Además, se calcularon curvas de densidad de ICUS para evaluar la distribución estadística de los valores que presenta cada ciudad. Se evaluó la distribución de valores diurnos y nocturnos de TST del año 2020, así como la proporción del área de la referencia externa (buffer) cubierta por cada tipo de cubierta y uso del suelo. Para esto se emplearon todas las clases de cubierta presentes en el buffer, excluyendo zonas con gran elevación de acuerdo con el filtro altitudinal aplicado para calcular las ICUS.

Finalmente, se analizó la TST en diferentes tipos de cubierta y usos del suelo de cada ciudad. Para ello, se seleccionaron únicamente celdas con un alto nivel de homogeneidad espacial (celdas puras), en las cuales más de 80 % de su área está compuesta por una sola categoría de cubierta o uso del suelo. A estas celdas se les asignó la categoría de la clase dominante. Para este análisis, no se aplicó el filtro de elevación para conservar la representatividad de cada categoría que permitiera observar la variabilidad de las temperaturas ya que, aplicando el filtro, ciertas categorías son representadas por un número muy limitado de celdas. Para evaluar el comportamiento temporal de la TST se emplearon regresiones lineales, la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen (Sen, 1968).

3 RESULTADOS

3.1 Dinámica espaciotemporal de la TST a nivel ciudad, buffer e ICUS

Los mapas de TST promedio anual muestran la variación de los valores de temperatura a través del periodo 2003-2020 durante el día y la noche

en Celaya (Figura 2) y León (Figura 3). En ambas ciudades los patrones espaciales y temporales son similares. En cuanto a los valores diurnos, no hay una clara diferenciación entre la huella térmica de la ciudad y su exterior durante el periodo de análisis, ya que se encuentran valores altos e incluso máximos en distintas zonas del buffer externo. Esto se presenta particularmente durante los años 2011, 2012 y 2020 para ambas ciudades, correspondiendo a zonas ubicadas en el norte de Celaya (Figura 2) y el sur de León (Figura 3). Estas áreas corresponden a sitios cubiertos mayormente por agricultura en ambas ciudades. Por el contrario, las áreas con menor TST durante el día se distribuyen en las zonas de mayor altitud de ambos buffers, cubiertas por selva secundaria al sur de Celaya y correspondiendo a bosque templado primario y secundario al norte de León. Como se puede observar, existen variaciones anuales en la TST diurna de Celaya, mientras que en León el comportamiento térmico en general fue más lineal durante todo el periodo de estudio.

La distribución espacial de los valores de TST nocturna muestra una diferenciación clara entre el polígono urbano y el área exterior, con los valores máximos ubicados en el núcleo urbano de ambas ciudades (Figuras 2 y 3). Además, el grupo de valores que corresponden al continuo urbano muestra claramente la densificación y expansión física de la infraestructura urbana a través del periodo de estudio. Se presentan temperaturas particularmente elevadas dentro del área del buffer externo de las ciudades durante los años 2011, 2015, 2019 y 2020, correspondiendo principalmente a zonas cubiertas por agricultura. Al igual que las temperaturas diurnas, las TST nocturnas más bajas se distribuyen en las zonas más elevadas del buffer de ambas ciudades (Figuras 2 y 3).

En ambas ciudades se presentan tendencias de aumento de la TST tanto en el área urbana como en el buffer, con magnitudes distintas entre el día y la noche (Figuras 4 y 5). De acuerdo a las regresiones lineales aplicadas, en Celaya las temperaturas están aumentando a un ritmo muy similar en la ciudad y en el buffer, siendo la ciudad la que presenta una pendiente positiva cercana a la significancia estadística ($p = 0.05$) y ligeramente más pronunciada durante el día (0.09°C ; Figura 4). Por el contrario, la ICUS diurna presenta una pendiente negativa no significativa ($p = 0.76$) de -0.01°C . Las tendencias de temperatura nocturna son estadísticamente

significativas ($p = 0.00$) y muestran pendientes más pronunciadas que las diurnas, con la TST urbana experimentando la pendiente más elevada (0.11°C).

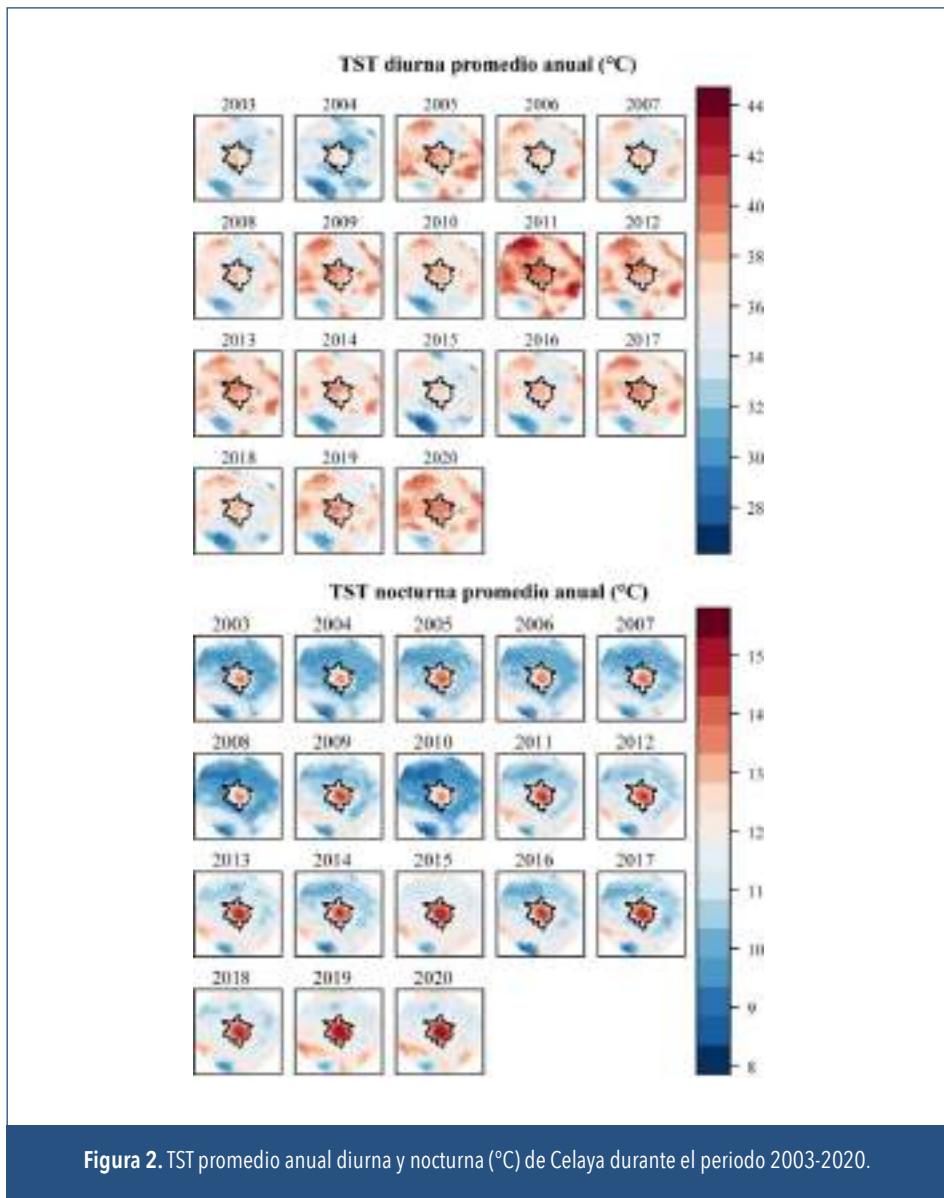


Figura 2. TST promedio anual diurna y nocturna (°C) de Celaya durante el periodo 2003-2020.

En León, las TST diurnas de la ciudad y el buffer presentan una pendiente positiva muy ligera (0.02°C) y no significativa (0.94 y 0.88; Figura 5). Sin embargo, la tendencia de la ICUS diurna de la ciudad es negativa,

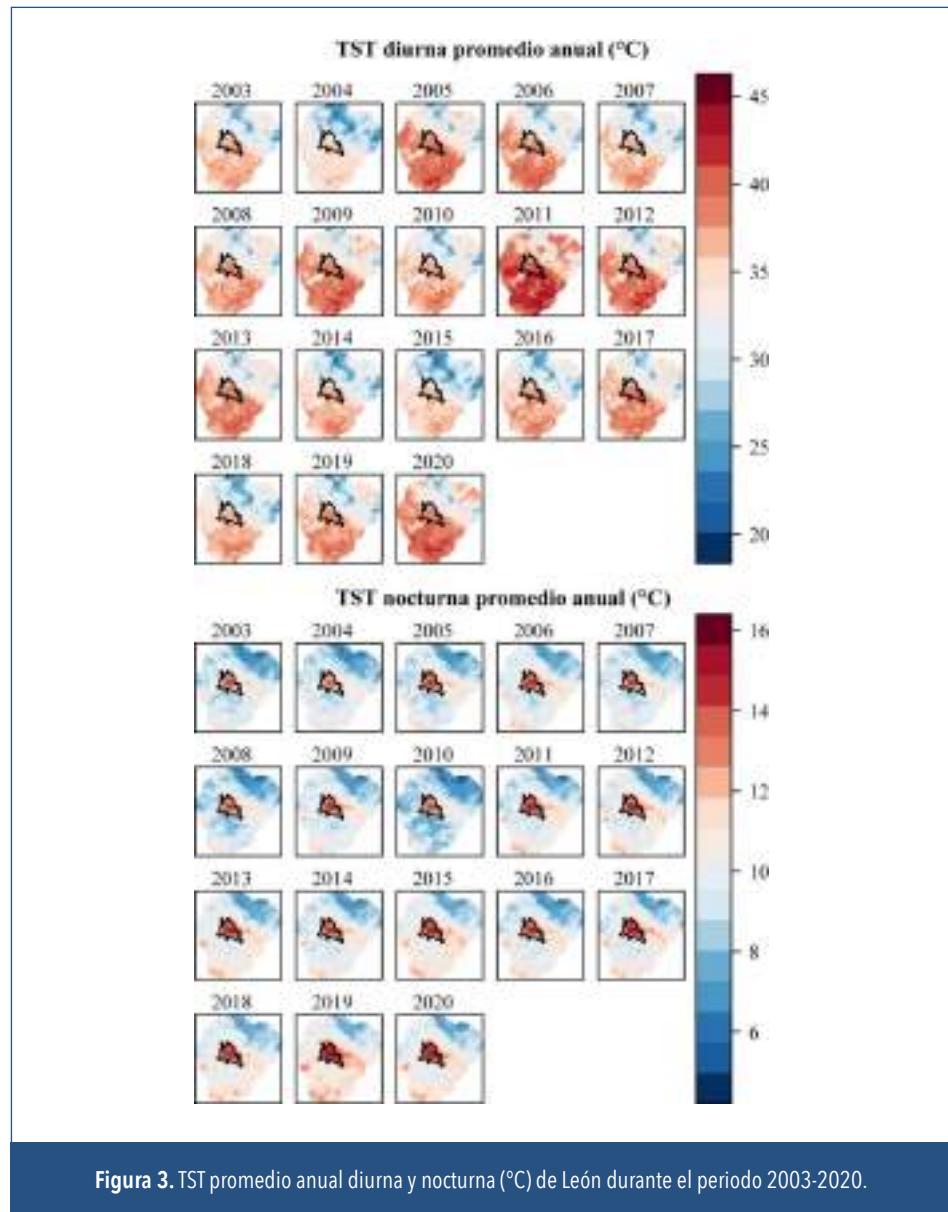


Figura 3. TST promedio anual diurna y nocturna ($^{\circ}\text{C}$) de León durante el periodo 2003-2020.

lo que implica que las temperaturas aumentan más en la periferia que en el interior de la ciudad. Las tendencias de temperaturas nocturnas muestran pendientes positivas mayores al día, siendo estadísticamente significativas ($p = 0.00$) las pendientes de cambio de TST tanto de la ciudad (0.11°C) como del buffer (0.08°C). A diferencia de los datos diurnos, la tendencia de la ICUS nocturna es positiva, aunque no significativa ($p = 0.26$), con una pendiente anual de 0.03°C .

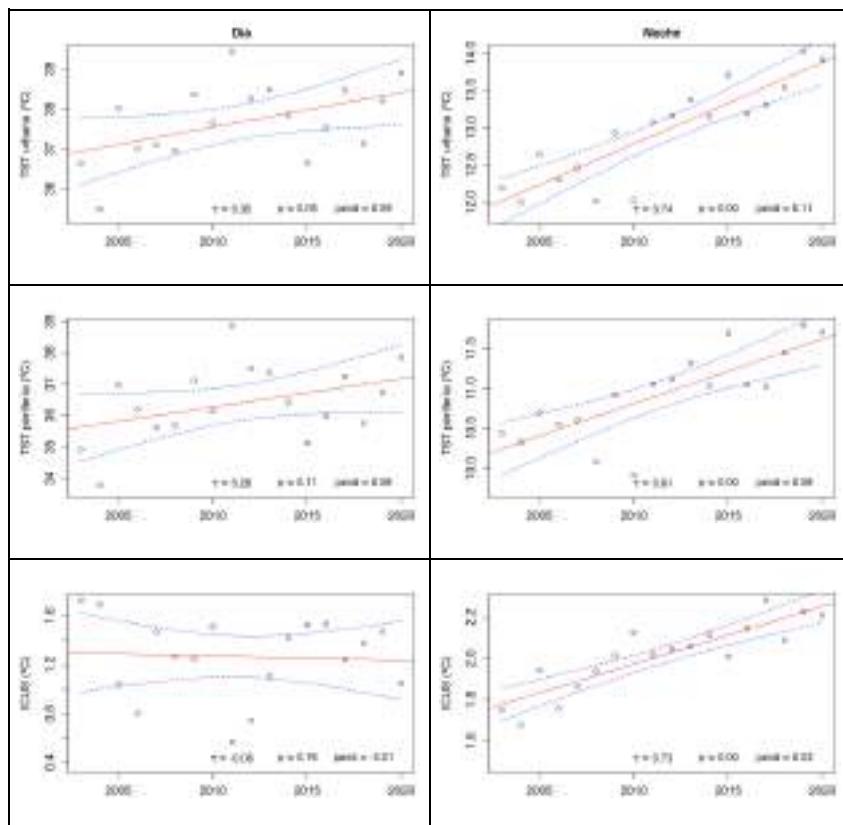


Figura 4. Tendencias de TST y ICUS anuales diurnas y nocturnas ($^{\circ}\text{C}$) para Celaya.

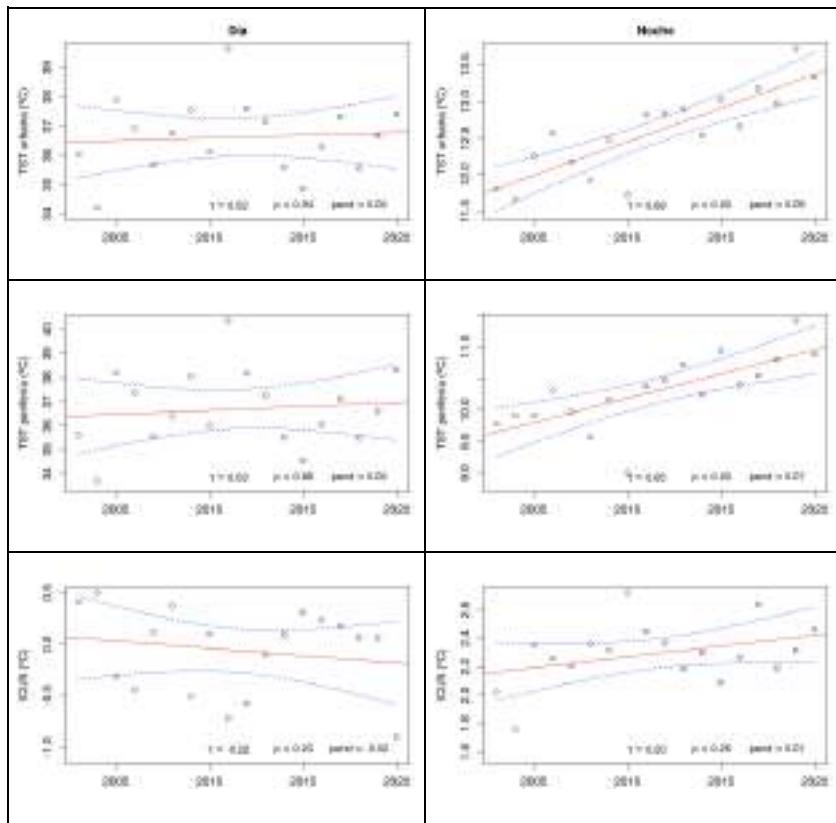


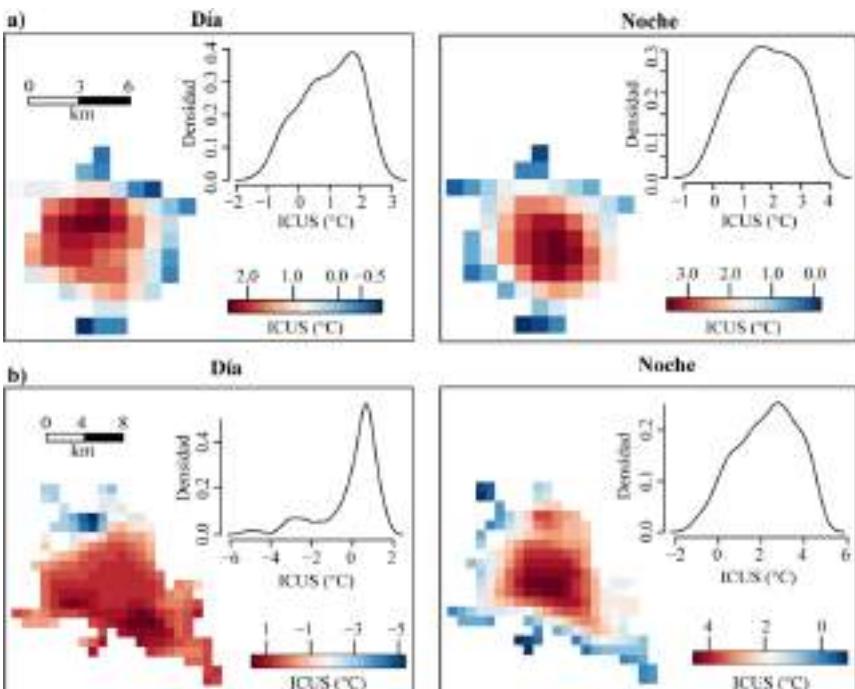
Figura 5. Tendencias de TST y ICUS anuales diurnas y nocturnas ($^{\circ}\text{C}$) para León.

3.2 Estado actual de la TST y la ICUS

La ciudad de Celaya presenta valores de TST mínimo ($37.28\text{ }^{\circ}\text{C}$), máximo ($40.00\text{ }^{\circ}\text{C}$) y promedio ($38.74\text{ }^{\circ}\text{C}$) más altos que León durante el día, pero con una menor desviación estándar ($0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$; Tabla 1). En cambio, durante la noche, León muestra un máximo mayor ($39.18\text{ }^{\circ}\text{C}$), con un mínimo ($10.17\text{ }^{\circ}\text{C}$), promedio ($13.30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y desviación estándar ($1.28\text{ }^{\circ}\text{C}$) menores

TABLA 1. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS DE TST 2020 (°C) PARA CELAYA Y LEÓN

Ciudad	Medición	Mín.	Máx.	Promedio	Desv. st.
Celaya	Día	37.28	40.00	38.74	0.74
	Noche	11.70	15.31	13.70	1.00
León	Día	32.56	39.18	37.49	1.34
	Noche	10.17	15.34	13.30	1.28

**Figura 6.** Mapas y distribución estadística de valores de ICUS (°C) de Celaya **a)** y León **b)** para el año 2020.

que Celaya. Las ICUS del año 2020 de Celaya y León muestran una gran heterogeneidad espacial dentro de los polígonos urbanos (Figura 6). Ambas ciudades presentan valores tanto positivos como negativos durante el día y la noche, con los valores positivos más elevados durante la noche y los negativos más bajos durante el día. La mayor parte del área urbana de Celaya presenta valores de ICUS diurna cercanos a 2 °C. Durante la noche, la ICUS dominante es cercana a 1 °C (Figura 6a). La ICUS diurna de León muestra una gran dominancia de valores cercanos a 0.5 °C en la ciudad (Figura 6b). Durante la noche, la ICUS es más intensa, con la mayor proporción del polígono urbano cubierta por valores cercanos a 3 °C.

3.3 TST por categoría de cubierta y uso del suelo

Las Figuras 7 y 8 representan la distribución espacial de las principales categorías de cubierta y uso del suelo y de las TST diurnas y nocturnas (2020) en Celaya y León (ver también Tabla 2).

La distribución de valores de TST en las distintas cubiertas y usos de suelo presentes en los buffers externos de ambas ciudades muestran una clara diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas del año 2020

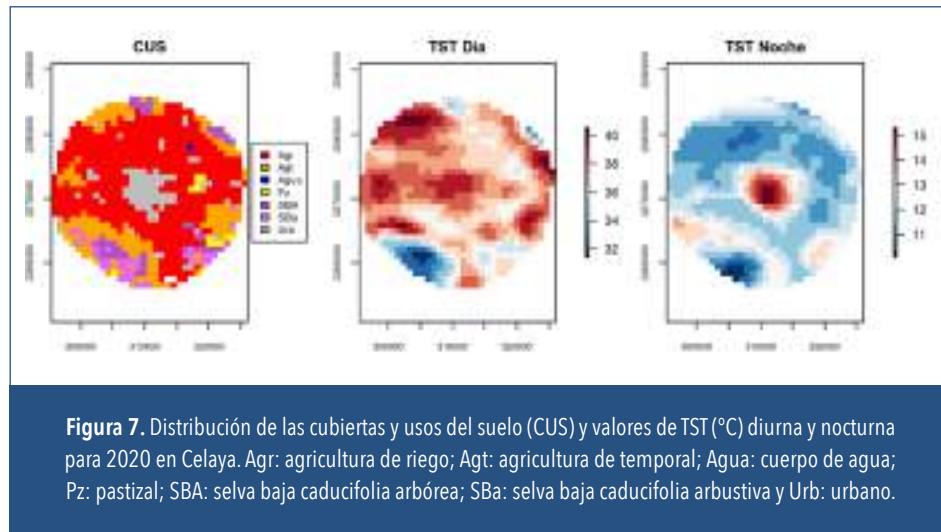


Figura 7. Distribución de las cubiertas y usos del suelo (CUS) y valores de TST (°C) diurna y nocturna para 2020 en Celaya. Agr: agricultura de riego; Agt: agricultura de temporal; Agua: cuerpo de agua; Pz: pastizal; SBA: selva baja caducifolia arbórea; SBa: selva baja caducifolia arbustiva y Urb: urbano.

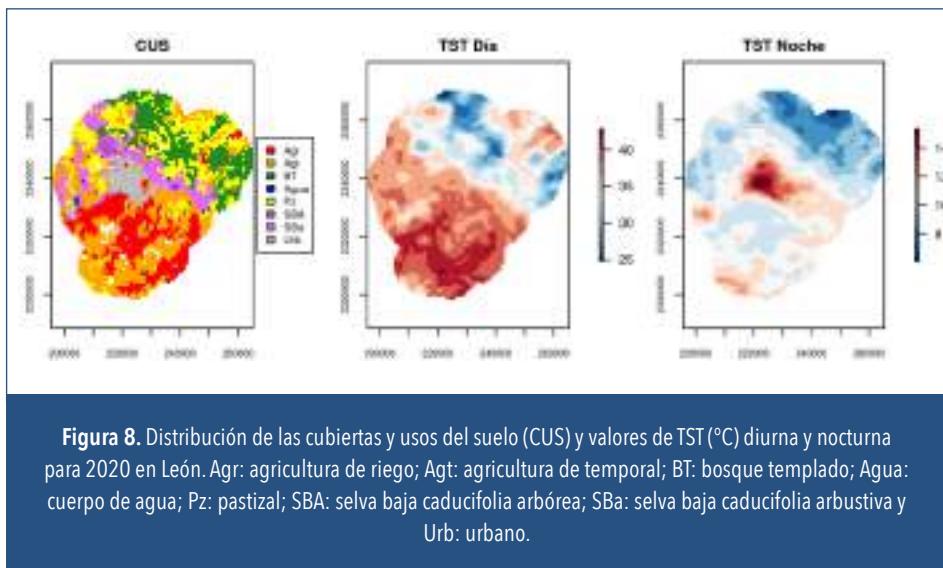


TABLA 2. PROPORCIÓN DEL ÁREA CUBIERTA POR LOS PRINCIPALES TIPOS DE CUBIERTA/USO DEL SUELO

Ciudad	Cubierta							
	Agr	Agt	Agua	BT	Pz	SBA	SBa	Urb
Celaya	0.58	0.19	–	–	0.02	0.06	0.06	0.10
León	0.19	0.29	0.01	0.16	0.18	0.08	0.01	0.07

(Figuras 7 y 8). Se seleccionaron 488 y 1,375 celdas de composición homogénea para Celaya y León respectivamente, lo cual representa 60 % y 40 % del total de las celdas de cada ciudad. La Figura 9 muestra las temperaturas medias anuales de diferentes tipos de cubiertas y uso del suelo basadas en estas celdas más homogéneas. Se puede observar durante el día que las cubiertas agrícolas, principalmente de agricultura de temporal, superan las temperaturas de las áreas urbanas sobre pasando en algunos casos los 40 °C.

Durante el día, la TST promedio más alta en el buffer de Celaya está presente en la clase de agricultura de temporal seguida por la superficie urbana, el pastizal y la agricultura de riego (Figura 9). El valor de TST más bajo se encuentra en la selva secundaria arbórea. Durante la noche, las diferencias de temperatura son mayores entre las distintas cubiertas y usos del suelo. Las mayores TST se encuentran distribuidas en polígonos urbanos, mientras que las menores están presentes en la agricultura de riego. En León y su periferia, la temperatura diurna más alta se distribuye en las agriculturas tanto de riego como de temporal, seguidas por la cubierta urbana y los cuerpos de agua (Figura 8). Los valores de TST más bajos se presentan en el bosque templado y en la selva secundaria arbórea. El patrón de distribución de valores de TST nocturna es contrastante respecto del día. Los valores promedio más altos están presentes en los polígonos urbanos,

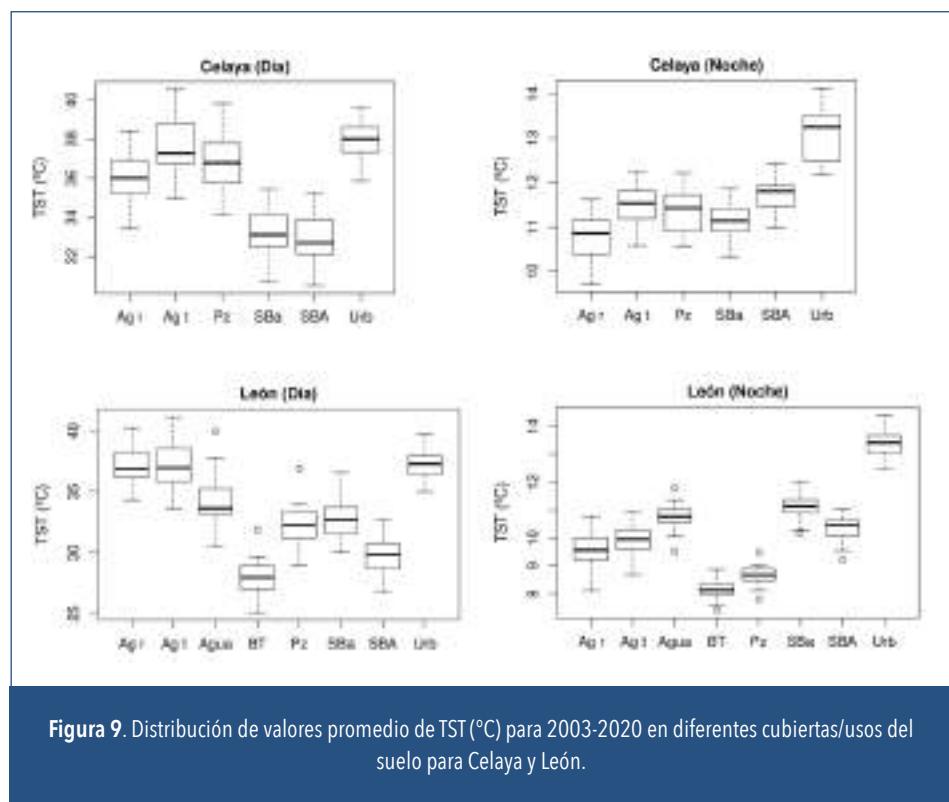


Figura 9. Distribución de valores promedio de TST (°C) para 2003-2020 en diferentes cubiertas/usos del suelo para Celaya y León.

seguidos de la selva secundaria arbustiva, los cuerpos de agua y la selva secundaria arbórea. Los valores de TST promedio más bajos se encuentran en el bosque templado primario y los pastizales. La composición de cubiertas y usos del uso en las dos áreas de estudio muestra un claro dominio de áreas de agricultura (Celaya, 76 %; León, 48 %). En Celaya, la agricultura de riego cubre 58 % del área y la de temporal 19 %. La tercera cubierta con mayor presencia es la urbana (10 %) y la que cubre menor proporción es el pastizal (2 %). Por el contrario, en León la cubierta más extendida es la agricultura de temporal (29 %), seguida por la agricultura de riego (19 %), el pastizal (18 %) y el bosque templado primario (16 %; Tabla 2).

En el caso de Celaya todas las cubiertas se extienden sobre elevaciones similares. En cambio, en León y su periferia las importantes diferencias de TST diurnas entre los bosques templados (BT) y pastizales (Pz) en comparación con los usos agrícolas y urbanos se debe en parte a que los primeros presentan una altitud entre 400 a 750 m.s.n.m. mayor con respecto a las zonas agrícolas (Figura 9). En la ciudad de Celaya, los dos diferentes tipos de selva baja presentan una altitud 200 a 300 m.s.n.m. mayor respecto a las áreas agrícolas y urbanas (Tabla 3).

**TABLA 3. ALTITUD PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR
DE LOS DIFERENTES USOS Y CUBIERTAS DEL SUELO
PARA LAS DOS CIUDADES Y SUS PERIFERIAS**

Categoría	León m.s.n.m.	Celaya m.s.n.m.
Ag r	1,774	1,759
Ag t	1,930	1,806
BT	2,522	-
Agua	1,812	-
Pz	2,322	1,799
SBA	2,143	1,975
SBa	2,060	2,053
Urb	1,817	1,759

Tanto en Celaya como en León se presentan tendencias de aumento de la TST tanto en el área urbana como en la periferia, con distintas magnitudes entre el día y la noche (Tablas 4 y 5). En Celaya, las temperaturas nocturnas de todas las cubiertas presentan un aumento significativo ($p < 0.05$). La temperatura nocturna de la agricultura de riego y de los pastizales está aumentando a un ritmo muy similar al del área urbana, que presentó un aumento de un grado Celsius por década (Figuras 10 y 11). Las temperaturas diurnas muestran un aumento significativo para las áreas urbanas y de agricultura de riego, con un incremento de cerca de 0.1°C por año (Tabla 4).

TABLA 4. ÍNDICES DE TENDENCIA TEMPORAL DE LA TST
EN CELAYA Y SUS CUBIERTAS PERIFÉRICAS

Categoría	Día			Noche		
	Tau	p	pendiente	Tau	p	pendiente
Ag r	0.31	0.08	0.10	0.65	0.00	0.08
Ag t	0.05	0.82	0.02	0.54	0.00	0.06
Pz	0.06	0.76	0.03	0.61	0.00	0.08
SBA	-0.01	1.00	-0.01	0.54	0.00	0.05
SBa	-0.02	0.94	-0.01	0.53	0.00	0.06
Urb	0.35	0.05	0.09	0.74	0.00	0.10

En León, las TST nocturnas presentan un aumento significativo para todas las cubiertas excepto la selva baja arbórea (SBA). Las áreas urbanas y agrícolas son las cubiertas que presentan las mayores tasas de aumento (Figuras 12 y 13). Las TST diurnas no presentan tendencias estadísticamente significativas, aunque la pendiente indica un aumento para las cubiertas urbanas y agrícolas (Tabla 5).

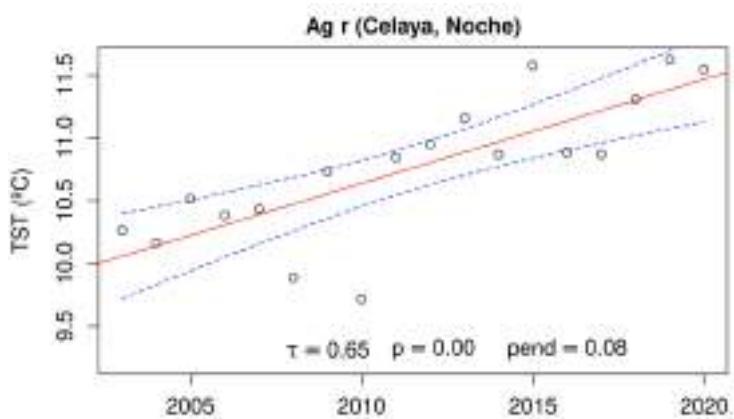


Figura 10. Evolución temporal de los valores promedio de TST ($^{\circ}\text{C}$) nocturna en áreas de agricultura de riego durante 2003-2020 en Celaya.

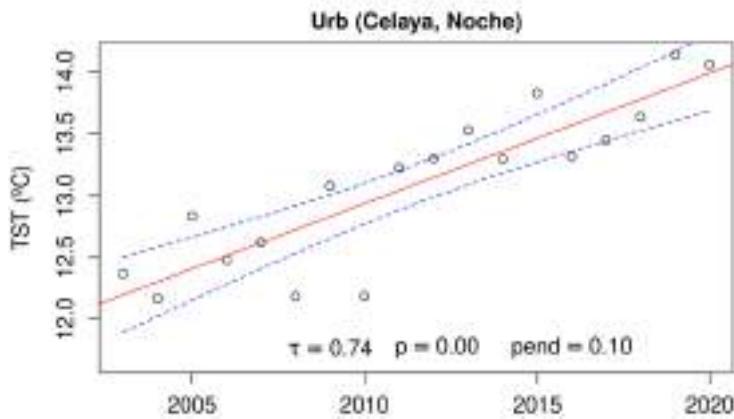


Figura 11. Evolución temporal de los valores promedio de TST ($^{\circ}\text{C}$) nocturna en áreas urbanas durante 2003-2020 en Celaya.

**TABLA 5. COEFICIENTES DE LAS TENDENCIAS DE LA TST
EN LEÓN Y SUS CUBIERTAS PERIFÉRICAS**

Categoría	Día			Noche		
	Tau	p	pendiente	Tau	p	pendiente
Ag r	0.12	0.50	0.04	0.63	0.00	0.08
Ag t	0.07	0.70	0.03	0.61	0.00	0.07
BT	0.05	0.82	0.01	0.46	0.01	0.04
Aqua	-0.06	0.76	-0.01	0.44	0.01	0.05
Pz	0.06	0.76	0.02	0.48	0.01	0.04
SBA	-0.02	0.94	-0.01	0.32	0.07	0.04
SBa	-0.02	0.94	-0.01	0.44	0.01	0.05
Urb	0.05	0.82	0.01	0.61	0.00	0.08

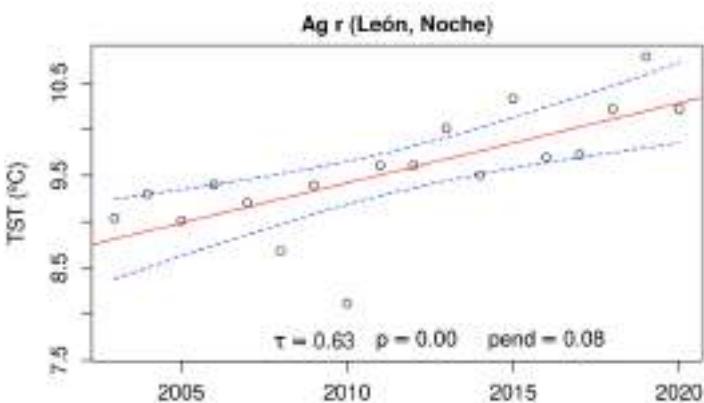


Figura 12. Evolución temporal de los valores promedio de TST (°C) nocturna en áreas de agricultura de riego durante 2003-2020 en León.

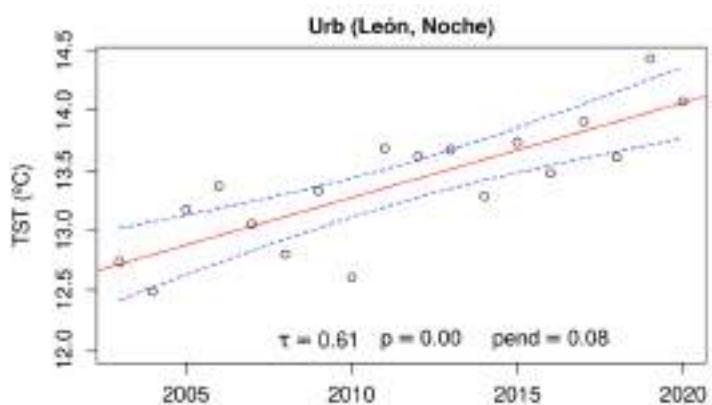


Figura 13. Evolución temporal de los valores promedio de TST ($^{\circ}\text{C}$) nocturna en áreas urbanas durante 2003-2020 en León.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron las tendencias de la TST de las ciudades y periferias urbanas de Celaya y León, México, durante el periodo 2003-2020, empleando tres enfoques distintos. Primero se analizó la TST dentro de las ciudades y en sus periferias por separado para comparar sus tendencias particulares. Posteriormente, se evaluaron las TST de las ciudades y sus respectivas periferias a nivel general y para cada pixel MODIS dentro de los polígonos urbanos, mediante el uso del indicador de ICUS. Esto permitió comparar las TST de ambas zonas en conjunto. Finalmente, se analizó la TST en cada tipo de cubierta y uso del suelo, con el fin de detectar las clases que presentan los valores de temperatura más altos, tanto dentro como fuera de la ciudad.

Al igual que otras zonas urbanas alrededor del mundo, las ciudades de Celaya y León exhiben tendencias de aumento en su TST, con mayores pendientes para los datos nocturnos (Chakraborty & Lee, 2019; Henríquez y Romero, 2019; Lemoine-Rodríguez et al., 2022b; Montaner-Fernández

et al., 2020; Peng et al., 2012). Esto se puede deber a la mayor capacidad de retención térmica de los elementos de la superficie urbana y el flujo de calor antropogénico (Peng et al., 2014; Yang et al., 2021). Los resultados de este trabajo muestran que el aumento de TST en las periferias urbanas de las ciudades analizadas es muy similar y en algunos años se presentó mayor temperatura en las áreas agrícolas tanto de temporal como de riego. Aunque la mayoría de los trabajos de investigación enfocados en analizar el clima urbano se centran en evaluar el indicador de ICUS, en este trabajo se hizo un mayor énfasis en analizar la temperatura de cada zona por separado (esto es, ciudad y periferia). Se incluyó el indicador de ICUS porque nuestro objetivo principal fue identificar diferencias entre ambas zonas por separado (es decir, las TST de las ciudades y sus periferias de forma independiente), así como en conjunto (ICUS). Sin embargo, es importante tener claras las limitaciones del uso del indicador de ICUS. Primero, los valores de ICUS como métrica dependen de la estructura y composición espacial de la zona de referencia externa, así como de sus correspondientes cambios estructurales, lo que influye en su temperatura a través del tiempo (Imhoff et al., 2010; Lemoine-Rodríguez et al., 2022b; Martilli et al., 2020; Stewart, 2011). Con la inclusión del análisis de las temperaturas de la periferia urbana, en este trabajo mostramos empíricamente que la TST en esta zona está en aumento, incluso al mismo ritmo que en el interior de las ciudades. Esto evidencia que la suposición de que la periferia urbana es un área de referencia del clima local no modificada puede ser errónea (Lemoine-Rodríguez et al., 2022b). El sesgo presente en el uso de este indicador es claro en las tendencias diurnas de las ICUS de Celaya y León. Para ambas ciudades, la pendiente de la ICUS es negativa durante el periodo de estudio, a pesar de que las temperaturas urbanas están aumentando. Los mapas de ICUS por pixel demuestran que ambas ciudades presentan celdas con valores tanto positivos como negativos. Esto es de esperarse, ya que la heterogeneidad espacial es inherente a las zonas urbanas. Aunque la mayoría de los pixeles de ambas ciudades presentan valores positivos de ICUS, esta información no permite saber si las TST en dichas celdas son particularmente altas o simplemente el valor de la referencia externa es bajo. Los indicadores de ICU (basado en temperatura del aire) e ICUS pueden fomentar conclusiones equivocadas respecto a la necesidad o no de

implementar medidas de mitigación de temperaturas altas en las zonas urbanas. Un claro ejemplo de esto es que los valores de temperatura pueden superar el umbral del confort térmico humano, y aun así la ciudad puede presentar una ICU o ICUS baja o incluso negativa (Martilli et al., 2020).

El análisis de la TST en las distintas cubiertas y usos de suelo de las periferias de Celaya y León muestra que los valores de temperatura diurna en polígonos de agricultura son similares e incluso mayores a los de los polígonos urbanos. Esto es sumamente relevante al tomar en cuenta que dicha clase cubre la mayor proporción de ambas periferias urbanas y la relevancia económica y social que tiene la producción agrícola en estas zonas (Sheridan & Bickford, 2011; Schidhuber & Tubiello, 2017).

La falta de monitoreo, y, por lo tanto, de posible intervención para mitigar el aumento de temperaturas en las periferias urbanas representa un importante vacío en el conocimiento sobre el clima local (Lemoine-Rodríguez et al., 2022b). Las implicaciones para la vulnerabilidad a las altas temperaturas por parte de los habitantes de la periferia urbana y el impacto sobre la seguridad alimentaria de la disminución de la producción agrícola debido al potencial aumento de temperaturas hacen que conocer las dinámicas climáticas de las periferias sea tan importante como conocer las de las ciudades mismas (IPCC, 2014; Schidhuber y Tubiello, 2017). Es posible que las ciudades totalmente rodeadas por agricultura extensiva mantengan una tendencia a un mayor incremento de las TST. En León, las TST nocturnas presentan un aumento significativo para todas las cubiertas, excepto para la selva baja arbórea. El aumento de temperaturas alrededor de un área urbana puede expandir la isla de calor e incrementar su efecto negativo (Ma et al., 2022). En futuras investigaciones, sería importante tomar en cuenta las características particulares de las actividades agrícolas, como el tipo de cultivo, su temporalidad y el manejo del riego, que pueden modificar las temperaturas locales (Chen et al., 2022).

Hay limitaciones que es importante tomar en cuenta al interpretar los resultados de este trabajo. La resolución y escala de los insumos empleados permitió detectar diferencias entre la TST del área urbana y su periferia, e incluso la heterogeneidad de la TST y ICUS del interior de las ciudades analizadas. Sin embargo, la información de cubierta y uso de suelo a escala 1:250,000 y los datos de TST a 1 km de resolución limitan los

patrones espaciales que este enfoque permite detectar (Bechtel et al., 2019; Lemoine-Rodríguez et al., 2022b). No obstante, se utilizaron solo celdas de alta homogeneidad en cuanto a su composición, para analizar a detalle la TST entre las diferentes cubiertas y usos del suelo y obtener resultados consistentes a la escala empleada (Bechtel et al., 2019). Futuros estudios pueden utilizar datos de temperatura de mayor resolución (por ejemplo, Landsat) para representar la relación entre la cubierta del suelo y la TST a mayor detalle (Das Majumdar y Biswas, 2016; Lemoine-Rodríguez et al., 2022a; Zhou et al., 2011).

Al agregar la TST en promedios anuales para cada pixel fue posible detectar tendencias monotónicas durante el periodo 2003-2020. Mientras que este enfoque es apropiado para alcanzar el objetivo de este trabajo, no toma en cuenta la variabilidad estacional de la TST (Lemoine-Rodríguez et al., 2022b; Peng et al., 2012). En futuros estudios sería relevante incluir análisis estacionales para determinar la relación entre la TST y los distintos estados de la vegetación; por ejemplo, las épocas de mayor y menor verdor (podría ser mediante índices de vegetación radiométricos) o las etapas de descanso de cultivos de temporal (Bechtel et al., 2019). Adicionalmente, otras variables climáticas pueden ser incluidas en el análisis para describir de una forma más detallada las relaciones entre la forma urbana, la periurbana y el clima local. Para analizar las temperaturas periurbanas (por ejemplo, en zonas cubiertas por cultivos) sería importante incluir datos de humedad y precipitación tanto a nivel local como regional y global, para identificar la influencia de factores multiescalares como sequias y el aumento global de temperaturas en la TST local. Finalmente, si se pretende informar apropiadamente con fines de planeación urbana, la TST debe ser complementada con datos de temperatura del aire, ya que esta se encuentra distribuida en la capa del clima local que experimenta la población (Martilli et al., 2020).

REFERENCIAS

- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology, 23*(1), 1-26.
- Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C. & Voogt, J. (2019). SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. *Urban Climate, 28*.
- Busetto, L. & Ranghetti, L. (2016). MODIS_{tp}: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences, 97*, 40-48.
- Chakraborty, T. & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 74*, 269-280.
- Chen, X., Gu, X., Liu, P., Wang, D., Mumtaz, F., Shi, S., Liu, Q. & Zhan, Y. (2022). Impacts of inter-annual cropland changes on land surface temperature based on multi-temporal thermal infrared images. *Infrared Physics & Technology, 122*.
- Coll-Hurtado, A. & Godínez, M. L. (2003). *La agricultura en México: un atlas en blanco y negro*. Instituto de Geografía-UNAM.
- Das Majumdar, D. & Biswas, A. (2016). Quantifying land surface temperature change from LISA clusters: An alternative approach to identifying urban land use transformation. *Landscape and Urban Planning, 153*, 51-65.
- Demuzere, M., Kittner, J. & Bechtel, B. (2021). LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science, 9*.
- ESA (2012). *Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*. Agencia Espacial Europea.
- Gibbons, J. D. & Chakraborti, S. (2003). *Nonparametric Statistical Inference*. CRC Press.
- Henríquez, C. & Romero, H. (eds.) (2019). *Urban Climates in Latin America*. Springer.
- Hijmans, R. J. (2021). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*, R package version 3.4-13.
- Huang, K., Li, X., Liu, X. & Seto, K. C. (2019). Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters, 14*(11).
- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E. & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the

- urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing Environment*, 114(3), 504-513.
- INEGI (2000). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Inostroza, L., Baur, R. & Csaplovics, E. (2013). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns. *Journal of Environmental Management*, 115, 87-97.
- Inostroza, L., Palme, M. & De La Barrera, F. (2016). A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile. *PLoS ONE* 11(9).
- IPCC (2014). *Cambio Climático 2014. Informe de Síntesis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4^a edición). Charles Griffin.
- Lemoine-Rodríguez, R. & Mas, J.-F. (2020). *LSTtools: An R package to process thermal data derived from Landsat and MODIS images*.
- Lemoine-Rodríguez, R., MacGregor-Fors, I. & Muñoz-Robles, C. (2019). Six decades of urban green change in a neotropical city: a case study of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Urban Ecosystems*, 22, 609-618.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. & Zepp, H. (2020). The global homogenization of urban form. An assessment of 194 cities across time. *Landscape and Urban Planning*, 204.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I. & MacGregor-Fors, I. (2022a). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. & Zepp, H. (2022b). Intraurban heterogeneity of space-time land surface temperature trends in six climate-diverse cities. *Science of The Total Environment*, 804.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. & Zepp, H. (2022c). Does urban climate follow urban form? Analysing intraurban LST trajectories versus urban form trends in 3 cities with different background climates. *Science of The Total Environment*, 830.

- Ma, H-Y., Li, H. J., Zhang, M. & Dong, X. (2022). Impact of cropland degradation in the rural-urban fringe on urban heat island and heat stress during summer heat waves in the Yangtze River Delta. *Advances in Climate Change Research* 13(2), 240-250.
- Martilli, A., Krayenhoff, E. S. & Nazarian, N. (2020). Is the Urban Heat Island intensity relevant for heat mitigation studies? *Urban Climate*, 31.
- Martínez-Arredondo, J. C., Jofre Meléndez, R., Ortega Chávez, V. M. & Ramos Arroyo, Y. R. (2015). Descripción de la variabilidad climática normal (1951-2010) en la cuenca del río Guanajuato, centro de México. *Acta Universitaria*, 25(6).
- Montaner-Fernández, D., Morales-Salinas, L., Rodriguez, J. S., Cárdenas-Jirón, L., Huete, A., Fuentes-Jaque, G., Pérez-Martínez, W. & Cabezas, J. (2020). Spatio-temporal variation of the urban heat island in Santiago, Chile during summers 2005–2017. *Remote sensing*, 12(20), 1-19.
- Morales, J. & Saavedra Silva E. E. (2016). Patrones territoriales de industrialización 1980-2015. En O. Moncada Maya y Á. López López (eds.), *Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea. Tomo II*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Mostovoy, G. V., King, R. L., Reddy, K. R., Kakani, V. G. & Filippova, M. G. (2006). Statistical Estimation of Daily Maximum and Minimum Air Temperatures from MODIS LST Data over the State of Mississippi. *GIScience & Remote Sensing*, 43, 78-110.
- Nichol, J. E., Fung, W. Y., Lam, K.-S. & Wong, M. S. (2009). Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and ‘in situ’ air temperature. *Atmospheric Research*, 94(2), 276-284.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University press.
- Palme, M. (2021). *Urban Heat Island Studies in Hot and Humid Climates: A Review of the State of Art in Latin-America*. En N. Enteria, M. Santamouris & U. Eicker (eds.), *Urban Heat Island (UHI) Mitigation*. Springer, pp. 123-141.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F. M., Nan, H., Zhou, L. & Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 696-703.
- Peng, S.-S., Piao, S., Zeng, Z., Ciais, P., Zhou, L., Li, L. Z. X., Myneni, R. B., Yin, Y. & Zeng, H. (2014). Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(8), 2915-2919.

- Pohlert, T. (2020). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection, R package version 1.1.4.
- R Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*.
- Schidhuber, J. & Tubiello, F. N. (2017). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50), 19703-19708.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Sheridan, J. A & Bickford, D. (2011). Shrinking body size as an ecological response to climate change. *Nature Climate Change*, 1, 401-406.
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200-217.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Torres Guerrero, C. A., Gutiérrez Castorena, M. C., Ortiz Solorio, C. A. & Gutiérrez Castorena, E. V. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 457-466.
- USGS (2020). *Landsat 8 product*, EarthExplorer. U.S. Geological Survey.
- Voogt, J. A. & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384.
- Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36-45.
- Yang, Q., Huang, X., Yang, J. & Liu, Y. (2021). The relationship between land surface temperature and artificial impervious surface fraction in 682 global cities: spatio-temporal variations and drivers. *Environmental Research Letters*, 16(2).
- Zhou, W., Huang, G. & Cadena, M. L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54-63.

Evolución de las islas de calor urbano superficial en ciudades del corredor industrial de El Bajío, México, para los últimos 20 años

Sandra Lizbeth Medina Fernández¹, Juan Manuel Núñez Hernández²,
Itzia Gabriela Barrera Alarcón³

¹Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C. (CentroGeo-CONAHCYT).ORCID: 0000-0002-8539-8008. smedina@centrogeo.edu.mx

²Centro Transdisciplinario Universitario para la Sustentabilidad (Centrus) de la Universidad Iberoamericana, Ciudad de México; ORCID: 0000-0002-9835-0599. juan.nunez@ibero.mx

³Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, A. C. (CentroGeo-CONAHCYT). ORCID: 0000-0002-5561-7177. ibarrera@centrogeo.edu.mx

RESUMEN

Diversos casos de estudio muestran que, por lo general, el efecto del incremento de temperatura es directamente proporcional al crecimiento urbano (Imhoff at al., 2000; Oke, 1973; Dousset & Gourmelon, 2003). En las últimas dos décadas en la región del Bajío se ha incrementado el número de población y la mancha urbana, causando cambios en la temperatura de la superficie terrestre (TST), lo que ha traído consigo problemas de salud para la población.

El cálculo de la TST mediante imágenes de percepción remota es un importante factor de control físico, químico y biológico en los procesos de la Tierra (Becker & Li, 1990). Por ende, en este trabajo se analiza el comportamiento de la TST y las islas de calor urbano superficial (ICUS) en tres grupos conformados por diez zonas metropolitanas y cuatro conurbadas del corredor industrial del Bajío, haciendo uso de imágenes satelitales

MODIS con información diurna y nocturna para los años 2002 al 2020 a través de herramientas gratuitas y un código abierto empleados en RStudio. En general, los resultados muestran que el incremento de la TST y las ICUS en estos dieciocho años está asociada al aumento poblacional y al cambio de cobertura terrestre. Se encontró que en el grupo I crece aceleradamente la ICUS en comparación los grupos II y III debido a su consolidación, mientras que en el grupo II, siendo ciudades metropolitanas, cuentan con características muy distintas, lo que permite que la ICUS sea menor incluso que en el grupo III de ciudades conurbadas.

Palabras clave: el Bajío, temperatura de la superficie terrestre (TST), isla de calor urbano superficial (ICUS), cobertura terrestre.

ABSTRACT

Various case studies show that, in general, the effect of the increase in temperature is directly proportional to urban growth (Imhoff et al., 2000; Oke, 1973; Dousset & Gourmelon, 2003). The Bajío region in two decades has increased the number of population and urban area, causing changes in the Terrestrial Surface Temperature (TST), bringing with it health problems for the population.

The calculation of TST using remote sensing images is an important physical, chemical and biological control factor in Earth processes (Becker & Li, 1990). Therefore, this work analyzes the behavior of the TST and the surface urban heat islands (SUHI) in three groups made up of ten Metropolitan Areas and four Conurbations of the industrial corridor of the Bajío, making use of MODIS satellite images with daytime information and nocturnal for the years 2002 to 2020 through free tools and an open source used in RStudio. In general, the results show that the increase in the TST and the SUHI in these eighteen years is associated with the population increase and the change in land cover. It was found that in group I the SUHI grows rapidly compared to groups II and III due to their consolidation, while in group II, being metropolitan cities, they have very different characteristics, which allows the SUHI to be lower even than in group III of metropolitan cities.

Keywords: Bajío, Terrestrial Surface Temperature (TST), surface urban heat islands (SUHI), Land Cover.

1 INTRODUCCIÓN

Las islas de calor urbano (ICU) se pueden conceptualizar como el aumento de temperatura en cualquier área construida por el hombre, lo que resulta en una “isla cálida” bien definida y distinta al “mar frío” representado por la temperatura más baja del paisaje natural cercano de la zona (Pérez Arrau & Peña, 2016). La principal causa de la formación de las ICU son las tasas de enfriamiento diferenciales de las superficies construidas y naturales, que son más evidentes durante la noche (Oke, 1982; Souch & Grimmond, 2006; Chakraborty & Lee, 2019).

La urbanización es el proceso a través del cual aumenta la población del área urbana, y generalmente se expresa en relación con la población total (Pieter et al., 2003). La urbanización provoca principalmente el reemplazo de áreas con vegetación por no evaporantes e impermeables como el asfalto y el hormigón, lo que cambia las características físicas de la superficie, como el albedo, la capacidad y la conductividad térmica. Como resultado de esto, las áreas urbanas son más cálidas que las áreas rurales circundantes, especialmente durante la noche (Arathyram & Venugopala Rao, 2012), como en el caso de Shangai, China, donde en once años, debido a la estrategia nacional “apertura a la Nueva Área de Pudong al mundo”, se modificó el escenario a un 219.5% de uso urbano para fines económicos, financieros e industriales (Zhang et al., 2013). Actualmente, la urbanización se considera el impulsor más importante del cambio climático (McCarthy et al, 2010), aunque el área urbana total representa solo una pequeña proporción de la superficie planetaria (Grimm et al., 2000; Grüberl, 1994). Otro factor que influye en las islas de calor es el “efecto de pared” (Nichol et al., 2009), debido a la ventilación reducida, las altas temperaturas y el factor topográfico como montañas (Charabi & Bakhit, 2011) o el bloqueo de la brisa del mar en ciudades costeras que interfieren en la canalización de los vientos predominantes que disipan el calor acumulado (Ferwati et al., 2018).

Si bien se han realizado exhaustivos trabajos de islas de calor en múltiples ciudades (Peng et al. 2012), en su mayoría los trabajos de las ICU están enfocados a ciudades muy puntuales o a microclimas; algunos de estos trabajos recolectan información *in situ* y otros se apoyan en herramientas digitales como las imágenes satelitales para inferir estos datos, por lo que pocos han ofrecido información sobre los entornos de los corredores urbanos como es el caso de Ferwati et al. (2018), en donde los resultados indicaron que las dos variables más críticas que predicen los patrones de temperatura del aire a lo largo de los corredores son la distancia a la costa y el volumen de tráfico, siendo Doha, Qatar, en la península del golfo Pérsico, una de las ciudades costeras con clima árido. Por otro lado, Zhang et al. (2013) profundizaron en los efectos de la urbanización con el objetivo de examinar la variación espacial y diurna de los efectos de ICU, la variación diurna de los vientos horizontales, las diferentes estructuras entre zonas urbanas y regiones rurales cercanas, y las interacciones entre las circulaciones de ICU y las brisas de la bahía. Estas variables fueron examinadas dentro del corredor Washington-Baltimore. Un estudio más reciente fue el realizado por Jain et al. (2021), donde se exploró el impacto en la temperatura del aire superficial debida a los cambios en el uso y cobertura del suelo producto de diferentes escenarios de urbanización en la región del corredor industrial Delhi-Mumbai en la India (DMIC), mediante estudios de sensibilidad con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF), en los años 2005 al 2014, para el mes más caluroso de mayo.

En México existen algunos estudios referentes a las islas de calor urbano superficial (ICUS) en las principales ciudades donde se ha observado su correlación con los grandes cambios poblacionales y de área urbana. El pionero en estudiar las ICUS en zonas tropicales y en la Ciudad de México fue Ernesto Jáuregui Ostos, quien ha documentado aspectos de sus variaciones espaciales y temporales (Jauregui, 1986, 1993, 1997, 2000). También se puede mencionar a Víctor Luis Barradas Miranda, quien ha estudiado microclimas en la Ciudad de México y la zona central de Veracruz (Ramos-Vázquez & Barradas, 1998; Ballinas & Barradas, 2016; Esperón-Rodríguez et al., 2016). En la Ciudad de Tampico, Tamaulipas, Fuentes Pérez (2014) reconoce que las ICUS exhiben una clara relación

espacial con las superficies escasamente vegetadas, de menor contenido de humedad relativa y de más baja reflectividad, lo que permite explicar las altas temperaturas que las caracterizan. Romero Dávila et al. (2011) hacen una investigación en la ciudad de Toluca, Estado de México, sobre las ICUS generadas durante el verano y el invierno; para ello utilizan datos atmosféricos cuya ubicación corresponde al área de mayor infraestructura urbana dispuesta claramente hacia el centro de la ciudad, donde se ubica el mayor número de edificios y construcciones con materiales que absorben el calor, así como una gran concentración de vehículos, además de falta de vegetación y escasez de cuerpos de agua. En cambio, en Ciudad Juárez, Chihuahua, el equipo de Soto Diaz y Pérez Ruiz (2015) aplicó un análisis de imágenes satelitales del sensor MODIS para la obtención de datos de temperatura de la superficie terrestre (TST) a lo largo del año 2014. Ellos se percataron de que las temperaturas diurnas fueron menores en las zonas periféricas y se encontraron zonas de mayor temperatura en la parte centro-norte del polígono urbano, tanto en verano como en invierno. Para temperaturas nocturnas, las temperaturas más bajas también fueron encontradas en la periferia, sin embargo, las temperaturas máximas, contrario al día, se encontraron en la zona centro del polígono urbano.

El objetivo general de este trabajo es analizar la evolución de las ICUS en las ciudades metropolitanas y conurbadas del corredor industrial del Bajío en los últimos veinte años, con imágenes del instrumento Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite Terra y/o Aqua, tanto diurnas como nocturnas, para evaluar qué tanto las ICUS se han intensificado en las ciudades del corredor industrial del Bajío debido a la industrialización que ha propiciado el crecimiento poblacional y con ello una expansión urbana que incrementa la cobertura de suelo urbano. Con la aplicación de las metodologías conocidas de percepción remota en las imágenes satelitales se tendrá un conocimiento regional del comportamiento de la ICUS en el corredor industrial del Bajío y se especificará cómo ha sido su desarrollo en los últimos años. Se espera que esto sea un nuevo referente para el conocimiento de las ICUS a nivel regional y temporal enfocado a corredores urbanos e industriales y a su vez que dé pie a nuevos trabajos en México que apliquen estas metodologías.

2 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio que comprende el corredor industrial del Bajío se conforma por diez zonas metropolitanas (Aguascalientes, Celaya, Guanajuato, La Piedad-Pénjamo, León, Moroleón-Uriangato, Querétaro, Rioverde, San Francisco del Rincón y San Luis Potosí) y cuatro conurbaciones (Salamanca, Irapuato, San Juan del Río y San Miguel de Allende), delimitadas de acuerdo al Sistema Urbano Nacional (SUN)¹ 2018, todas ubicadas en los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, San Luis Potosí y Michoacán. Las diez zonas metropolitanas y las cuatro zonas conurbadas que pertenecen al corredor industrial del Bajío se describen a continuación, basadas en información de INEGI (2001) y del SUN (SEGOB & SEDATU, 2018):

A. En la zona fisiográfica del Eje Neovolcánico se encuentran la mayoría de las ciudades del corredor del Bajío, a una altitud entre 1743 y 2041 m.s.n.m. Estas ciudades son, del estado de Guanajuato, Celaya, que comprende los municipios de Celaya, Cortázar, Villagrán y Comonfort; y la ciudad de León, que cuenta con los municipios de León y Silao; la zona metropolitana Moroleón-Uriangato se integra por los municipios de igual nombre; San Francisco del Rincón se conforma por los municipios de San Francisco del Rincón y Purísima del Rincón; la ciudad de Irapuato, que es solo ese municipio, y de igual forma la ciudad de Salamanca. La zona metropolitana de La Piedad-Pénjamo se conforma por los municipios de Pénjamo, del estado de Guanajuato, y La Piedad, en el estado de Michoacán. En el estado de Querétaro se encuentran la ciudad de Querétaro, la capital, y se asocia con los municipios de Huimilpan, Corregidora y El Marqués, además del municipio de Apaseo el Alto, del estado de Guanajuato. Por último, la ciudad de San Juan del Río, a la que solo pertenece el mismo municipio.

B. En la cordillera centroamericana se asientan solo cuatro ciudades que llegan a altitudes de 1926 hasta 2028 m.s.n.m. Estas son Aguascalientes,

¹ Instrumento para la planeación, seguimiento y evaluación de las ciudades en México. Para la publicación del año 2018 se identifican y actualizan los rasgos de 401 ciudades, clasificadas en zonas metropolitanas (74), conurbaciones (132) y centros urbanos (195), las cuales han sido identificadas con fuentes de información geoestadística oficiales (SEGOB & SADATU, 2018).

conformada por la capital del estado de Aguascalientes y los municipios de Jesús María y San Francisco de los Romo (este último se consolidó como municipio en el año 1995, por lo que no se cuenta con datos del censo de 1990); la ciudad de Guanajuato, que es la capital del estado de Guanajuato; la zona conurbada de San Miguel de Allende, constituida por dicho municipio, y la zona metropolitana de San Luis Potosí, que además de con la capital, comparte su denominación con los municipios de Soledad de Graciano Sánchez y Zaragoza.

C. Finalmente, en la Sierra Madre Oriental, a 990 m.s.n.m., se localiza la ciudad de Rioverde, perteneciente al estado de San Luis Potosí, junto a los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández.

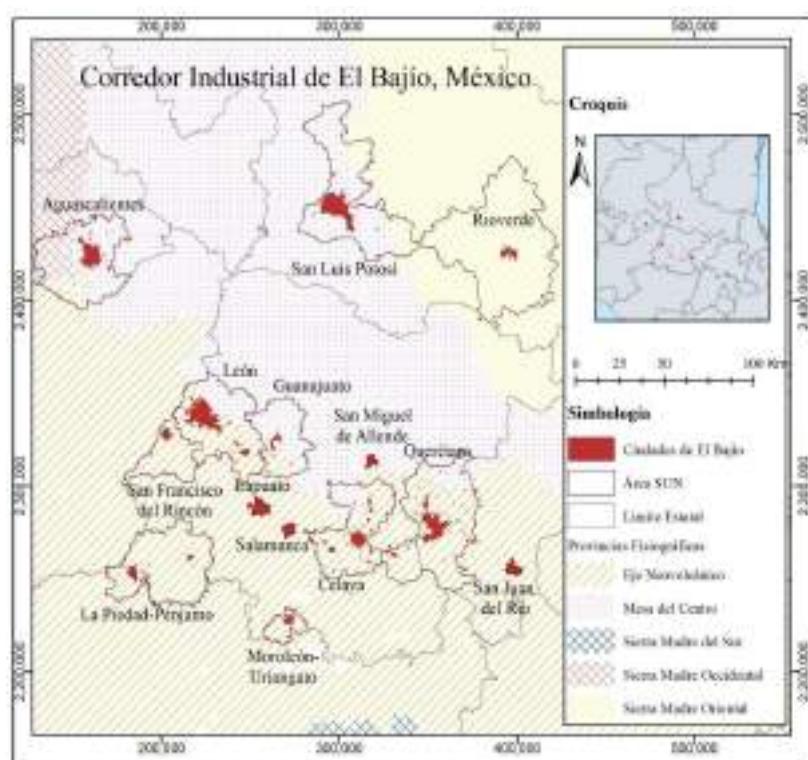


Figura 1. Ubicación de las áreas que pertenecen al corredor industrial del Bajío.

Para este análisis se dividió a las ciudades y zonas metropolitanas en Grupo I (Aguascalientes, León, Querétaro y San Luis Potosí), Grupo II (Celaya, Guanajuato, La Piedad-Pénjamo, Moroleón-Uriangato, Rioverde y San Francisco del Rincón) y Grupo III (Irapuato, Salamanca, San Miguel de Allende y San Juan del Río).

3 OBTENCIÓN DE INSUMOS

Con el objetivo de definir el área de estudio se descargó el SUN versión 2018 (SEGOB & SEDATU, 2018) para identificar los municipios que conforman las diez zonas metropolitanas del Bajío (Aguascalientes, Celaya, Guanajuato, La Piedad-Pénjamo, León, Moroleón-Uriangato, Querétaro, Rioverde, San Francisco del Rincón y San Luis Potosí) y las cuatro conurbaciones (Salamanca, Irapuato, San Juan del Río y San Miguel de Allende), para posteriormente delimitar las áreas urbanas mediante el Marco Geoestadístico² (INEGI, 2017). A su vez, se analizaron las ciudades a través de su registro en el SUN desde el año 1960 (cuando inició el proceso de metropolización en la región del Bajío) para así constatar su crecimiento, tanto territorial como demográfico.

Como parte de los insumos, se obtuvieron los productos de GlobeLand 30 en sus versiones 2000, 2010 y 2014, que consisten en una serie de imágenes de resolución espacial de 30 m desarrolladas por China. Las imágenes utilizadas para la clasificación de la cobertura terrestre para el desarrollo y la actualización de GlobeLand30 son principalmente imágenes multiespectrales de 30 metros, incluidas TM5, ETM +, y las multiespectrales OLI de Landsat (EUA), además de las imágenes HJ-1 del Satélite de Reducción de Desastres y Medio Ambiente de China y las imágenes multiespectrales GF-1 (satélite de alta resolución de China) de 16 m de resolución (GlobeLand30, 2019). Los productos de GlobeLand30

2 El Marco Geoestadístico es un sistema único y nacional diseñado por el INEGI que presenta la división del territorio nacional en diferentes niveles de desagregación para referirse geográficamente a la información estadística de los censos y encuestas institucionales y de las unidades estatales. Cada uno de los elementos que lo integran tiene atributos de nombre y clave geoestadística (INEGI, 2017).

comprenden diez tipos de cobertura terrestre a considerar: cultivo, árboles y bosque, pastizales, arbustos/matorrales, vegetación acumulada/humedal, cuerpos de agua, tundra, áreas construidas, áreas desnudas y nieve y hielo permanentes. Este producto, en sus tres series (2000, 2010 y 2020), se utilizará para identificar las áreas con mayor vegetación y contrastar la evolución de las ICUS con los cambios de coberturas terrestres, identificando cómo han cambiado las diez categorías en los últimos veinte años en la región del Bajío.

Adicionalmente se descargaron imágenes satelitales del sensor MODIS, el cual es un instrumento a bordo de los satélites Terra (1999) y Aqua (2002) lanzados por la NASA para escanear la superficie y la atmósfera de la Tierra con un espectrómetro de 36 bandas, brindando una cobertura global de uno a dos días. Registra sus imágenes a una resolución espacial de 250 m (bandas 1-2), 500 m (bandas 3-7), y 1 km (bandas 8-36). Las imágenes térmicas se capturan con una resolución de 1 km. Debido a la resolución espacial y dimensión de franja de MODIS (2,330 km vía transversal por 10 km a lo largo de la vía en el nadir) las imágenes se utilizan para la investigación de grandes áreas de estudio (Zhou et al., 2019). En cuanto al tipo de sensor, Hu (2014) menciona que los sensores MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua proporcionan una cobertura global de TST cuatro veces al día, por tanto, las órbitas satélites sincronizadas con el Sol de MODIS están diseñadas para cruzar el ecuador a las 10:30 y a las 22:30 para Terra, y a las 13:30 y 1:30 para Aqua (hora solar local), siendo el sensor Aqua el seleccionado para la obtención de la TST por su horario de paso y además porque el producto MYD11A2 es el promedio de su composición de 2 a 8 días de MYD11A1, y la imagen resultante es la integración de la TST de varios días y contiene menor cantidad de píxeles vacíos. Hay que mencionar además que, como lo describe Wan (2013), la TST se construye con los valores diarios de píxeles en cada gránulo recuperado por el algoritmo de ventana dividida generalizado en condiciones de cielo despejado definidas en MOD35 (con una confianza $\geq 95\%$ sobre tierra ≤ 2000 m o $\geq 66\%$ sobre tierra > 2000 m, y con una confianza $\geq 66\%$ sobre lagos) mediante el mapeo de todos los valores TST de cielo despejado, válidos en cuadrículas en la proyección sinusoidal y promediando los valores TST de píxeles superpuestos en cada cuadrícula con áreas superpuestas como peso.

4 MÉTODOS

4.1 Determinación de la temperatura de la superficie terrestre (TST)

La metodología aplicada para la obtención de la TST se divide en diferentes etapas, en las que se utilizó para la adquisición de datos y el procesamiento el entorno y lenguaje de programación R versión 3.6.1 y RStudio, ambos en su edición de código abierto. A continuación, se describen los pasos que se desarrollaron para la obtención de la TST:

4.1.1 Descarga de productos y archivos HDF

Se realizó la descarga de las imágenes MODIS MYD11A2 (Aqua) de los años 2002 al 2020 diurnas y nocturnas por medio de la herramienta MODIStps, el cual consiste en un paquete de R diseñado para mejorar el acceso, la descarga y el procesamiento de las imágenes MODIS. Entre las distintas ventajas de la paquetería MODIStps, Busetto & Ranghetti (2016) mencionan que tiene un conjunto de funciones que permiten adquirir imágenes MODIS en múltiples ubicaciones, periodos de tiempo y productos. En total, se descargaron 850 imágenes diurnas y 850 nocturnas de MODIS MYD11A2 (Aqua) pertenecientes al periodo comprendido entre el 4 de julio de 2002 al 18 de diciembre de 2020. Si bien no se cuenta con la totalidad del año 2002, se observa una tendencia del comportamiento de la TST y de las ICUS en ese periodo de tiempo.

4.1.2 Stack, serie de tiempo, reproyección

Como parte del preprocesamiento, se guardaron las imágenes de MODIS MYD11A2 (Aqua) diurnas y nocturnas por separado en un RasterStack de RStudio para definir los valores z (tiempo) y que las imágenes fueran identificadas al procesar con la fecha correspondiente que contiene cada una y establecerlos como serie de tiempo, para posteriormente reproyectar a la zona Universal Transversal de Mercator (en inglés, Universal Transverse Mercator, UTM) 13 o 14, según corresponde al área de estudio. Cabe mencionar que el sistema de coordenadas UTM ha sido seleccionado debido a

que las magnitudes en ese sistema se expresan en metros, lo cual será de gran utilidad para los siguientes pasos.

4.1.3 Escala, conversión de temperatura a grados Celsius, recorte del área de estudio

Las imágenes satelitales, dependiendo del producto, contienen un factor de escala que debe ser aplicado para conocer los valores reales. En el caso de las imágenes TST, contienen un factor de escala de 0.02 que debe ser multiplicado por cada píxel contenido. En cuestión de la temperatura, se tienen las imágenes con valores en kelvin, por lo que para convertir a grados Celsius es necesario restar 273.15 K. Finalmente, se recortan las ciudades al tamaño del área urbana de cada zona metropolitana o conurbada y además con un buffer al exterior de la ciudad de 10 km como referencia para el cálculo de la ICUS.

5 ESTIMACIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR URBANO SUPERFICIAL (ICUS)

En este estudio se ha seguido la definición de la ICUS, propuesta por Chakraborty & Lee (2019), como la diferencia en TST de los píxeles urbanos y los píxeles no urbanos dentro de cada extensión urbana. Por lo tanto, como se mencionó anteriormente, se consideró un buffer de 10 km para diferenciar el calor urbano de píxel TST con el TST promedio del buffer alrededor de la zona metropolitana o conurbada, separando este diferencial de día y de noche (Clinton & Gong, 2013; Chakraborty & Lee, 2019). El cálculo de la ICUS fue obtenido mediante la paquetería LSTools realizada por Lemoine-Rodriguez y Mas, como se muestra en el diagrama de la Figura 2, la cual proporciona 21 herramientas para el análisis de datos térmicos derivados de los satélites Landsat y Modis, incluyendo una serie de preprocesamiento, procesamiento y funciones de posprocesamiento para realizar evaluaciones de las ICUS (Lemoine-Rodríguez & Mas, 2020).

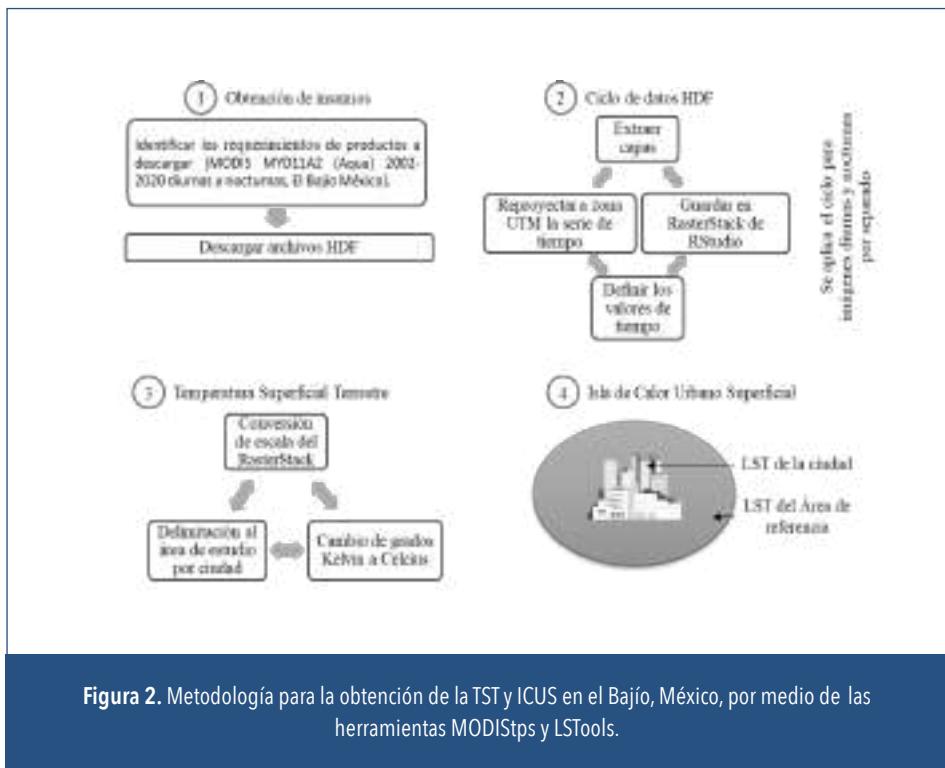


Figura 2. Metodología para la obtención de la TST y ICUS en el Bajío, México, por medio de las herramientas MODIStps y LTools.

6 RESULTADOS

6.1 Incremento poblacional

El comportamiento demográfico ha sido muy variado a nivel regional: en 1990 la población del corredor industrial del Bajío era de 4,789,341 habitantes, y ya para el año 2020 se conformaba por una población de 8,962,625 personas, casi duplicando la población en treinta años.

A nivel zona, las metrópolis de Querétaro, León y Aguascalientes destacan por tener el mayor incremento de población (estimada a partir de la diferencia de la población de los años 2020 y 1990), con 966,160, 941,721 y 593,550 habitantes, respectivamente. Es de notar que en treinta años la población se duplicó en esas ciudades; además, la tasa de crecimiento anual fue de 3.15 % (Querétaro), 2.2 % (León) y 2.47 % (Aguascalientes).

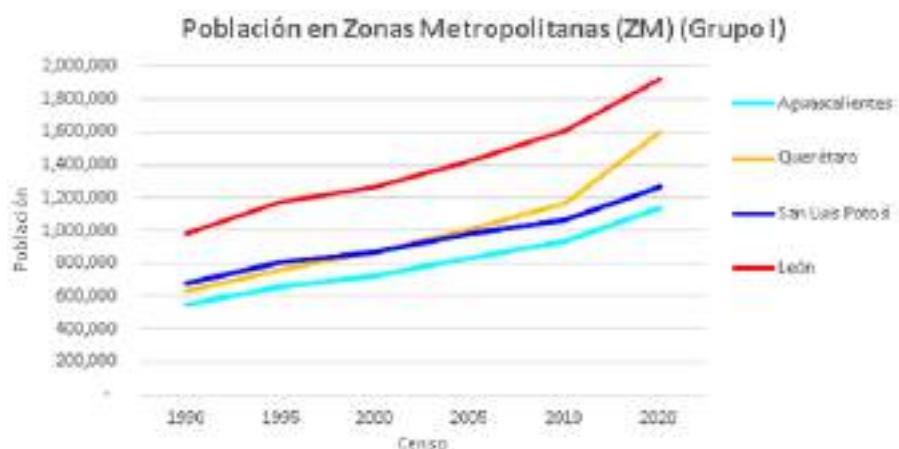


Figura 3a. Incremento de la población durante treinta años en las diez zonas metropolitanas del corredor industrial del Bajío.

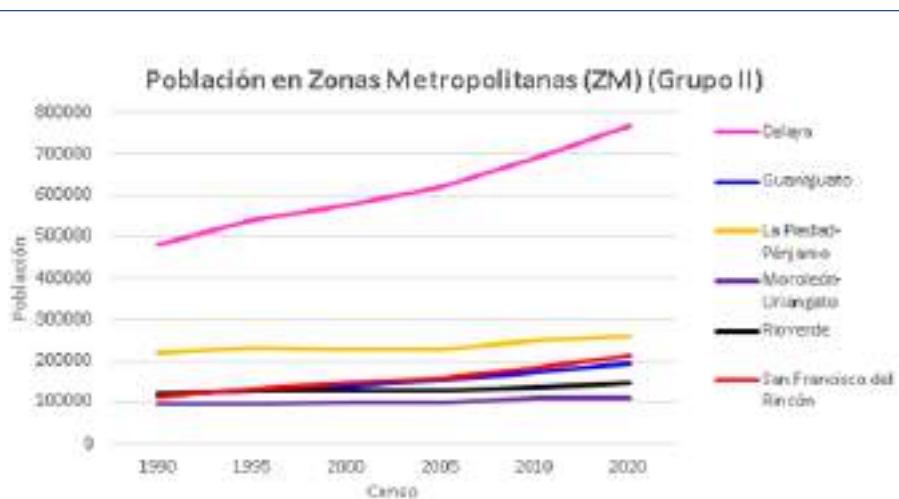


Figura 3b. Incremento de la población durante treinta años en las diez zonas metropolitanas del corredor industrial del Bajío.

Sin embargo, ciudades y zonas metropolitanas como San Francisco del Rincón, Guanajuato, Rioverde, La Piedad-Pénjamo y Moroleón-Uriangato no han tenido un incremento poblacional tan abrupto como Aguascalientes y Querétaro, ya que muestran tasas de crecimiento anual del 2.13 %, 1.64 %, 0.62 %, 0.59 % y 0.45 %, respectivamente.

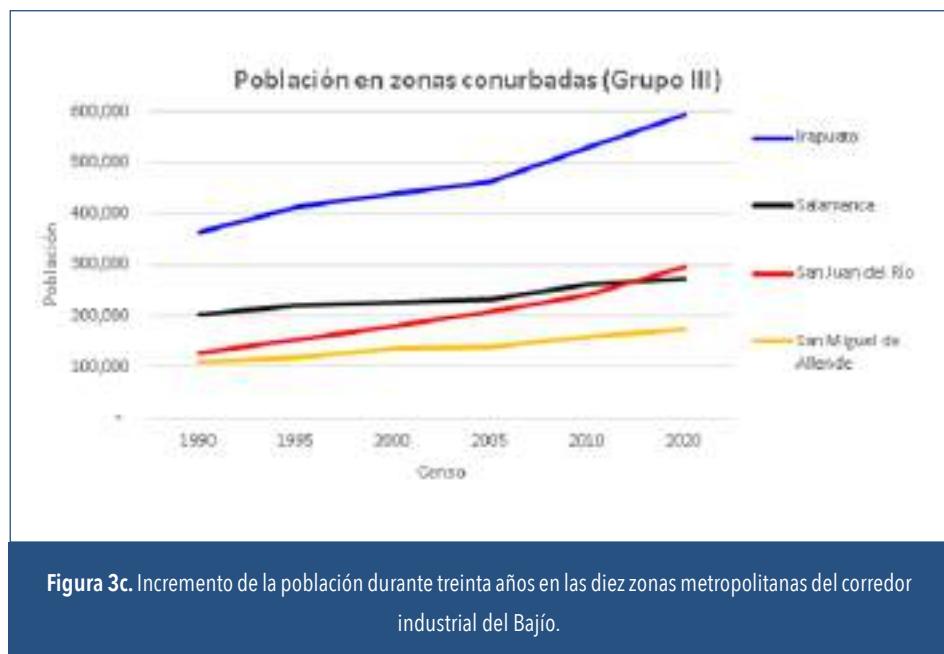


Figura 3c. Incremento de la población durante treinta años en las diez zonas metropolitanas del corredor industrial del Bajío.

En el caso de las zonas conurbadas, al ser áreas mucho más pequeñas, destaca el crecimiento de Irapuato, pues con una tasa de crecimiento anual del 1.65 % es la ciudad que cuenta con mayor población, superior a la de las ciudades de Salamanca, San Juan del Río y San Miguel de Allende, cuyas tasas de crecimiento son del 0.97 %, 2.89 % y 1.53 %, respectivamente.

Como se observa en las gráficas anteriores, los resultados fueron presentados en tres grupos: el primero, de zonas metropolitanas con población igual o mayor a un millón de habitantes, conforme a la división proporcionada por el INEGI (2020), en la que fragmenta a las localidades de acuerdo

con el número de personas que residen ahí habitualmente; el segundo, con las ciudades restantes metropolitanas; y el tercer grupo, de conurbadas. Esta clasificación se utilizará en las secciones siguientes para presentar los resultados.

6.2 Cambio de uso de suelo

Para contabilizar el cambio de coberturas terrestres se consideraron dos áreas fijas al interior y exterior de las áreas urbanas definidas en la actualidad, es decir, el área total de cada ciudad fue obtenida mediante las localidades urbanas del Marco Geoestadístico del INEGI 2017 y el área externa a las localidades urbanas se contabilizó considerando un buffer de 10 km, siendo el área de referencia para el cálculo de las ICUS. A partir de dichas áreas se calculó el porcentaje de cada cobertura, omitiendo las categorías de tundra, nieve y hielo permanentes que se encuentran ausentes en el área del Bajío.

A continuación, se expone en la siguiente tabla las coberturas terrestres en el Bajío en los períodos 2000, 2010 y 2020:

TABLA 1A. COBERTURAS TERRESTRES GLOBELAND30 EN LAS ZONAS METROPOLITANAS Y CONURBADAS DEL BAJÍO, 2000, 2010 Y 2020

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M01.01 Aguascalientes	13,370.98	134,967.66	Cultivo	4.3	50.27	5.97	44.18	6.66	44.29
			Árboles y bosque	0.1	1.84	0.11	1.91	0.11	1.73
			Pastizales	3.27	9.61	3.06	13.54	3.28	14.78
			Arbustos / Matorrales	2.88	29.01	3.02	31.84	3.43	31.63
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.09	0	0.14	0	0	0.12
			Cuerpos de agua	0.24	0.42	0.14	0.42	0.14	0.35
			Áreas construidas	89.12	8.85	86.31	5.78	84.86	5.4
			Áreas desnudas	0	0	1.25	2.34	1.52	1.7

TABLA 1B. COBERTURAS TERRESTRES GLOBELAND30 EN LAS ZONAS METROPOLITANAS Y CONURBADAS DEL BAJÍO, 2000, 2010 Y 2020

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M11.02 Guanajuato	3,107.85	104,470.27	Cultivo	3.7	32.36	2.9	25.2	2.9	25.2
			Árboles y bosque	4.93	18.84	5.63	19.1	5.63	19.1
			Pastizales	2.2	17.7	7.99	21.61	7.99	21.61
			Arbustos / Matorrales	13.13	25.46	24.47	30.31	24.47	30.31
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	0.01	0		0	0.02
			Cuerpos de agua	0.3	0.71	0	0.34	0	0.34
			Áreas construidas	75.73	4.92	58.68	2.29	58.68	2.29
			Áreas desnudas	0	0	0.33	1.13	0.33	1.13
M11.01 Celaya	11,102.57	222,115.51	Cultivo	15.64	61.95	22.77	63.18	22.77	63.18
			Árboles y bosque	0.15	4.39	0.18	3.72	0.18	3.72
			Pastizales	3.54	4.22	3.36	4.33	3.36	4.33
			Arbustos / Matorrales	3.22	23.43	4.61	25.07	4.61	25.07
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	0.06	0	0.07	0	0.07
			Cuerpos de agua	0	0.1	0	0.14	0	0.14
			Áreas construidas	77.37	5.77	68.91	3.33	68.91	3.33
			Áreas desnudas	0.07	0.08	0.17	0.16	0.17	0.16
C11.02 San Miguel de Allende	2,412.60	55,015.39	Cultivo	8.59	42	11.96	41	11.96	41
			Árboles y bosque	0.13	5.17	0.15	5.14	0.15	5.14
			Pastizales	2.69	13.77	1.78	15.24	1.78	15.24
			Arbustos / Matorrales	11.34	28.4	15.39	30.71	15.39	30.71
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.04	0.06	0.06	0.63	0.06	0.63
			Cuerpos de agua	0.12	3.16	0.09	1.85	0.09	1.85
			Áreas construidas	77.08	5.87	70.57	3.23	70.57	3.23
			Áreas desnudas	0.01	1.58	0.01	2.2	0.01	2.2

TABLA 1B.
(CONTINUACIÓN)

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
C11.06 Salamanca	3,594.45	58,420.30	Cultivo	9.93	81.72	13.31	83.24	13.31	83.24
			Árboles y bosque	0.07	1.06	0.11	1.18	0.11	1.18
			Pastizales	0.41	1.07	0.68	1.58	0.68	1.58
			Arbustos / Matorrales	0.02	6.42	0.23	6.37	0.23	6.37
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	0.03	0	0.04	0	0.04
			Cuerpos de agua	0	0	0.76	0.34	0.76	0.34
			Áreas construidas	89.57	9.7	84.91	7.25	84.91	7.25
			Áreas desnudas	0	0	0	0	0	0

TABLA 1C. COBERTURAS TERRESTRES GLOBELAND30 EN LAS ZONAS METROPOLITANAS Y CONURBADAS DEL BAJÍO, 2000, 2010 Y 2020

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M11.05 San Francisco del Rincón	2,923.57	53,649.99	Cultivo	11.75	53.56	15.13	43.48	15.13	43.48
			Árboles y bosque	0.06	2.58	0.02	3.56	0.02	3.56
			Pastizales	0.01	1.15	0.01	2.23	0.01	2.23
			Arbustos / Matorrales	4.62	32.74	3.65	43.78	3.65	43.78
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.01	0.17	0	0.17	0	0.17
			Cuerpos de agua	0	1.13	0	0.56	0	0.56
			Áreas construidas	83.56	7.67	81.19	6.07	81.19	6.07
			Áreas desnudas	0	0	0.01	0.15	0.01	0.15

TABLA 1C.
(CONTINUACIÓN)

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M11.03 León	23,512.20	187,547.59	Cultivo	10.35	49.13	17.27	46.82	17.27	46.82
			Árboles y bosque	0.54	12.01	1.19	12.48	1.19	12.47
			Pastizales	0.61	3.87	1.05	5.4	1.05	5.39
			Arbustos / Matorrales	2.73	24.26	6.93	30.47	6.93	30.48
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.48	0.42	0.47	0.14	0.47	0.14
			Cuerpos de agua	1.21	1.18	0.47	0.26	0.47	0.26
			Áreas construidas	84.08	9.13	72.49	4.24	72.49	4.24
			Áreas desnudas	0	0	0.14	0.2	0.14	0.2
C11.05 Irapuato	6,395.06	71,202.69	Cultivo	13.85	75.94	23.9	78.33	23.9	78.33
			Árboles y bosque	0.1	0.52	0.15	0.52	0.06	0.52
			Pastizales	1.19	2.07	1.89	3.76	1.88	3.76
			Arbustos / Matorrales	1.45	9.97	1.03	10.93	1.13	10.93
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	0.01	0	0.01	0	0.01
			Cuerpos de agua	0	0.13	0	0.06	0	0.06
			Áreas construidas	83.41	11.37	73.02	6.29	73.02	6.29
			Áreas desnudas	0	0	0.01	0.1	0.01	0.1
M16.01 La Piedad- Pénjamo	4,058.44	122,654.18	Cultivo	26.57	65.19	29.82	63.59	33.23	63.73
			Árboles y bosque	0.81	2.2	1.14	2.21	1.04	2.13
			Pastizales	0.58	5.95	3.02	8.45	3.01	8.87
			Arbustos / Matorrales	1.06	21.16	1.45	21.86	1.57	21.45
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.02	0.06	0.06	0.11	0.62	0.21
			Cuerpos de agua	0	0.85	0.31	0.65	0.56	1.76
			Áreas construidas	70.97	4.58	64.19	3.13	59.95	2.85
			Áreas desnudas	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01

TABLA 1C.
(CONTINUACIÓN)

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M11.04 Moroleón-Uriangato	2,382.34	54,200.93	Cultivo	40.92	22.7	34.55	22.7	34.55	
			Árboles y bosque	0.02	6.22	0.05	5.53	0.05	5.53
			Pastizales	0.67	2.29	3.18	3.86	3.18	3.86
			Arbustos / Matorrales	2.98	37.87	5.01	46.2	5.01	46.2
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	1.52	0	2.01	0	2.01
			Cuerpos de agua	0	5.53	0	4.12	0	4.12
			Áreas construidas	79	5.57	69.06	3.64	69.06	3.64
			Áreas desnudas	0	0.08	0	0.09	0	0.09

TABLA 1D. COBERTURAS TERRESTRES GLOBELAND30 EN LAS ZONAS METROPOLITANAS Y CONURBADAS DEL BAJÍO, 2000, 2010 Y 2020

Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
M22.01 Querétaro	19,661.66	300,022.90	Cultivo	4.04	49.17	10.93	52.8	10.93	52.8
			Árboles y bosque	0.24	5.37	0.26	5.18	0.26	5.18
			Pastizales	1.94	3.86	1.63	3.65	1.63	3.65
			Arbustos / Matorrales	4.24	31.94	7.85	32.68	7.85	32.68
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.02	0.05	0.1	0.07	0.1	0.07
			Cuerpos de agua	0.27	0.67	0.21	0.6	0.21	0.6
			Áreas construidas	89.25	8.65	79.01	4.78	79.01	4.78
			Áreas desnudas	0	0.3	0.01	0.23	0.01	0.23

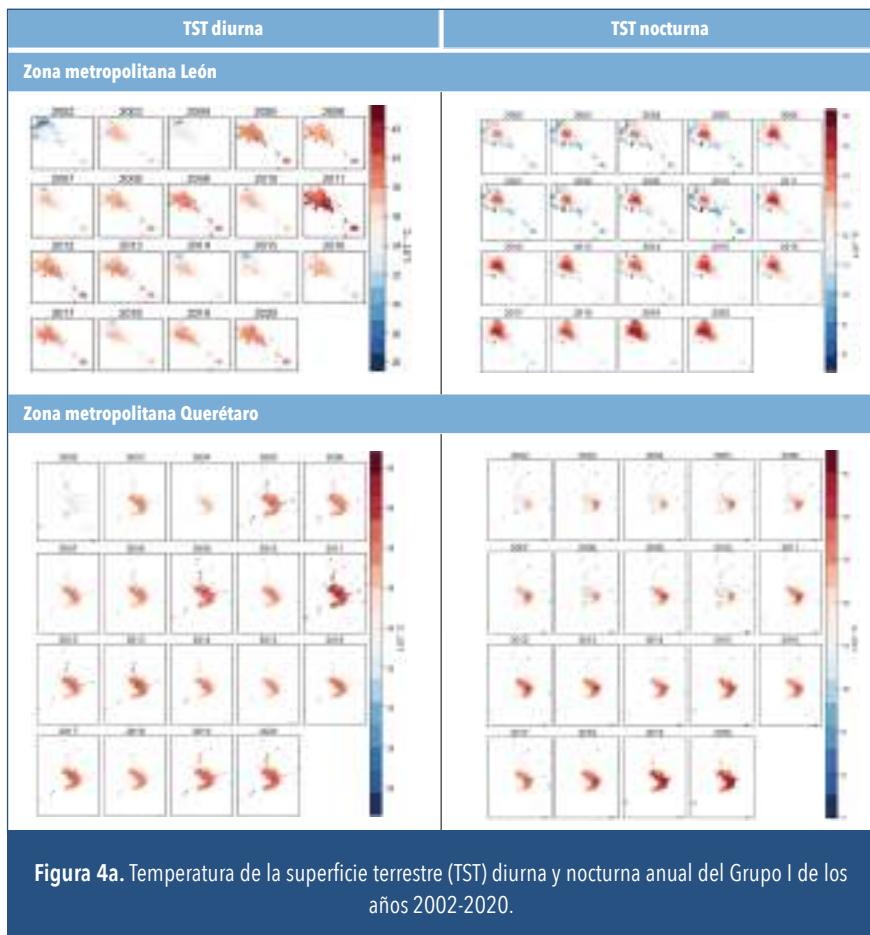
TABLA 1D.
(CONTINUACIÓN)

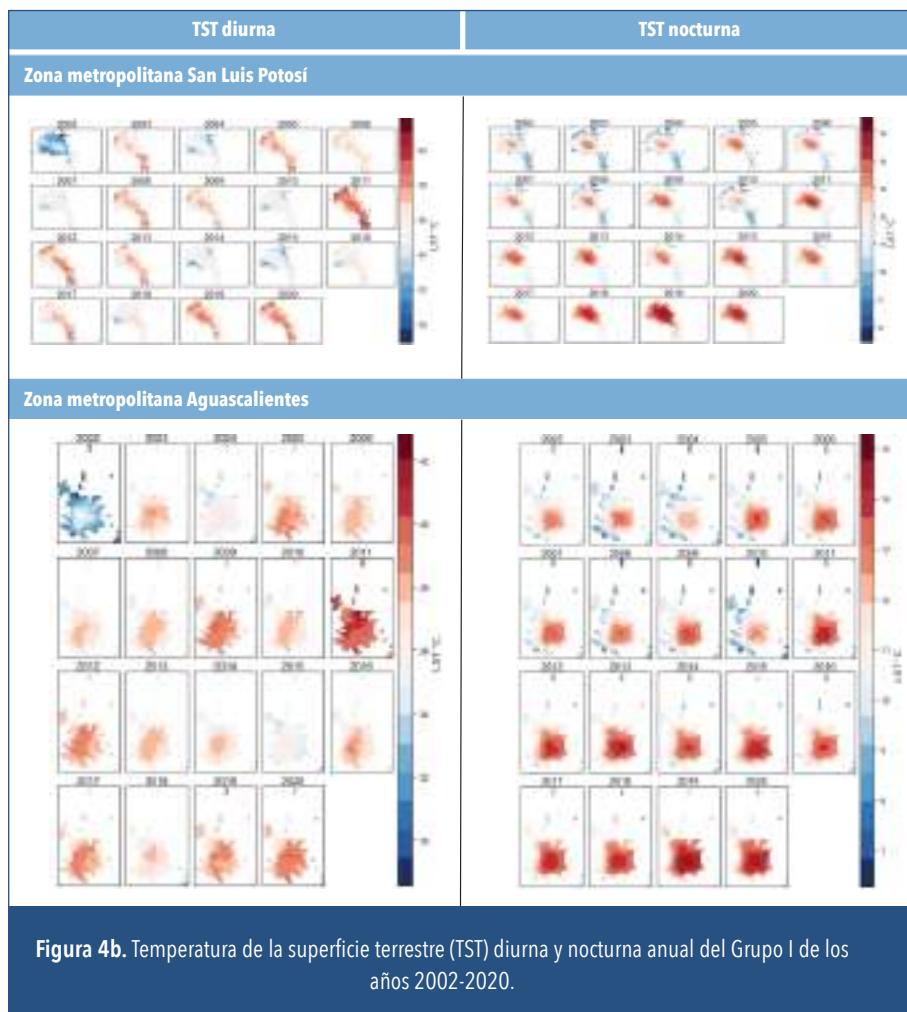
Ciudad	Área total interior límite urbano	Área total exterior límite urbano	Categorías	2020		2010		2000	
				Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %	Área urbana %	Buffer %
C22.01 San Juan del Río	4,035.29	62,992.34	Cultivo		57.25				59.96
			Árboles y bosque	0.3	2.93	0.37	2.99	0.37	2.99
			Pastizales	2.54	3.28	3.84	3.32	3.84	3.32
			Arbustos / Matorrales	4.46	24.94	6.61	25.12	6.61	25.12
			Vegetación acumulada / Húmedal	0	0	0	0	0	0
			Cuerpos de agua	0	1.61	0.1	0.57	0.1	0.57
			Áreas construidas	80.1	9.97	69.7	7.01	69.7	7.01
			Áreas desnudas	0	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02
M24.01 Rioverde	4,194.94	65,064.80	Cultivo	55.4	44.88	59.31	36.15	59.31	36.15
			Árboles y bosque	0.04	13.23	0.94	13.61	0.9	13.54
			Pastizales	0	2.9	0.03	3.83	0.03	3.81
			Arbustos / Matorrales	1.69	36.85	4.37	44.63	4.41	44.72
			Vegetación acumulada / Húmedal	1.01	0.26	1.22	0.54	1.22	0.54
			Cuerpos de agua	0	0.13	0	0.08	0	0.08
			Áreas construidas	41.86	1.69	34.12	1.09	34.12	1.09
			Áreas desnudas	0	0.05	0	0.07	0	0.07
M24.02 San Luis Potosí	19,697.43	147,769.10	Cultivo	8.61	24.93	17.49	21.29	17.49	21.26
			Árboles y bosque	0.2	12.6	0.3	13	0.37	9.64
			Pastizales	3.02	11.07	4.68	12.44	2.12	12.45
			Arbustos / Matorrales	2.36	43.85	3.5	47.53	6.19	52
			Vegetación acumulada / Húmedal	0.27	0.15	0.53	0.24	0.53	0.23
			Cuerpos de agua	0.02	0.29	0.12	0.14	0.12	0.13
			Áreas construidas	85.35	7.09	72.99	2.79	72.9	2.75
			Áreas desnudas	0	0.20	0.39	2.57	0.29	1.54

6.3 Estimación de TST y ICUS

Se extrajeron los valores de la TST de las imágenes MODIS MYD11A2 de los años 2002 al 2020 por medio de las herramientas MODIStps y LSTTools tanto para las imágenes diurnas como nocturnas y posteriormente se calcularon las ICUS. A continuación, se muestran los datos obtenidos diurnos y nocturnos tanto de la TST como de las ICUS por grupos de ciudades de acuerdo con el tipo de ciudad y población.

Grupo I





En las figuras del Grupo I, podemos observar que en las ciudades más grandes del Bajío y con alta densidad poblacional se encuentran temperaturas superficiales de hasta 40 °C como máxima diurna, como es el caso de Aguascalientes, al igual que el promedio de TST más alto de los años 2002 al 2020 se encuentra en esta ciudad, con 37 °C; seguida de Querétaro, con 36.7 °C; León, con 36.5 °C; y San Luis Potosí, con 35.9 °C. Caso distinto en los resultados nocturnos, donde la TST máxima en promedio de los años 2002 a 2020 es, en León, con 12.1 °C; Querétaro, 11.9 °C; San Luis Potosí,

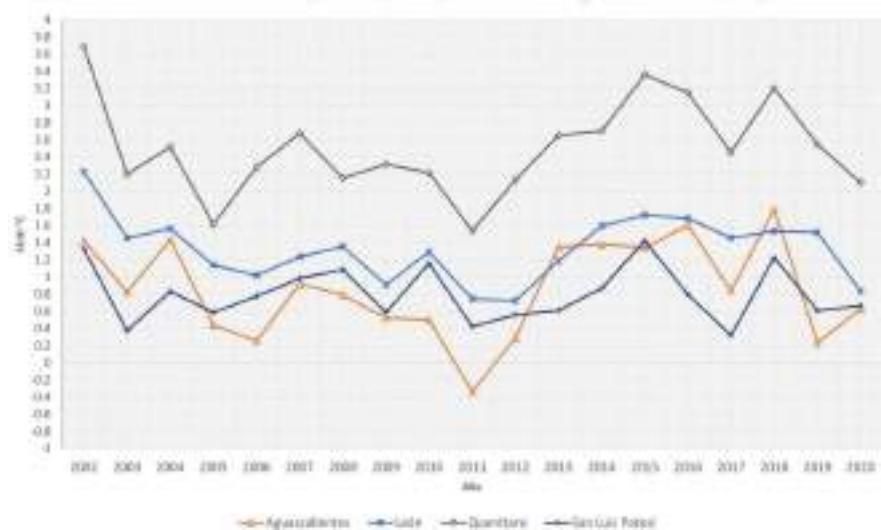


Figura 5. Isla de calor urbano superficial (ICUS) diurna anual del Grupo I de los años 2002-2020.

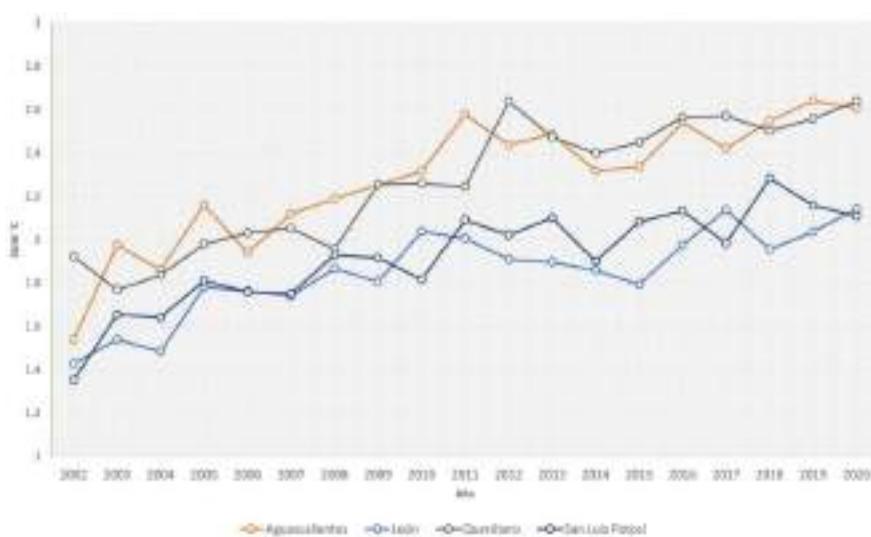
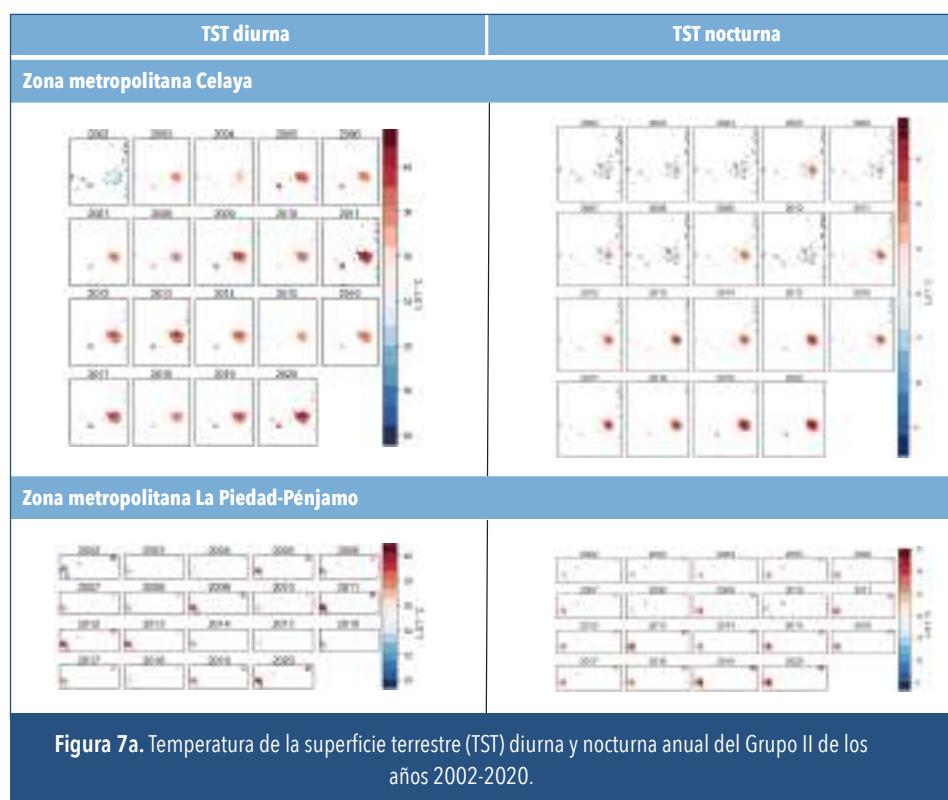


Figura 6. Isla de calor urbano superficial (ICUS) nocturna anual del Grupo I de los años 2002-2020.

11.8 °C; y Aguascalientes, 11.6 °C. En particular, este grupo de ciudades tiene un comportamiento de TST muy similar, ya que no presenta diferencias significativas como en el caso de otras ciudades que se mostrarán en los siguientes grupos.

Los resultados obtenidos en la ICUS diurna hacen que resulte complicado predecir su comportamiento, pues no siguen una tendencia en particular, a diferencia de la ICUS nocturna, que en las cuatro ciudades metropolitanas del Grupo I muestra una tendencia ascendente que permite determinar incluso la pendiente para mostrar numéricamente su crecimiento. La pendiente para Aguascalientes es de 0.0459; Querétaro, 0.048; San Luis Potosí, 0.0352; y León, 0.03. Dichos resultados permiten identificar en qué ciudades se está incrementando la ICUS más rápidamente.

Grupo II



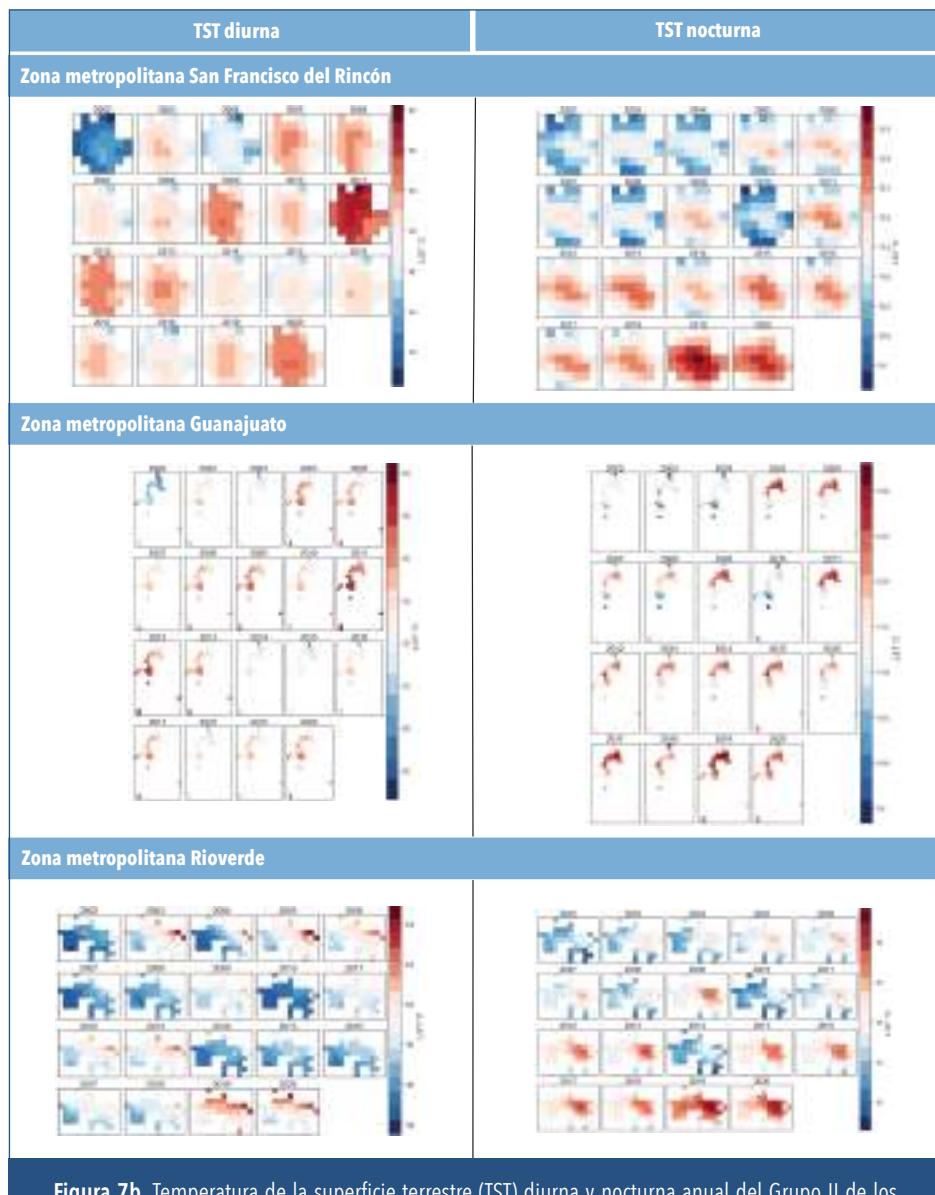


Figura 7b. Temperatura de la superficie terrestre (TST) diurna y nocturna anual del Grupo II de los años 2002-2020.

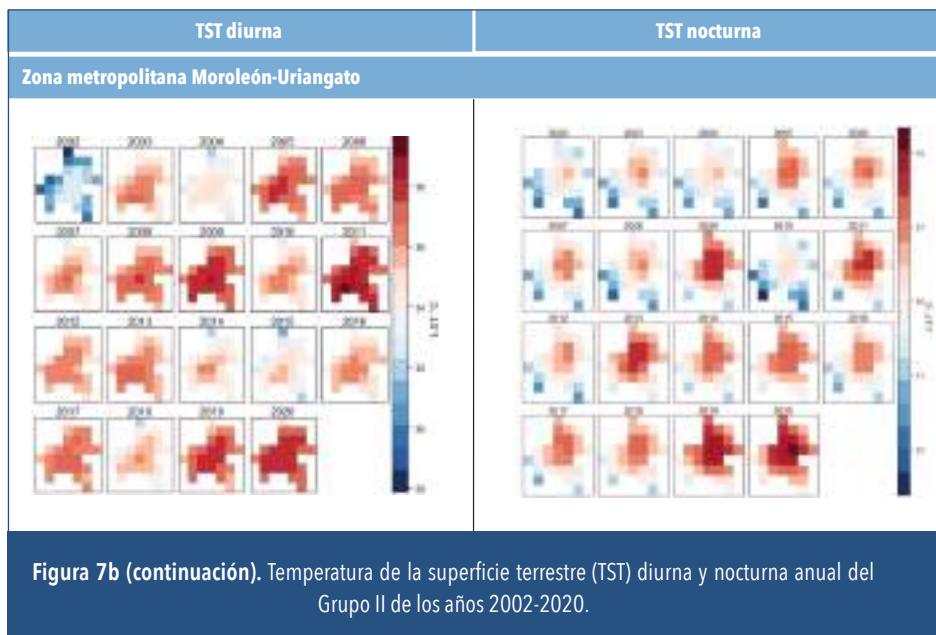


Figura 7b (continuación). Temperatura de la superficie terrestre (TST) diurna y nocturna anual del Grupo II de los años 2002-2020.

El segundo grupo de resultados se encuentra compuesto por el resto de las seis ciudades metropolitanas. En este grupo se tiene mayor disparidad de resultados de la TST entre las ciudades debido a las características de cada una, principalmente la altitud y la superficie, que tienen mayor variabilidad en este grupo. Es de notar que mientras en el Grupo I la TST diurna llegaba a variar en promedio del 2002 al 2020 hasta en 1.1 °C, en el Grupo II varía hasta en 3.8 °C, encontrándose el promedio más alto en la ciudad de Rioverde, con 37.9 °C, y el más bajo en Guanajuato, con 34 °C, mientras que, en la noche, la TST más alta se encuentra nuevamente en Rioverde, con un promedio de 14 °C, y la mínima en San Francisco del Rincón, con 11.5 °C.

El comportamiento de la ICUS diurna en este grupo se distingue por tener valores más constantes en todas las ciudades a excepción de Rioverde, que incluso la mayor parte del tiempo presenta una ICUS negativa. En tanto, en la ICUS nocturna nuevamente se tiene un comportamiento creciente, principalmente en San Francisco del Rincón, que forma una pendiente de 0.0311, y Celaya, de 0.0304; seguidas de Rioverde, con pendiente de 0.0231; Moroleón, 0.0179; Guanajuato, 0.0044; y la zona de La Piedad-Pénjamo, de 0,0015.

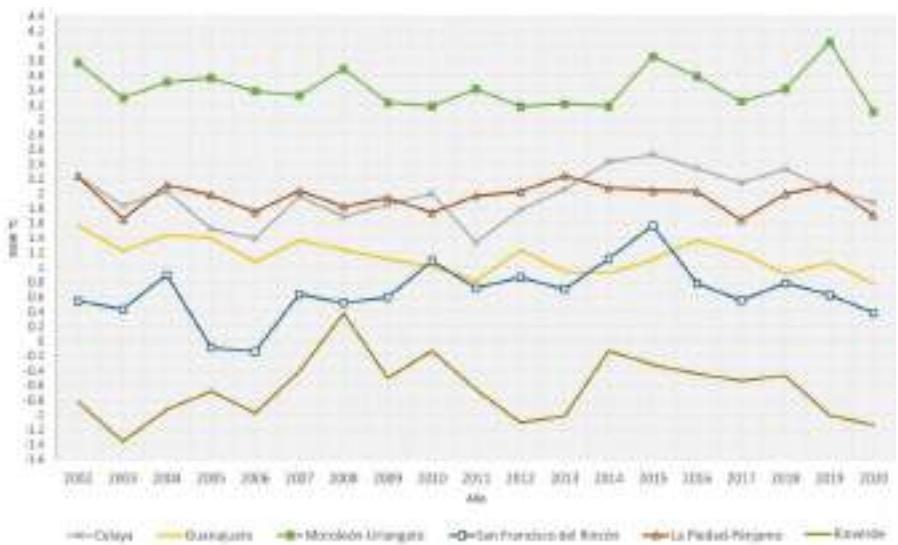


Figura 8. Isla de calor urbano superficial (ICUS) diurna anual del Grupo II de los años 2002-2020.

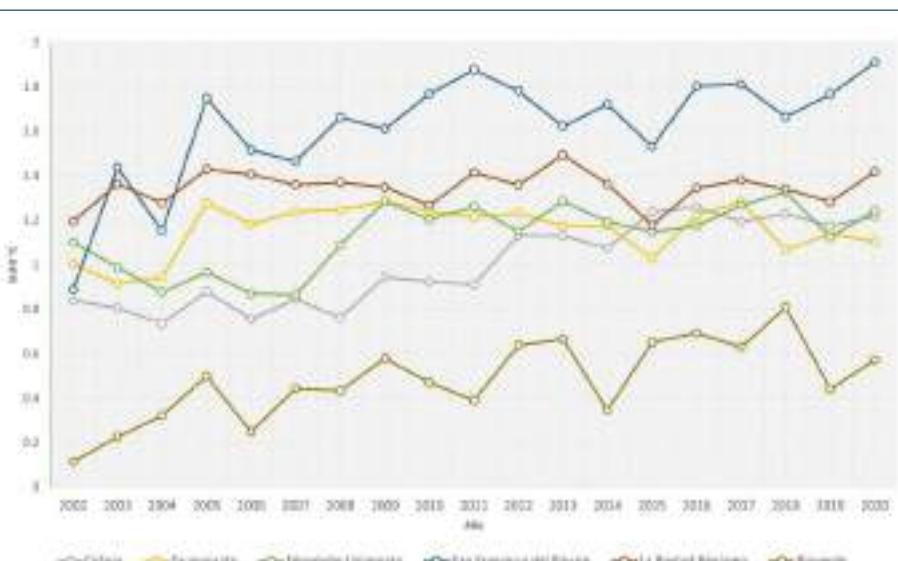
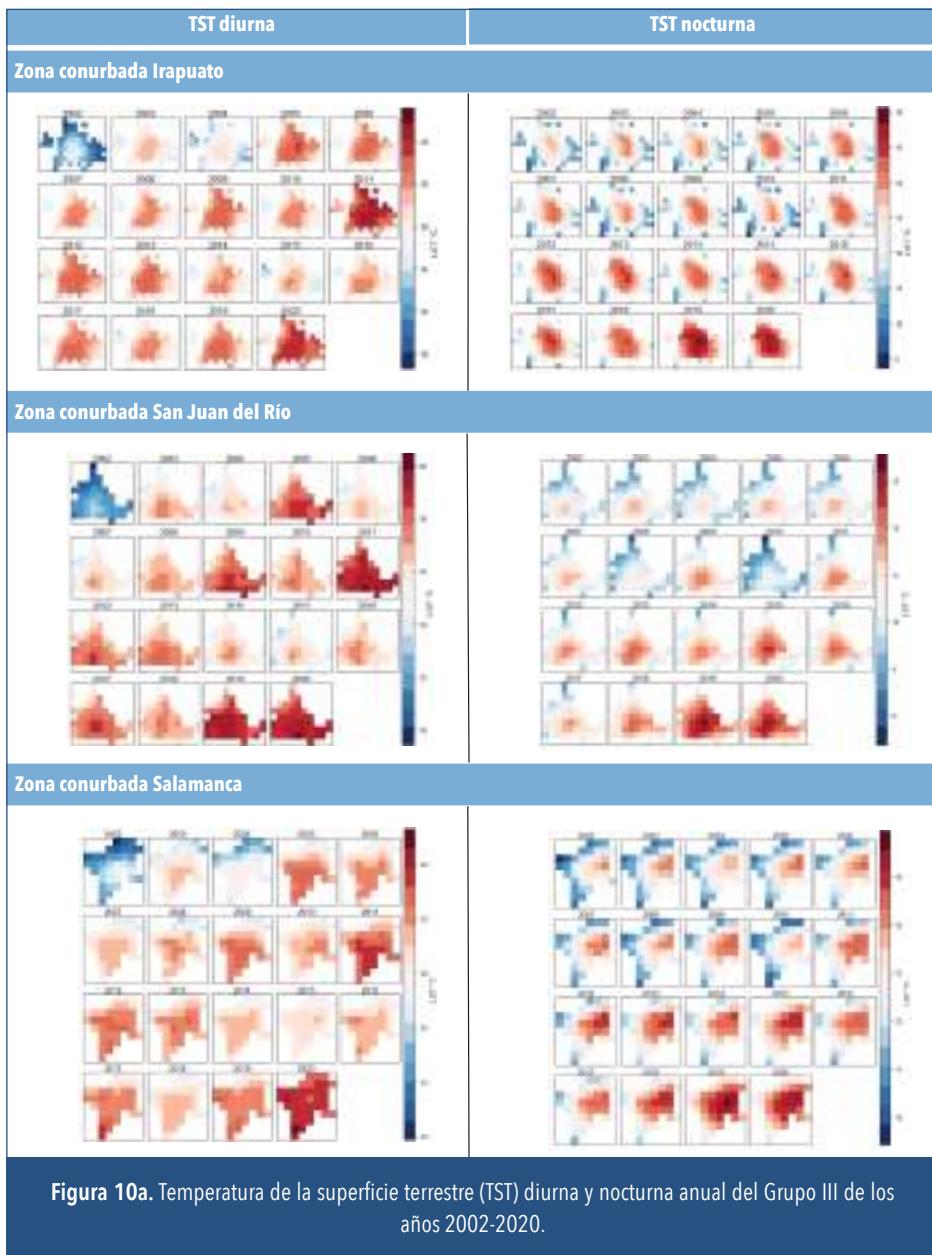
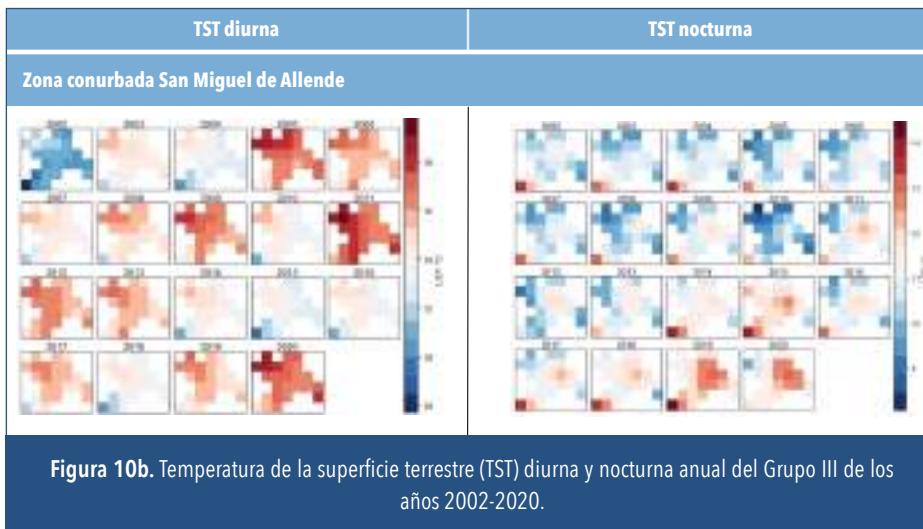


Figura 9. Isla de calor urbano superficial (ICUS) nocturna anual del Grupo II de los años 2002-2020.

Grupo III





Este último grupo es integrado por ciudades conurbadas que tienen una TST similar, especialmente las ciudades de Irapuato, Salamanca y San Juan del Río, ya que la TST diurna promedio de los años 2002 al 2020 para estas ciudades es de 36.9 °C, tanto en Irapuato como en Salamanca, mientras que en San Juan del Río es de 36.5 °C y en San Miguel de Allende de 34.8°C. Durante la noche, Irapuato es mayormente coincidente con Salamanca, ya que sus promedios son de 12.7°C y 12.9°C respectivamente, mientras que en San Juan del Río es de 10.6 °C y en San Miguel de Allende de 10.9 °C.

Para el tercer grupo de ciudades conurbadas, nuevamente en las ICUS diurnas se tiene un comportamiento desigual, ya que en las ciudades de San Juan del Río y San Miguel de Allende varían con 1.58 °C y 2.01 °C, respectivamente, entre la máxima y mínima reportadas a lo largo de 2002 y hasta 2020, mientras que en Irapuato y Salamanca es de 0.86 °C y 0.78 °C. En el caso de los resultados nocturnos, para estas ciudades se tienen únicamente ICUS positivas por encima de 0.8 °C con pendientes crecientes: en San Juan del Río se tiene una pendiente de 0.0358, en San Miguel de Allende de 0.0341, en Salamanca de 0.023 y en Irapuato de 0.0183.

En general, en los tres grupos se observa un incremento de temperatura en las imágenes MODIS nocturnas, ya que durante el día, de acuerdo con

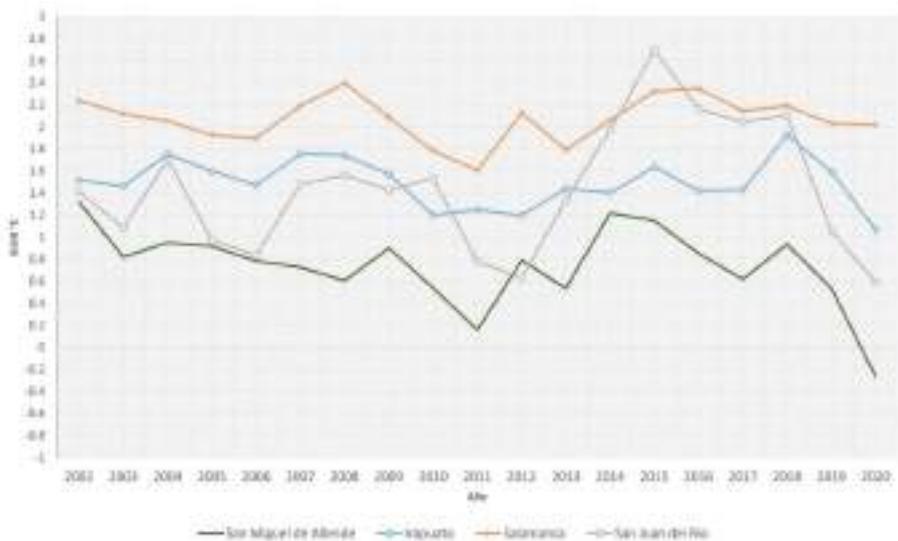


Figura 11. Isla de calor urbano superficial (ICUS) diurna anual del Grupo III de los años 2002-2020.

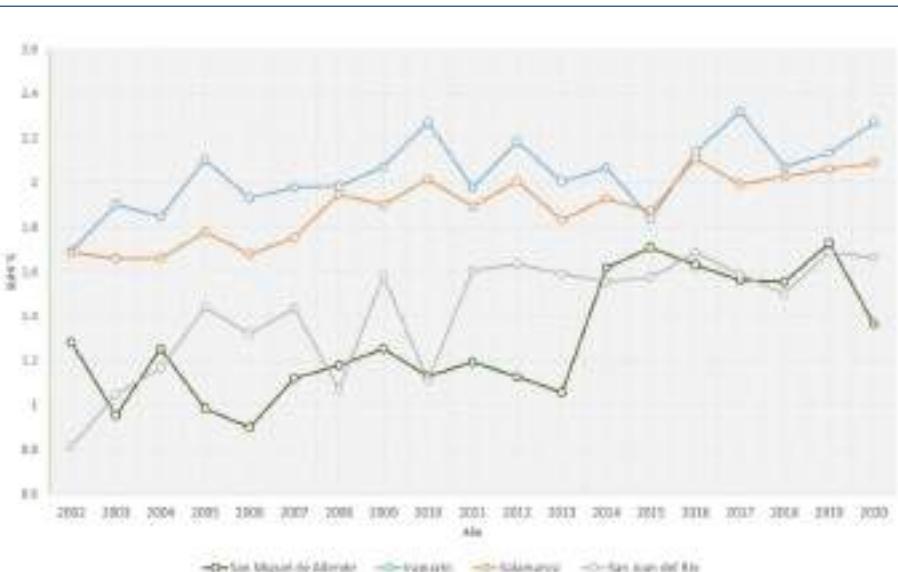


Figura 12. Isla de calor urbano superficial (ICUS) nocturna anual del Grupo III de los años 2002-2020.

ciertas características del clima, los ciclos solares que influyen de manera directa en la temperatura superficial y las actividades humanas pueden no mostrar una continuidad en el incremento de la temperatura de manera constante en las imágenes diurnas.

Visualizando por grupos, en el Grupo I las ciudades de Aguascalientes, León, Querétaro y San Luis Potosí manejan TST muy cercanas entre sí. Lo mismo sucede con la ICUS en los últimos dieciocho años, la cual es creciente, con una pendiente mayor a 0.03 en las cuatro ciudades. Estas ciudades también se caracterizan por tener cuerpos de agua importantes, junto con las ciudades de Guanajuato (Grupo II) y San Miguel de Allende (Grupo III).

Por otra parte, el Grupo II cuenta con mayores diferencias a comparación del Grupo I y III, ya que este está formado por seis ciudades, en donde la ciudad de Rioverde resalta por presentar la mayor TST en todos los años, no obstante lo cual también presenta la menor ICUS de este grupo. Asimismo, cabe destacar que en este grupo se encuentran tres ciudades y zonas con un incremento de temperatura en la ICUS incluso más lento que en las ciudades conurbadas, estas son: Moroleón-Uriangato, Guanajuato y La Piedad-Pénjamo. En cuanto al Grupo III, las ciudades con TST semejante son Irapuato y Salamanca, y San Juan del Río y San Miguel de Allende. Si bien Irapuato y Salamanca presentan una ICUS más alta que San Juan del Río y San Miguel de Allende, también tienen un crecimiento más pausado.

7 DISCUSIÓN

Las coberturas dentro de las áreas metropolitanas muestran variaciones durante el periodo de 2010 a 2020. Esto es coincidente con los puntos críticos en las curvas de población y la creciente economía asociada a la industrialización entre los años 2005 y 2010 (cuando la población creció abruptamente en varias de las ciudades del Bajío), el incremento de áreas construidas y la disminución de zonas de cultivo. Lo que resulta relevante es que en este periodo (2010-2020) los cuerpos de agua aumentaron en un 0.15 % al interior del área urbana, y al exterior en un 0.27 %. En el área externa la variación es menor, pero el incremento de áreas construidas y zonas de cultivo afecta de forma directa a los arbustos y matorrales y al

suelo desnudo, reduciendo su extensión en aproximadamente un 3 %, entre 2010 y 2020.

El Grupo I concentra a las ciudades de León, Querétaro, San Luis y Aguascalientes, que son las más grandes de la región del Bajío y presentan el mayor crecimiento de población. Exceptuando Querétaro, se puede decir que estas ciudades son cercanas entre sí, se ubican dentro de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico y la cordillera centroamericana, llegan a altitudes entre los 1,921 y 2,027 m.s.n.m., y cuentan con aduanas y aeropuertos, lo que impulsa su sector industrial y comercial.

Las coberturas recientes (2020) muestran que dentro de las metrópolis menos del 1.2 % de las superficies son cuerpos de agua, entre el 4.3 % y 10.35 % son áreas asignadas a cultivo y entre el 84.04 % y el 89.25 % corresponden a zonas donde se encuentran asentamientos urbanos, vialidades y construcciones para otros usos urbanos. En las áreas circundantes a las ciudades el panorama es diferente, ya que las coberturas urbanas no superan el 10 % del área total y las áreas de cultivo abarcan entre un 24.93 % y un 50.27 %, teniendo afectación sobre la temperatura en el área de buffer.

Los puntos donde se concentra una mayor ICUS corresponden a áreas industriales, como es el caso de Aguascalientes y Querétaro, principalmente, además de San Luis Potosí, que han tenido un importante crecimiento en este sector en los últimos años como consecuencia de población y cambio de coberturas. Por esta razón, la pendiente de la ICUS es mayor en estas ciudades; en cambio, la ciudad de León, si bien ha tenido un crecimiento relevante en el sector industrial, tiene un crecimiento más lento en la pendiente de la ICUS gracias a los cuerpos de agua que se encuentran dentro y fuera de la ciudad (como es el caso de la presa El Papalote y la presa Blanca), y a los espacios verdes que contiene, que ayudan a disminuir el efecto de la ICUS.

El segundo grupo se relaciona con las ciudades y zonas de Celaya, La Piedad-Pénjamo, San Francisco del Rincón, Guanajuato, Río Verde y Morelón-Uriangato. La mayoría se concentra en la provincia del Eje Neovolcánico, cuya altura oscila entre 1,796 y 1,862 m.s.n.m., pero destacan la ciudad de Guanajuato, por encontrarse en la cordillera centroamericana a 2,028 m.s.n.m., y Rioverde, en la Sierra Madre Oriental, a tan solo 990 m.s.n.m. Esto hace que los ambientes sean particulares para estos casos.

Casi todas las ciudades de este grupo se concentran en la porción suroeste del corredor industrial del Bajío, exceptuando la ciudad de Rioverde, ubicada en la porción noreste del área de estudio.

Por el análisis de coberturas, se sabe que entre 41.83 % y hasta un 83.53 % del área total de la ciudad corresponde a áreas urbanas, donde destacan las ciudades de Guanajuato y la zona de la Piedad-Pénjamo debido a su acelerado crecimiento en los últimos veinte años; no obstante, las ICUS nocturna en ambas ciudades son las que tienen menor cambio, lo que puede deberse principalmente a su entorno del área de referencia, que es semi-cálido. En cuanto a cuerpos de agua, la mayoría presenta cuerpos de agua nulos o, como el caso de Guanajuato, por debajo del 0.3 %. A diferencia del primer grupo, abundan las coberturas asignadas a cultivo, variando desde un 3.7 % y hasta el 55.4%, siendo la ciudad de Rioverde la que muestra mayor cobertura de cultivo.

La mayoría de las ciudades muestran un incremento en la TST diurna y nocturna a partir del año 2011, ya que de 2002 a 2010 no se observa que este incremento sea constante. Sin embargo, llama la atención Rioverde, que es la ciudad con menor cambio de TST en el día; y durante la noche el aumento de temperatura se observa a partir del año 2015. Rioverde es la ciudad con mayor porcentaje, al 2020, de cobertura de Vegetación acumulada/Humedal, con 1.01 % en esta categoría al interior del área urbana, lo cual puede ser un factor de enfriamiento, lo que produce que la ICUS sea negativa.

Para el tercer grupo se encuentran las conurbaciones de San Miguel de Allende, Salamanca y Irapuato, del estado de Guanajuato, y de San Juan del Río, en el estado de Querétaro. Todas comparten su asentamiento sobre el Eje Neovolcánico, menos San Miguel de Allende, que se ubica sobre la meseta central, variando en alturas desde 1,743 hasta 2,041 m.s.n.m. Son poblaciones mucho más pequeñas que los grupos anteriores, pero que sin duda han mostrado un alto crecimiento poblacional y económico.

Las coberturas referentes a cultivo se han reducido en las últimas dos décadas, variando actualmente entre el 8.59 y el 13.85 % dentro del límite urbano que corresponde a estas ciudades. En contraste, y como se esperaba, la mayor parte de la cobertura corresponde a la urbana, con desde un 77.08 hasta un 89.57 %. Los cuerpos de agua dentro de la urbe están solo

en San Miguel de Allende, aunque en sí la mayoría presenta cuerpos de agua en el área externa del límite de las ciudades. Dentro de este grupo, San Miguel de Allende muestra un cambio notable en la ICUS durante los años 2013 y 2014, modificando por completo la tendencia de la curva de temperatura.

A grandes rasgos, en todas las ciudades, a excepción de Salamanca y Rioverde, en el año 2011 se tuvo un registro de la TST promedio más alta. Ese año fue muy notorio a nivel nacional por la temporada de sequía, ya que más del 90 % de la superficie del país fue afectada por este fenómeno, lo que produjo pérdidas económicas superiores a los 15 mil millones de pesos, principalmente por la afectación de 1.8 millones de hectáreas cultivables y por la muerte de 50 mil cabezas de ganado. La escasez de agua afectó aproximadamente a 2 millones de habitantes de más de 2350 comunidades (SEMARNAT & INECC, 2012). En la Piedad-Pénjamo esto ocurrió no solo en el 2011, sino que además en el año 2020 se presentó este mismo caso. La ciudad de Rioverde mostró su mayor TST promedio en el año 2019, mientras que en Salamanca se identificó en el 2020. En general, la tendencia en todas las ciudades se muestra con una pendiente positiva, que enfatiza el aumento de la temperatura conforme se incrementa la población y aumenta el área urbana.

8 CONCLUSIONES

A lo largo de este estudio se analizaron los cambios espaciotemporales del Bajío, su crecimiento poblacional, cambios de coberturas terrestres y de la TST tanto diurna como nocturna, así como la estimación de las ICUS. Con los resultados obtenidos puede verse que la TST depende inicialmente de la fisiografía y la altitud de las ciudades, ya que a mayor altitud hay temperaturas más bajas, y viceversa. Otro punto importante es cómo se va modificando conforme al crecimiento poblacional y a los cambios de coberturas, así como por otros factores que pueden influir en años específicos (por ejemplo, por las sequías), como puede apreciarse en el año 2011, en donde hubo un aumento de temperatura extraordinario que cruzó el país y, como consecuencia, se presentó una TST diurna máxima en todas las ciudades del Bajío.

Comparando los resultados de la TST diurna con respecto a la nocturna, en la diurna en los últimos veinte años se ha visto una dinámica cíclica en donde la temperatura en las ciudades pertenecientes al corredor industrial del Bajío inicia con un rango moderado que pasa a otro más intenso en periodos de dos a tres años; en cambio, en la nocturna se presenta un incremento constante de TST que va aumentando año con año, esencialmente desde el centro de la ciudad o desde la parte mayormente urbanizada o con zonas industriales. Esto mismo sucede con la ICUS diurna y nocturna, en donde la ICUS diurna para las ciudades del Bajío no lleva una tendencia constante. Además, es interesante observar cómo actúa la ICUS frente a un evento inusual, como la sequía del año 2011, donde al aumentar las temperaturas tanto al interior de las áreas urbanas como en el área de referencia (buffer de 10 km) la ICUS disminuyó considerablemente. Caso distinto es el de la ICUS nocturna, que al igual que la TST nocturna tiene un crecimiento constante que se denota en la pendiente formada por los registros de los años 2002 al 2020. De esta manera, por el comportamiento resultante tanto en la TST nocturna como en la ICUS nocturna, se puede considerar que estos datos son adecuados para la realización de predicciones futuras para el comportamiento de la TST o ICUS gracias a que siguen una tendencia lineal que se puede complementar con las referencias de coberturas terrestres y el crecimiento poblacional.

En cuanto a las coberturas terrestres, los cuerpos de agua en muchos de los casos sirven como disipadores de calor durante el día, ya que en la noche desprenden ese calor acumulado. Por otro lado, la diversidad de cultivos también permite acumulación de energía en ciertos puntos, por lo que una prospección más detallada de los tipos de cultivo que se siembran en las zonas mejoraría el análisis de las islas de calor superficial para determinar cuáles generan mayor concentración de energía y cuáles la disipan. La presencia de áreas verdes dentro de las ciudades, así como en los casos en que no son ciudades conglomeradas, permiten que la ICUS sea mucho menor en comparación de las ciudades más consolidadas; en contraste, las ICUS se intensifican con la presencia de zonas industriales, como es el caso del Grupo I, en donde es notoria la alta temperatura con relación al área circundante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos sus comentarios y sugerencias. Sandra Lizbeth Medina Fernández agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (antes CONACYT) el apoyo otorgado a través de la Beca para Estudios de Maestría, con clave de solicitud 2019-000037-02NACF y CVU: 975692. Así también, por sus revisiones y valiosos comentarios, los autores agradecen a la Ing. Claudia Roxana Medina Fernández.

REFERENCIAS

- Arathyram, R. S. & Venugopala Rao, K. (2012). Characterisation of Urban Heat Islands in one of the most urbanised corridors of India from space based multi-sensor, spatio-temporal data. *AGSE 2012-FOSS4G-SEA*.
- Ballinas, M. & Barradas, V. L. (2016). The urban tree as a tool to mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: a simple phenomenological model. *Journal of environmental quality*, 45(1), 157-166.
- Becker, F. & Li, Z. L. (1990). Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11(3), 369-393.
- Busetto, L. & Ranghetti, L. (2016). MODIS^{tsp}: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences*, 97, 40-48.
- Chakraborty, T. & Lee, X. (2019). A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 269-280.
- Charabi, Y. & Bakhit, A. (2011). Assessment of the canopy urban heat island of a coastal arid tropical city: The case of Muscat, Oman. *Atmospheric Research* 101(1-2), 215-227.
- Clinton, N. & Gong, P. (2013). MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations and controls. *Remote Sensing of Environment*, 134, 294-304.
- Dousset, B. & Gourmelon, F. (2003). Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(1-2), 43-54.

- Esperón-Rodríguez, M., Bonifacio-Bautista, M. & Barradas, V. L. (2016). Socio-economic vulnerability to climate change in the central mountainous region of eastern Mexico. *Ambio*, 45(2), 146-160.
- Ferwati, S., Skelhorn, C., Shandas, V., Voelkel, J., Shawish, A. & Ghanim, M. (2018). Analysis of urban heat in a corridor environment – The case of Doha, Qatar. *Urban Climate*, 24, 692-702.
- Fuentes Pérez, C. A. (2014). Islas de Calor Urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia*, 7(13), 495-515.
- GlobeLand30 (2019). Product introduction. Globallandcover.
- Grimm, N. B., Grove, J. G., Pickett, S. T. & Redman, C. L. (2000). Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems: Urban ecological systems present multiple challenges to ecologists—pervasive human impact and extreme heterogeneity of cities, and the need to integrate social and ecological approaches, concepts, and theory. *BioScience*, 50(7), 571-584.
- Grübler, A. (1994). Technology. En W. B. Meyer & B. L. Turner II (eds.), *Changes in land use and land cover: A global perspective*. Cambridge University Press, pp. 287-328.
- Hu, L., Brunsell, N. A., Monaghan, A. J., Barlage, M. & Wilhelmi, O. V. (2014). How can we use MODIS land surface temperature to validate long-term urban model simulations? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6), 3185-3201.
- Imhoff, M. L., Tucker, C. J., Lawrence, W. T. & Stutzer, D. C. (2000). The use of multi-source satellite and geospatial data to study the effect of urbanization on primary productivity in the United States. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(6), 2549-2556.
- INEGI (2001). Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional Serie I. Provincias fisiográficas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2017). Marco Geoestadístico, junio 2017. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2019). Sistema Automatizado de Información Censal (SAIC). Censos Económicos 2019. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2020). Censo 2020 de Población y Vivienda. Principales resultados por localidad (ITER). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jain, S., Roy, S. B., Panda, J., & Rath, S. S. (2021). Modeling of land-use and land-cover change impact on summertime near-surface temperature variability over the Delhi–Mumbai Industrial Corridor. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1309-1319.

- Jauregui, E. (1986). The urban climate of Mexico City. En Oke, T. R. (ed.), *Urban Climatology and its Application with Special Regard to Tropical Areas. Proceedings of the technical conference organized by the World Meteorological Organization and co-sponsored by the World Health Organization*. World Meteorological Organization, pp. 63-86.
- Jauregui, E. (1993). Mexico City's Urban Heat Island Revisited (Die Wärmeinsel von Mexico City—ein Rückblick). *Erdkunde*, 47(3), 185-195.
- Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821-3831.
- Jáuregui Ostos, E. (2000). *El clima de la Ciudad de México I.4.1*. Instituto de Geografía, UNAM /Plaza y Valdés.
- Kok, P., O'Donovan, M., Bouare, O. & Van Zyl, J. (2003). *Post Apartheid Patterns of Internal Migration in South Africa*. HSRC Publishers, pp 33.
- Lemoine-Rodríguez, R. & Mas, J. -F. (2020). *LSTtools: An R package to process thermal data derived from Landsat and MODIS images. (Version v0.0.2)*. Zenodo.
- McCarthy, M. P., Best, M. J. & Betts, R. A. (2010). Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, 37(9).
- Nichol, J. E., Fung, W. Y., Lam, K. & Wong, M. S. (2009). Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and 'in situ' air temperature. *Atmospheric Research*, 94(2), 276-284.
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769-779.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basic of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Breon, F.-M., Nan, H., Zhou, L. & Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global big cities. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 696-703.
- Pérez Arrau, C. & Peña, M. A. (2016). Urban Heat Islands (UHIs).
- Pérez Hernández, M. d. P. M. (2015). Ambientes innovadores en México: el caso del Corredor Industrial El Bajío. *Revista de Geografía Norte Grande* (62), 203-221.
- Ramos-Vázquez, A. & Barradas, V. L. (1998). The effect of microenvironment in stomatal conductivity of *Buddleia cordata* H. B. K., in the Reserva del Pedregal de San Angel. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62, 63-71.
- Romero Dávila, S., Morales Méndez, C. C. & Némiga, X. A. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de climatología*, 11, 1-10.

- SEGOB & SEDATU (2018). *Sistema Urbano Nacional 2018*. Secretaría de Gobernación / Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.
- SEMARNAT & INECC (2012). *México. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- Soto Diaz, A. B. & Pérez Ruiz, E. R. (2015). *Uso de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica para la determinación de Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Souch, C. & Grimmond, C. S. B. (2006). Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, 30(2), 270-279.
- Wan, Z. (2013). *Collection-6. MODIS land surface temperature products. Users' Guide*. ERI, University of California.
- Zhang, H., Qi, Z. F., Ye, X. Y., Cai, Y. B., Ma, W. C. & Chen, M. N. (2013). Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. *Applied Geography*, 44, 121-133.
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z. & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 48.

Isla de calor en ciudades de Chile: una revisión. Intensidad, variabilidad, impactos y medidas de mitigación

Massimo Palme¹, Claudio Carrasco²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Arquitectura, Valparaíso, Chile, y Universidad Católica del Norte, Programa de Doctorado en Ingeniería Sustentable, Antofagasta, Chile. ORCID: 0000-0003-1166-2926. massimo.palme@usm.cl, mpalme@ucn.cl

² Universidad de Valparaíso, Escuela de Construcción Civil, Facultad de Ingeniería, y Center for Climate Action, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. ORCID: 0000-0003-3259-1493, claudio.carrasco@uv.cl

RESUMEN

La isla de calor urbano (ICU) es un fenómeno identificado desde principios del siglo XIX como característico de todas las ciudades. En los tiempos más recientes, cómplice del aumento de la temperatura de la atmósfera, la intensidad de la isla de calor se ha vuelto un tema de preocupación para muchos países del mundo. A pesar de la vasta literatura internacional generada desde fines del siglo pasado, en América Latina los estudios son todavía escasos. Este capítulo presentará una breve revisión de los avances que ha tenido en Chile el estudio del clima urbano y en particular de la isla de calor, focalizándose en las metodologías utilizadas, los resultados obtenidos en cuanto a intensidad y variabilidad espacial y temporal de las islas de calor en diferentes ciudades del país, y las propuestas más comunes de estrategias de mitigación y adaptación.

Palabras clave: clima urbano, mitigación, adaptación, isla de calor urbano, Chile.

ABSTRACT

Urban heat island (UHI) is a phenomenon identified since the beginning of the XIX Century as characteristic of cities across the world. In recent years, because of the increase in the atmosphere temperature, Urban Heat Island intensity has been considered as an urgent issue to be solved in many countries. Despite of the international scientific literature generated since the end of the last Century, in Latin America the studies on this subject are still a few. This chapter presents a brief review of the advances in the urban climate and urban heat island studies conducted in Chile, focusing on: the methodologies used, the results obtained in terms of UHI intensity and variability (both in space and time) for different cities of the country, and the most common mitigation and adaptation strategies proposed.

Key words: urban climate, mitigation, adaptation, urban heat island, Chile.

1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno isla de calor urbano (ICU) ha sido reconocido como uno de los aspectos del cambio global más importantes y detectables. La primera referencia a este fenómeno se debe a Luke Howard (1833), quien ya a principios del siglo XIX observó la existencia de un clima específico en la ciudad de Londres. No es casual que la revolución industrial alimentara unos cambios en la estructura territorial que desde entonces no se han detenido: las políticas de desarrollo humano, consensuadas internacionalmente, favorecen un aumento de la urbanización de los territorios y de los consumos de energía, lo que conlleva impactos sobre el clima y microclima urbano.

Desde la formulación sistemática de las interacciones energéticas que tienen lugar en la superficie terrestre (Oke, 1978), la formación de las islas de calor ha sido largamente estudiada alrededor del mundo (Oke, 1982; Santamouris, 2014) en cuanto corresponde a sus causas, morfologías, dependencias climáticas e impactos. A partir del balance energético de la superficie (Hartmann, 1994), se puede afirmar que las ciudades

manifiestan una reducción en la transferencia de calor por evaporación y transpiración, un aumento de la absorción de radiación solar y acumulación de calor en los materiales, y una reducción de la emisión de radiación de onda larga debido a la presencia de obstáculos. A esto se debe sumar la producción de calor directamente en los cañones urbanos por parte de los edificios, los vehículos y de las otras actividades llevadas a cabo por las personas.

Dejando fuera el emplazamiento macroclimático de las ciudades, podemos clasificar el acontecimiento climático urbano como el resultado de la combinación de cuatro variables que lo definen: morfología urbana, materiales de edificación, materiales naturales y actividad humana. Estos presentan una serie de combinaciones que producen las variaciones de desempeño climático en la ciudad. Cuando la morfología del cañón urbano presenta una disminución importante de la porción de cielo visible o si está menos expuesto que el resto de la ciudad, se presenta menos ventilación interior, menor radiación directa recibida y finalmente menor variación de temperatura diaria. Sin embargo, estos son también los lugares que en general pueden presentar las mayores temperaturas del aire en periodo nocturno (Carrasco, 2010). Sobre el segundo elemento, los espacios con mayor presencia de materiales de edificación (minerales) presentan mayores niveles de absorción de radiación y por tanto acumulan mayor cantidad de calor durante el día; luego, al no recibir radiación solar directa, comienzan el proceso de enfriamiento, provocando el calentamiento del aire de la ciudad. Sobre el tercer elemento, su presencia permite mayores niveles de humedad en el aire y mayores niveles de reflectancia de radiación solar, disminuyendo el almacenamiento debido a que estos materiales naturales (vegetación y agua) presentan condiciones de albedo, almacenamiento y emisividad distintos a los de los materiales con los que se construye la ciudad. Respecto del cuarto elemento, la actividad humana que ocurre en la ciudad, ya sea de manera estacionaria al interior de los edificios o de movilidad, al exterior en las calles, presenta radiación importante de calor debido a la manera en que mecánicamente funcionan los aparatos que se utilizan para todas las actividades al interior de los edificios (iluminación, computadores, maquinarias en general), así como los vehículos que se usan para moverse.

Finalmente, la combinación de estos cuatro elementos va definiendo una dinámica propia de cada ciudad, que en mayor o menor medida genera energía calórica con la actividad antrópica y acumula calor durante el día en sus materiales y luego, al atardecer, lo libera, y que, dependiendo de su morfología, se disipa más o menos lentamente hacia la capa de aire sobre la ciudad, pero siempre generando un aire más caliente a partir del fenómeno urbano.

Una revisión muy completa del fenómeno alrededor del mundo ha individuado en el rango 1-6 °C el aumento de temperatura provocado por la presencia de los entornos urbanos (Santamouris, 2020). A la isla de calor propiamente dicha se deben sumar otras definiciones relacionadas, como la isla de calor superficial, la isla de calor subsuperficial y la isla de calor de la capa límite (Oke et al., 2017). De entre estas, la isla de calor superficial cobra gran importancia porque las tecnologías de teledetección remota han permitido la recolección de una gran cantidad de datos espacialmente determinados. La isla de calor superficial y la isla de calor a nivel de cañón urbano se relacionan de manera variable entre ciudad y ciudad, pero casi siempre se puede determinar una relación directa de la isla de calor con las temperaturas superficiales.

En América Latina, los estudios pioneros de clima urbano de Jauregui (1973) han dado paso a un desarrollo de estudios geográficos y climatológicos distribuidos de forma asimétrica entre países y regiones. Muchos estudios se han llevado a cabo en Brasil (Marques et al., 2009; De Costa Trindade Amorim, 2017; De Lucena et al., 2013) y México (Jauregui, 2004, 2005), algunos en Argentina y Chile (Figueroa & Mazzeo, 1998) y unos pocos en los demás países del área (Ángel et al., 2010; Litardo et al., 2020). La presencia de islas de calor, en todo caso, ha sido detectada para muchas ciudades de diferentes tamaños (Palme, 2021).

En Chile, las contribuciones más significativas han sido generadas por Romero (2019, 2020) y Sarricolea (2013, 2019) desde la perspectiva principal de los estudios geográficos. En tiempos recientes, también se han implementado estudios aplicados desde las áreas de la planificación y la física de los edificios (Palme et al., 2017, 2018b; Salvati et al., 2020).

La interacción entre la morfología urbana, el funcionamiento de los edificios y el clima resultante es de vital importancia y necesita ser investigada

en detalle. Esto debiera permitir un planteamiento más racional de las estrategias de mitigación más apropiadas según la localización específica de cada ciudad, incluyendo su emplazamiento macroclimático.

Entre las principales consecuencias de la presencia de islas de calor, se encuentran: una reducida confortabilidad de los espacios exteriores en temporadas cálidas, un aumento de los consumos energéticos para el acondicionamiento de los edificios, una posible interacción positiva con el calentamiento global, y un aumento de la mortalidad y de la morbilidad durante episodios de olas de calor (Santamouris y Kolokotsa, 2016; Inostroza et al., 2016).

Además, en los últimos tiempos se ha detectado una homogenización general de las formas urbanas alrededor del planeta (Lemoine-Rodríguez et al., 2020). Esto hace pensar en un futuro con islas de calor difusas, en un mundo largamente urbanizado. La integración de elementos naturales en las ciudades aparece al mismo tiempo como una gran oportunidad (Banzhaf et al., 2019; Privitera et al., 2021) y como un peligro debido a la puesta en contacto de especies selváticas con el ser humano, cosa que podría tener cierta influencia en la frecuencia de sucesos tipo *spill-over*, como lamentablemente ha demostrado la pandemia de covid-19.

2 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

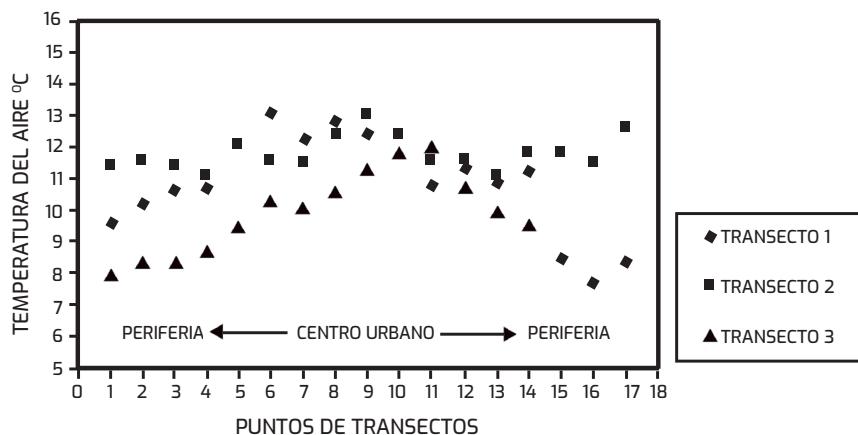
Existen diferentes métodos para investigar las islas de calor. El más tradicional utiliza mediciones de la temperatura del aire a la altura de aproximadamente 1.5-2 m, obteniendo la intensidad de la isla de calor como diferencia de temperaturas entre las zonas monitoreadas y los datos obtenidos en una estación meteorológica rural. Sin embargo, la relación existente entre las islas de calor de superficie y de nivel de calle hace que la detección remota sea una metodología siempre más difusa. Además, en los últimos años han sido desarrollados y validados modelos de simulación predictiva. En Chile, se han realizado estudios que utilizan todas estas diferentes metodologías.

2.1 Estudios de monitorización móvil

Una primera estrategia, utilizada por ejemplo por Carrasco y colaboradores (2010, 2016, 2018, 2020), consiste en la identificación de recorridos representativos de la diferencia morfológica existente en la ciudad, para luego proceder a una toma de mediciones a lo largo del recorrido en un tiempo relativamente corto (aproximadamente una hora). Los recorridos comienzan fuera de la zona urbana, recorren la ciudad pasando por el centro urbano y luego salen de la zona urbana. De esa forma se puede relacionar la temperatura del aire con el contexto urbano en un momento determinado. En este caso, los recorridos realizados son en tres momentos del día: en la mañana a las 10:30 h, en la tarde a las 14 h y al anochecer a las 20 h. Este último recorrido permite constatar los resultados de la acumulación de calor en la zona céntrica de la ciudad, que genera una temperatura del aire mayor que en la periferia urbana. El centro urbano se presenta con cañones más esbeltos y menor visibilidad de cielo que la periferia; presenta un porcentaje mucho mayor de materiales minerales y no de naturales, a diferencia de la periferia, y corresponde a la zona donde la actividad antrópica al interior de las edificaciones y el tráfico son mucho mayores que en la periferia. Como consecuencia, el fenómeno de isla de calor se aprecia marcadamente en el anochecer.



TEMPERATURA DEL AIRE 20:00 H. INVIERNO 2007



TEMPERATURA DEL AIRE 20:00 H. INVIERNO 2016

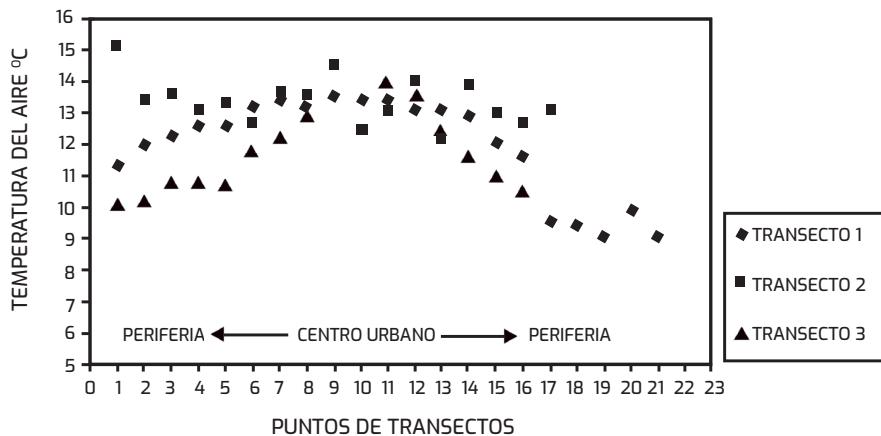
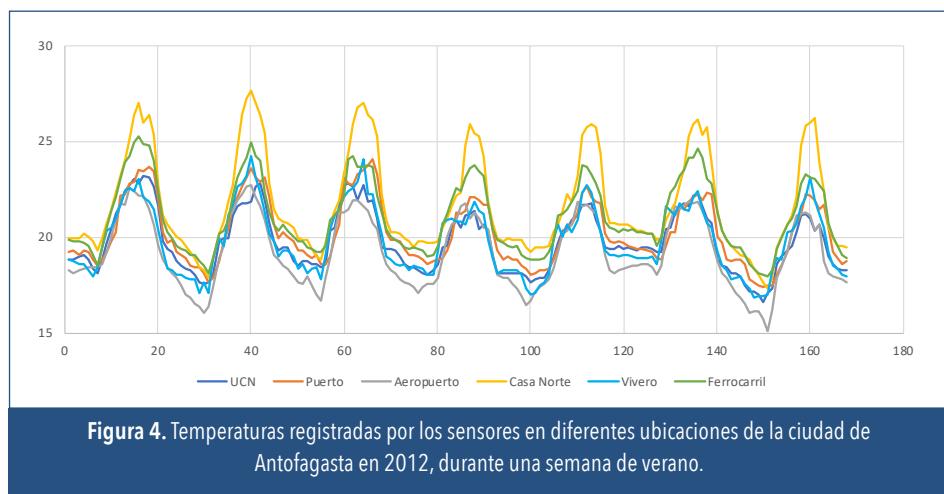


Figura 2. Registro de temperaturas del aire a las 20 h. Se distingue el sector centro urbano del sector periférico.

Los valores registrados a las 20 h en 2007 y 2016 se presentan en la Figura 2. Es posible apreciar las diferencias de temperatura entre los registros en el centro de la ciudad y la zona periférica. Para el año 2007 la diferencia de temperatura del aire entre la periferia y el centro urbano fue de 4,6 °C y para el año 2016, de 5,4 °C.

2.2 Estudios de monitorización fija

Otra estrategia es la colocación de instrumentos de recolección de datos en lugares previamente seleccionados, durante largos períodos. En este caso, se obtiene una información espacial limitada por el número de sensores colocados, pero con una temporalidad continua. Con tal estrategia han sido obtenidos datos para las ciudades de Antofagasta, Calama, Temuco y Santiago (Henriquez, Proyecto Fondecyt 1100657). Otros estudios haciendo uso de sensores están todavía en curso (Palme, Proyecto Fondecyt 1200275) en Antofagasta, Valparaíso, La Serena, Concepción, Rancagua y Temuco.



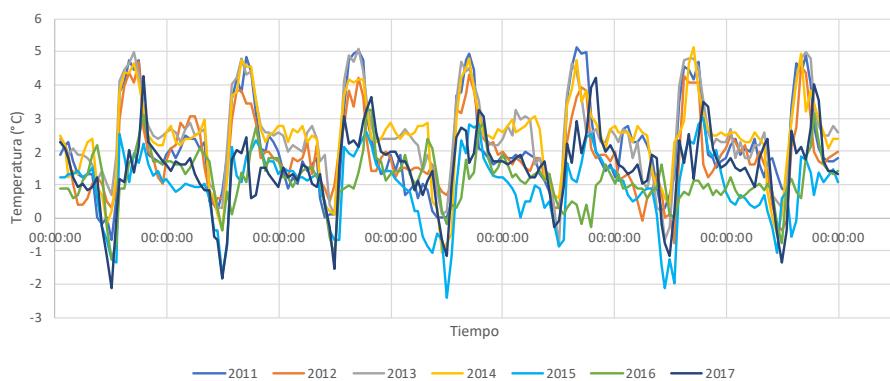


Figura 5. Variación de la intensidad de la isla de calor en el sector norte de Antofagasta durante una semana promedio de otoño, periodo 2011-2017.

2.3 Estudios de temperatura superficial

Las tecnologías de teledetección permiten obtener, para un instante determinado, la distribución espacial de las temperaturas de superficie de una ciudad. En este caso, la información es muy valiosa porque permite identificar la presencia de puntos muy cálidos o fríos en la urbanización; sin embargo, existen dos problemas relacionados. El primero es la disponibilidad de datos, según el tipo de satélite considerado, y su respectiva resolución espacial. El segundo problema, más profundo, consiste en la bidimensionalidad de la información, que a veces dificulta la interpretación de la relación entre el fenómeno de superficie y el fenómeno del cañón.

A través de teledetección se han clasificado para el caso de La Serena y Coquimbo y de Antofagasta zonas cálidas y frías, individuando la influencia de factores morfológicos tanto ambientales como urbanos sobre el fenómeno (Rivera & Palme, 2021). En Antofagasta, ciudad construida en una fuerte pendiente, se determina un efecto de la ventilación que crece con la exposición, siendo el efecto pendiente más agudo de la cercanía a la costa. La morfología urbana, en particular la altura de los edificios, determina por efecto de las sombras algunos focos fríos en el interior

de la trama urbana. En La Serena y Coquimbo, conjunto urbano muy disperso que se sitúa en diferentes niveles con pendientes generalmente poco pronunciadas (con la excepción del cerro de Coquimbo), la cercanía con la costa tiene más importancia. Las áreas verdes determinan la ubicación de focos fríos en la zona más interior. La influencia de la morfología urbana se nota poco en este caso, principalmente debido a la dispersión de la ciudad y al hecho de que los edificios más altos se ubican frente al océano.

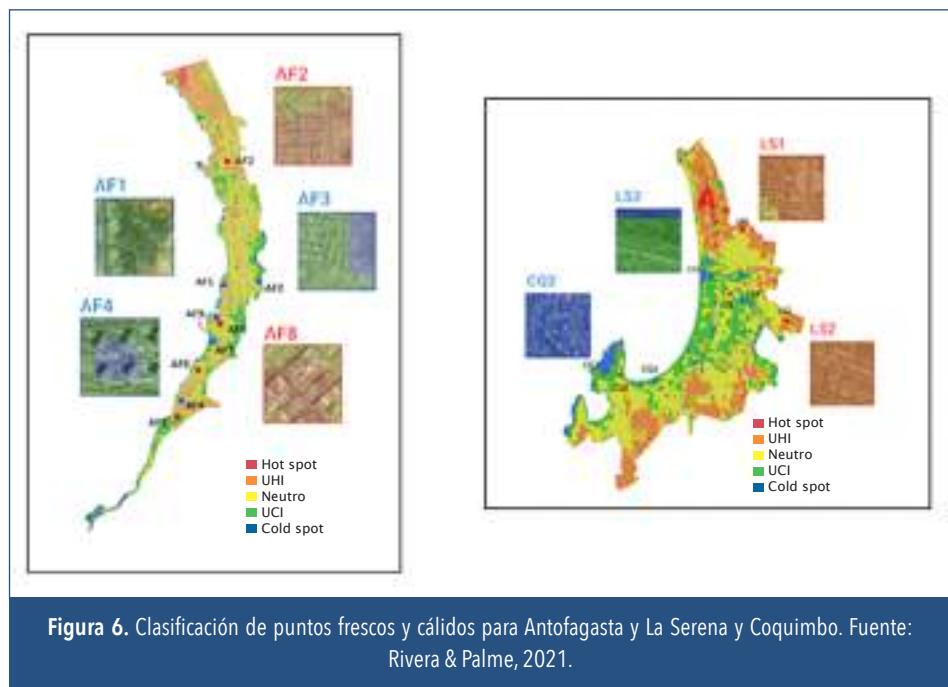


Figura 6. Clasificación de puntos frescos y cálidos para Antofagasta y La Serena y Coquimbo. Fuente: Rivera & Palme, 2021.

2.4 Estudios de simulación

Finalmente, a partir de modelos energéticos se han realizados estudios de simulación con diferentes tipos de herramientas informáticas desarrolladas para tal efecto. Destacan Envimet y Urban Weather Generator, herramientas que acoplan simuladores atmosféricos con simuladores del funcionamiento de edificios para la obtención de datos climáticos modifi-

cados, con diferente resolución espacial y temporal. Envimet ha sido utilizado para determinar la distribución espacial de temperaturas para el caso de Valparaíso bajo escenarios de mitigación con techos verdes o techos fríos, demostrando la poca influencia de la vegetación en el techo para la mitigación de la isla de calor a nivel de calle cuando las edificaciones presentan una altura mayor al ancho del cañón. Sin embargo, para alturas menores al ancho del calor se puede apreciar un impacto en su disminución (Valenzuela, 2021). Urban Weather Generator ha sido utilizado para relacionar la morfología urbana con la intensidad de la isla de calor resultante (Palme et al., 2017, 2018b, 2019; Salvati et al., 2020). Con estudios de simulación se han determinado también los impactos del fenómeno en los consumos energéticos de los edificios.

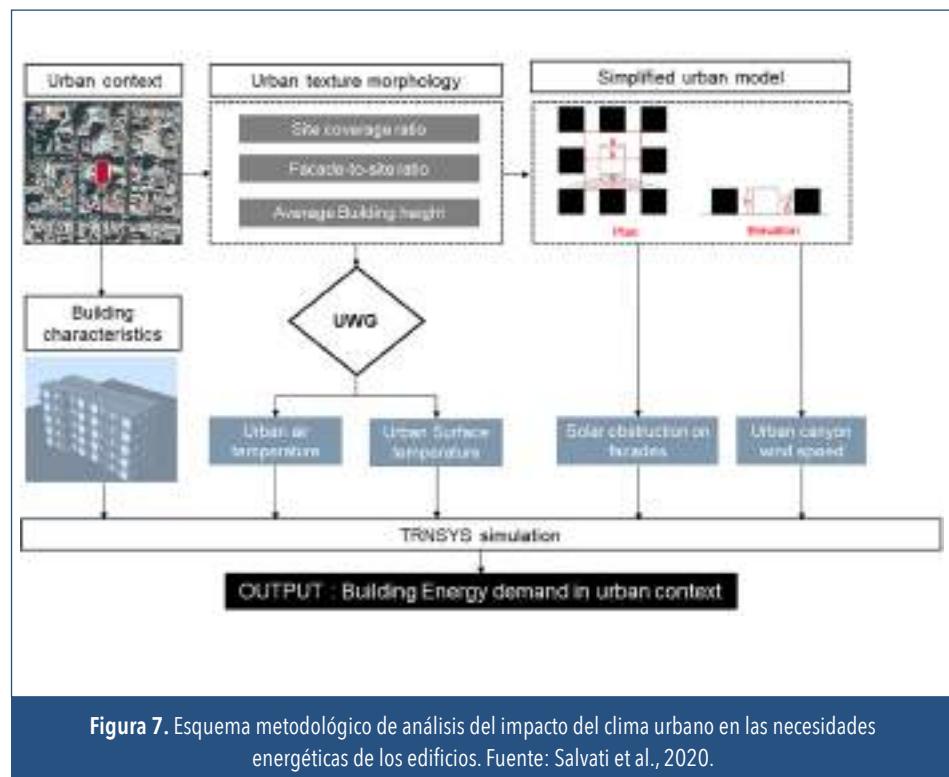


Figura 7. Esquema metodológico de análisis del impacto del clima urbano en las necesidades energéticas de los edificios. Fuente: Salvati et al., 2020.

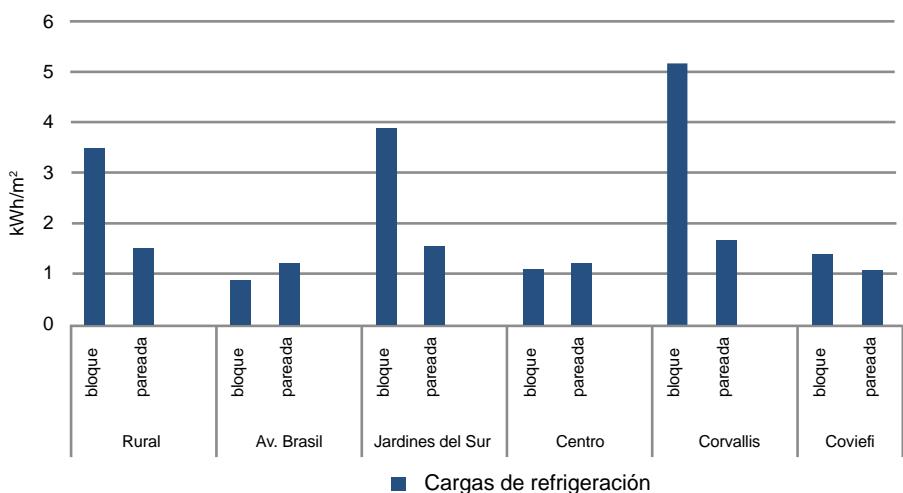


Figura 8. Necesidades de refrigeración para dos tipologías de edificios residenciales en diferentes sectores de la ciudad de Antofagasta.

3 VARIABILIDAD ESPACIOTEMPORAL DE LAS ISLAS DE CALOR EN CHILE

Datos obtenidos por Henríquez y Romero identifican islas de calor en todas las ciudades de Chile analizadas. Estudios de Carrasco en Valparaíso (2017) muestran un incremento temporal de mínimo 0.5 °C para invierno en el periodo 2007-2016. Estudios de Palme et al. (2018a) han puesto en evidencia la presencia de cierta agudización de las diferencias de temperaturas entre los puntos frescos y los puntos cálidos de la ciudad de Antofagasta. Estudios realizados para la ciudad de Rancagua evidencian un efecto similar. En el conjunto urbano de Concepción-Talcahuano, a pesar de las restricciones de movilidad introducidas a raíz de la pandemia de covid-19, entre 2017 y 2020 se puede observar un aumento de intensidad y una expansión notable de las islas de calor (Figura 9). Datos obtenidos para el caso de Temuco, Rancagua y el Gran Valparaíso en el período 2017-2020 indican también cierto grado de expansión de los sectores más cálidos de esas ciudades.

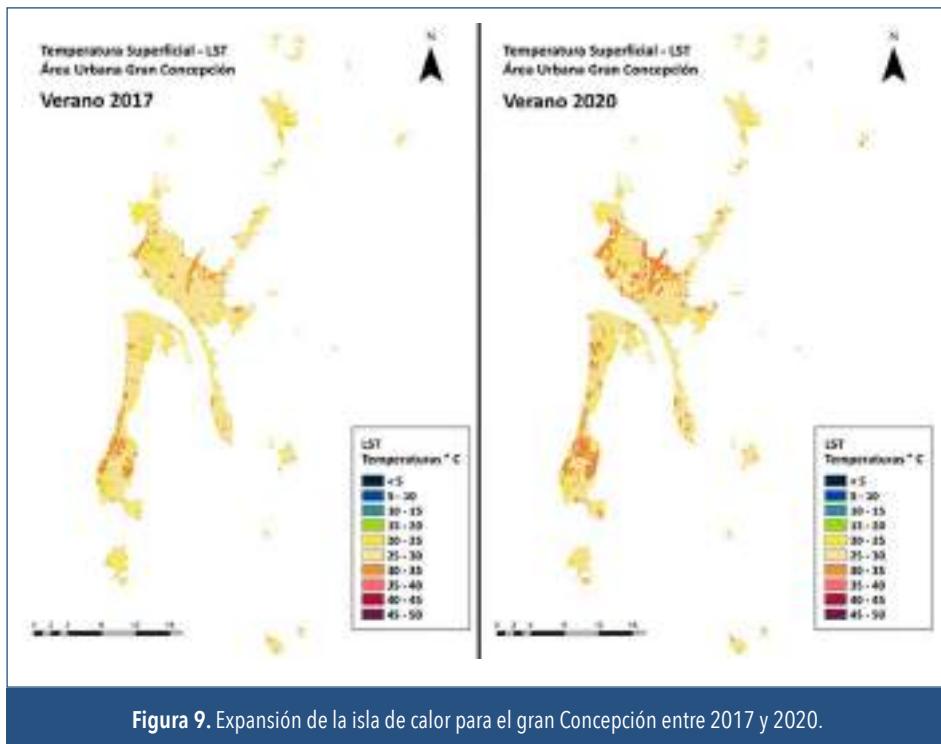


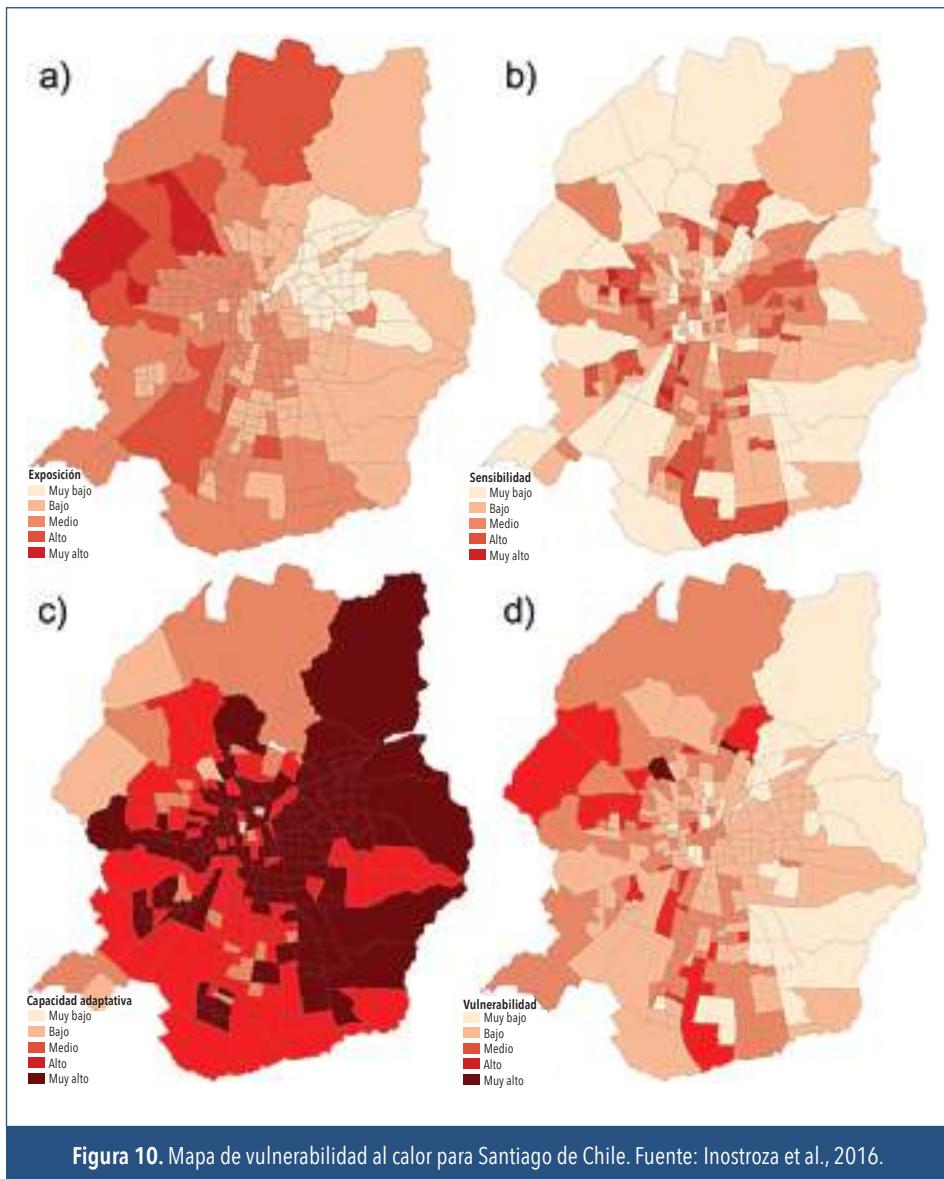
Figura 9. Expansión de la isla de calor para el gran Concepción entre 2017 y 2020.

4 IMPACTOS DE LAS ISLAS DE CALOR SOBRE LA POBLACIÓN

Estudios internacionales detallan muy bien cómo las islas de calor tienen diferentes impactos en las poblaciones, entre ello hay que anotar, como mínimo:

- Un aumento en las necesidades energéticas de los edificios
- Una diminución en la confortabilidad de las condiciones exteriores urbanas
- Un aumento del riesgo de mortalidad durante episodios de ola de calor
- Un aumento de otros efectos relacionados con el cambio climático, como por ejemplo la exposición a sequías e incendios forestales y urbanos
- Un estudio reciente detectó que, además, la distribución de las infraestructuras para la adaptación al cambio climático es muy asimétrica en

las ciudades chilenas: el caso de Santiago presenta las más altas tasas de desigualdad ambiental que se asocian a las diferencias socioeconómicas de la capital del país (Inostroza et al., 2016). En la Figura 10 se detecta que la máxima intensidad de las olas de calor para Santiago ocurre en



las zonas norte-poniente de la ciudad, mientras que la infraestructura adaptiva se concentra en la zona oriente, en donde debido a la altura y a la presencia de más vegetación, la intensidad del calor es menor. Por su parte, la ciudadanía más expuesta se encuentra principalmente en el centro y sur de la ciudad.

Las olas de calor sumadas a las altas temperaturas nocturnas producen un mayor número de noches tropicales y una disminución del confort térmico, afectando negativamente la salud y bienestar de los habitantes (Smith & Henríquez, 2019). Por tanto, urge profundizar en políticas que disminuyan el efecto negativo en la salud del sobrecalentamiento del aire urbano.

5 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN EN CHILE SEGÚN CLIMAS

Las estrategias de mitigación de las islas de calor contemplan diferentes tipologías de intervención. Algunas de ellas tienen la característica de ser al mismo tiempo adaptivas y mitigativas, cosa que debiera privilegiarlas por sobre estrategias puramente mitigativas (Stone, 2012).

Una clasificación básica considera las siguientes estrategias (Palme & Carrasco, 2022; Santamouris & Kolokotsa, 2016):

- Infraestructura verde: parques, fachadas y techos verdes
- Infraestructura azul y enfriamiento evaporativo
- Materiales selectivos fríos para techos, pavimentos y fachadas
- Reducción del calor antropogénico generado por edificios, vehículos y otras actividades
- Forma urbana: sombras y ventilación
- Soluciones geotérmicas

No todas las estrategias tienen la misma aplicabilidad en todas las localidades. La definición climática de Chile puede ser reconocida en la normativa NCh 1079, en la que se definen nueve zonas climático-habitacionales. Esas se encuentran resumidas en la Figura 11.

ZONA	CARACTERÍSTICAS GENERALES
1 NL	Norte Litoral: Se extiende desde el límite con el Perú hasta el límite norte de la comuna de La Ligua, ocupando la faja costera el lado de la cordillera de la Costa, hasta donde se deja sentir directamente el mar. En los valles que rematan los ríos y quebradas se producen penetraciones de esta zona hacia el interior. Ancho variable llegando hasta 50 km aproximadamente.
2 ND	Norte Desértica: Ocupa la planicie comprendida entre ambas cordilleras (de la Costa y de los Andes) desde el límite con el Perú hasta la altura de Potrerillos, Pueblos Hundido y Chañaral excluidos. Como límite oriental puede considerarse la linea de nivel 3000 m aproximadamente.
3 NVT	Norte Valles Transversales: Ocupa la región de los cordones y valles transversales al oriente de la zona NL excluida la Cordillera de los Andes por sobre 400 m y desde Pueblo Hundido hasta el valle del río Aconcagua, excluido.
4 CL	Central Litorial: Cordón costero continuación zona NL desde el Aconcagua hasta el valle del Bío-Bío excluido. Penetra ampliamente en los anchos valles que abren las desembocaduras de los ríos.
5 CI	Central Interior: Valle central comprendido entre la zona NL y la precordillera de los Andes por bajo los 1000 m. Por el N comienza con el valle del Aconcagua o por el S llega hasta el valle del Bío-Bío excluido.
6 SL	Sur Litoral: Continuación de zona CL desde el Bío-Bío hasta Chiloé y Puerto Montt. Variable en anchura, penetrando por los valles de los numerosos ríos que la cruzan.
7 SI	Sur Interior: Continuación de zona CI desde el Bío-Bío incluido hasta la Ensenada de Reloncaví. Hacia el E, hasta la Coordinilla de los Andes por debajo de los 600 m aproximadamente.
8 SE	Sur Extremo: La constituye la región de los canales y archipiélagos desde Chiloé hasta Tierra del Fuego. Contiene una parte continental hacia el E.
9 An	Andina: Comprende la faja cordillerana y precordillerana superior a los 3000 m de altitud en el Norte (Zona Altiplánica) que bajando paulatinamente hacia el Sur se pierde al Sur de Puerto Montt. >900 m de altitud.



Figura 11. Zonificación climático-habitacional. Fuente: Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos.

Con el objetivo de determinar estrategias de mitigación de la isla de calor, se debe considerar que la gran mayoría de las ciudades chilenas se encuentran localizadas o bien en la costa o en el valle central. Por lo tanto, se pueden agrupar las diferentes zonas climático-habitacionales en: zona árida costera, zona árida interior, zona central costera, zona central interior

y zona sur. En el altiplano y en el sur extremo no se detectan particulares exigencias de mitigación de las eventuales islas de calor presentes.

En las zonas áridas, las principales medidas recomendadas son la morfología urbana compacta para aprovechar las sombras, la utilización de enfriamiento evaporativo cuando es posible (presencia de aguas), los materiales selectivos y el enfriamiento geotérmico. La ventilación urbana es un factor clave en los emplazamientos costeros.

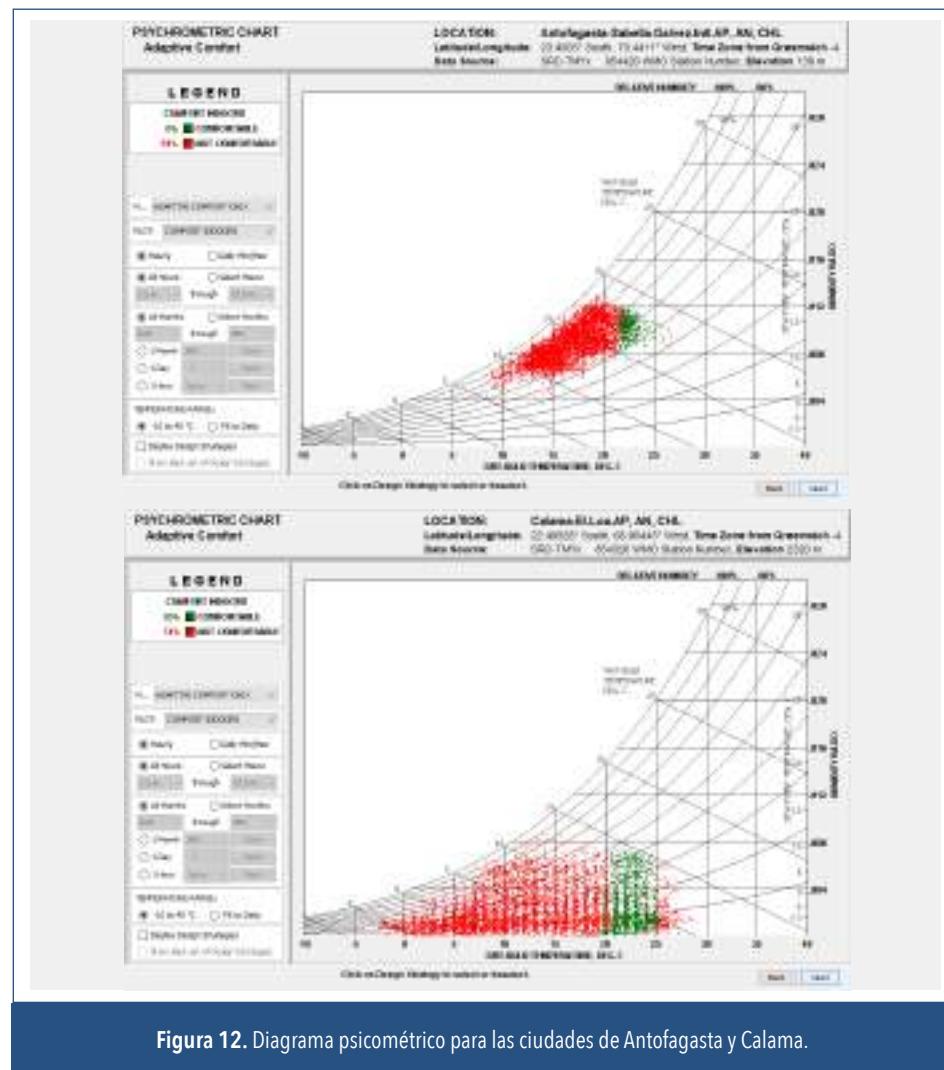


Figura 12. Diagrama psicométrico para las ciudades de Antofagasta y Calama.

En las zonas templadas centrales, de temporada fría y calurosa, se recomienda como primera estrategia el verde urbano. El enfriamiento evaporativo y el geotérmico son sistemas que funcionan, así como la utilización de materiales frescos. En emplazamientos costeros, la ventilación natural es la primera estrategia, seguida por el verde urbano.

En las zonas sur, de temporada calurosa corta pero intensa y con elevados niveles de radiación solar, se recomienda la utilización de estrategias

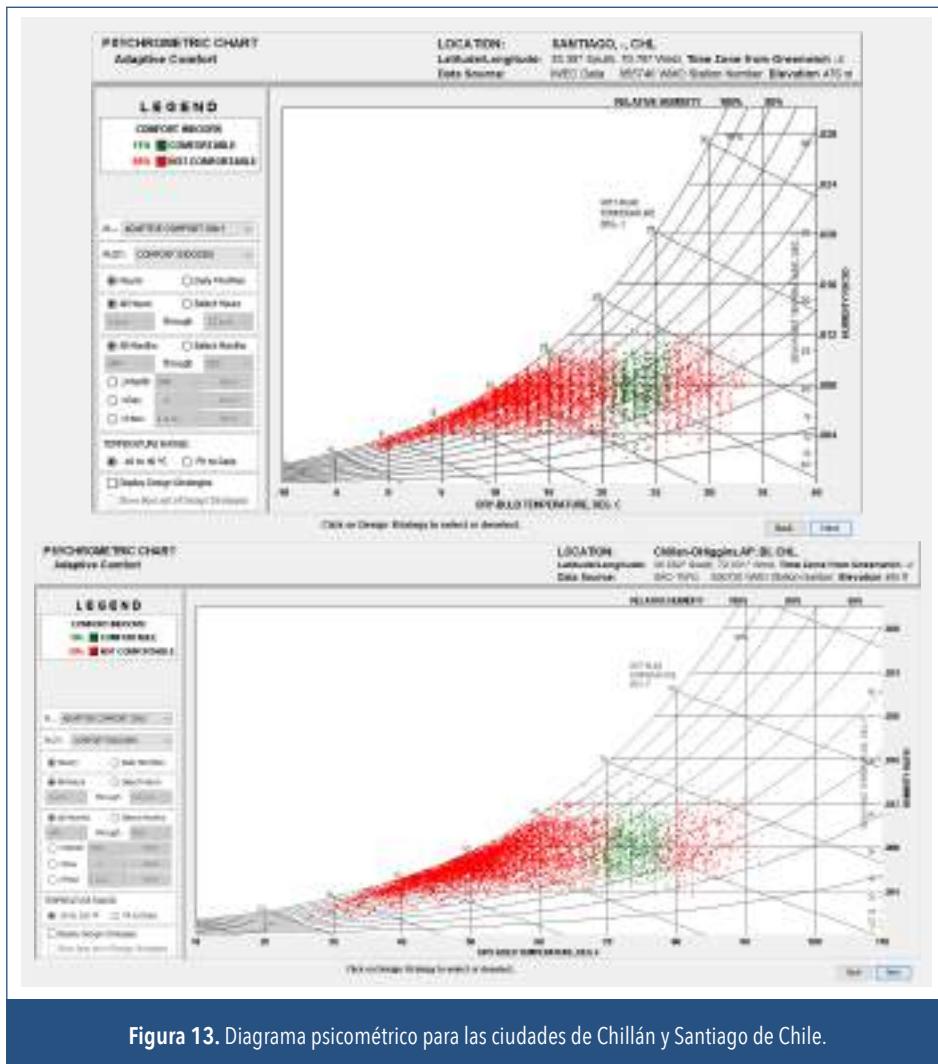


Figura 13. Diagrama psicométrico para las ciudades de Chillán y Santiago de Chile.

verdes estacionales, con árboles de hojas caducas que permitan el sombreadamiento y la evapotranspiración en verano. Los sistemas geotérmicos funcionan igualmente bien, siendo estrategias tanto de refrigeración como de calefacción pasiva.

Comparativamente, otras ciudades en climas templados presentan estrategias que favorecen el aumento de la vegetación en las ciudades, para mitigar efectos de calentamiento urbano y reducir la temperatura del aire. Los Ángeles, en California, presenta el Sustainable City pLAn 2019; Melbourne, el Urban Forest Strategy; Nueva York, el Million Trees NYC; París, el City's climate action plan; y Barcelona, el Climate Plan 2018-2030 (Arancibia, 2021).

6 CONCLUSIONES

En este capítulo se han revisado los principales estudios realizados en Chile sobre las ICU. Las metodologías de análisis han sido sistematizadas en categorías y los resultados han sido resumidos en dos grandes grupos: variabilidad espacial y temporal de las islas de calor, y propuestas de estrategias de mitigación y adaptación actuales, incorporando sus consecuencias en la salud de la población. De hecho, ya desde el tiempo de los griegos y romanos clásicos existían recomendaciones sobre el diseño y construcción de las ciudades. Los escritos de Vitruvio, Alberti y Felipe II, entre otros, hacen referencia a estrategias de acción y aspectos a considerar en el diseño de las ciudades, tales como la elección del sitio de su emplazamiento, la forma del trazado de las calles, su dirección y proporción, y la caracterización morfológica de las plazas. Todos estos estudios presentan indicaciones para ciudades emplazadas en latitudes medias, buscando una ciudad saludable siempre vinculada a su calidad climática.

El camino para la incorporación de estos resultados en una política normativa es todavía incipiente (OECD, 2014). Sin embargo, se han dado algunos pasos con la reflexión científica generada en ocasión de la Conferencia de las Partes (COP) 25, reunión hospedada en Madrid, pero inicialmente prevista para desarrollarse en Santiago de Chile. El punto de vista de los países emergentes, como es el caso de Chile, no puede ser más claro. El impacto que sufren estos países es mucho mayor a la responsabilidad

que les corresponde en el ingreso en la época definida como Antropoceno (Crutzen & Stoermer, 2000). Si se considera la velocidad del desarrollo urbano y la expansión de las ciudades de esta región, resulta fundamental que se implementen rápidamente políticas específicas, a todas las escalas, que limiten todos los procesos críticos, entre los cuales se encuentran el cambio de uso de suelo, el calentamiento global y el ciclo del agua. Cada uno de estos procesos es causa o consecuencia (más frecuentemente ambas cosas) de la presencia de climas urbanos específicos. Los proyectos de investigación teórica y aplicada sobre el fenómeno de la isla de calor siguen siendo una tarea pendiente en Sudamérica.

REFERENCIAS

- Ángel, L., Ramírez, A. & Domínguez, E. (2010). Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(131), 173-183.
- Arancibia, S. (2021). *Influencia de los materiales urbanos y las áreas verdes en el comportamiento térmico de la ciudad de la Calera*. Tesis de grado en Ingeniería. Universidad de Valparaíso.
- Banzhaf, E., De la Barrera, F. & Reyes-Paecke, S. (2019). Urban Green Infrastructure in Support of Ecosystem Services in a Highly Dynamic South American City: A Multi-Scale Assessment of Santiago de Chile. En M. Schröter, A. Bonn, S. Klotz, R. Seppelt & C. Baessler (eds.), *Atlas of Ecosystem Services. Drivers, Risks, and Societal Responses*. Springer, pp. 157-165.
- Carrasco, C. (2010). *Morfología y microclima urbano. Análisis de la forma espacial y materiales como modeladores del microclima de tejidos urbanos mediterráneos costeros: el caso de la ciudad de Valparaíso*. Tesis de grado de doctor en Arquitectura, Energía y Medioambiente. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Carrasco, C. & Palme, M. (2020). Urban Form and Urban Materials as Controller of Urban Climate in Valparaíso, Chile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503.
- Carrasco, C., Palme, M. & Gálvez, M. A. (2016). Factor de cielo visible y efecto isla de calor en Valparaíso. *Urbano*, 19(34), 26-33.
- Carrasco, C., Fonseca, A. & Palme, M. (2018). *Effects of Urban Fabric and Canyon*

- Morphology into Urban Heat Island (UHI): An Experimental Study in Valparaíso, Chile.* International Conference on Urban Climate, NY.
- Crutzen, P. J. & Stoermer, E. F. (2000). The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, 41, 17-18.
- De Costa Trindade Amorim, M. C. (2017). Detecção remota de ilhas de calor superficiais: exemplos de cidades de porte médio e pequeno do ambiente tropical, Brasil. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia*, (52)105, 111-133.
- De Lucena, A. J., Rotunno Filho, O. C., De Almeida França, J. R., De Faria Peres, L. & Nóbrega Rodrigues, X. L. (2013). Urban climate and clues of heat islands events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3-4), 497-511.
- Figuerola, P. I. & Mazzeo, N. A. (1998). Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. *International Journal of Climatology*, 18(15), 1709-1723.
- Hartmann, D. L. (ed.) (1994). The energy balance of the surface. En *Global Physical Climatology*. Academic Press.
- Howard, L. (2012). *The climate of London. Deduced from Meteorological Observations*. Cambridge University Press.
- Inostroza, L., Palme, M. & De la Barrera, F. (2016). A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile. *Plos ONE* 11(9).
- Jauregui, E. (1973). The urban climate of Mexico City. *Erdkunde* 27(4), 298-307.
- Jauregui, E. (2004). Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region. *Investigaciones Geográficas*, 55, 46-60.
- Jáuregui, E. (2005). Possible impact of urbanization on the thermal climate of some large cities in México. *Atmósfera*, 18(4), 274-248.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. & Zepp, H. (2020). The global homogenization of urban form. An assessment of 194 cities across time. *Landscape and Urban Planning*, 204.
- Litardo, J., Palme, M., Borbor-Cordova, M., Caiza, R., Macias, J., Hidalgo-Leon, R. & Soriano, G. (2020). Urban Heat Island intensity and buildings' energy needs in Duran, Ecuador: Simulation studies and proposal of mitigation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 62.
- Marques Filho, E., Karam, H. A., Miranda, A. G. & De Almeida França, J. R. (2009). Rio de Janeiro's tropical urban climate. *Newsletter of the International Association of Urban Climate*, 32, 5-9.

- OECD (2014). *Cities and Climate Change. Policy perspectives*. Organization for Economic Cooperation and Development.
- Oke, T. R. (1978). *Boundary Layer Climates*. Methuen Ltd.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108(455) 1-24.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Palme, M. (2021). *Urban Heat Island Studies in Hot and Humid Climates: A Review of the State of Art in Latin-America*. En N. Enteria, M. Santamouris & U. Eicker (eds.), *Urban Heat Island (UHI) Mitigation. Hot and Humid Regions*. Springer, pp. 123-141.
- Palme, M. & Carrasco, C. (2022). Urban heat island in Latin American cities: a review of trends, impacts, and mitigation strategies. En A. Khan, H. Akbari, F. Fiorito, S. Mithun & D. Niyogi (eds.), *Global Urban Heat Island Mitigation*. Elsevier.
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Lobato-Cordero, A. & Carrasco, C. (2017). From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. *Energy and Buildings* 145, 107-120.
- Palme, M., Flores, F. & Romero, L. (2018a). *Surface temperature variation and urban heat island intensity in Antofagasta, Chile*. En A. Leone & C. Gargiulo (eds.), *Environmental and territorial modelling for planning and design*. Federico II Open Access University Press, pp. 147-158.
- Palme, M., Inostroza, L. & Salvati, A. (2018b). Technomass and cooling demand in South America: a superlinear relationship? *Building Research & Information*, 46(8), 864-880.
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Carrasco, C. & Lobato, A. (2019). *Urban Climate in the South American Coastal Cities of Guayaquil, Lima, Antofagasta, and Valparaíso, and its Impacts on the Energy Efficiency of Buildings*. En C. Henríquez & H. Romero (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Springer, pp. 33-62.
- Privitera, R., Evola, G., La Rosa, D. & Costanzo, V. (2021). *Green Infrastructure to Reduce the Energy Demand of Cities*. En M. Palme & A. Salvati (eds.), *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Springer, pp. 485-503.
- Rivera, S. & Palme, M. (2021). *Identificación de patrones ambientales y morfológicos del fenómeno isla de calor en ciudades del Norte de Chile*. En D. A. Rozas Vásquez (ed.), *Ecología del Paisaje en Latinoamérica: biodiversidad, sustentabilidad y bienestar en sistemas dinámicos*. IALE Chile, pp. 105-114.

- Romero, H. (2019). *Urban Climates and the Challenge of Sustainable Development of Chilean Cities*. En C. Henríquez & H. Romero (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Springer, pp. 207–256.
- Romero, H. (2020). *Islas, Ondas y Puntos de Calor: Contribuciones inadvertidas de la planificación y diseño urbano de las ciudades latinoamericanas al Cambio Climático Global*. Trabajo presentado en Asociación de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura de América del Sur.
- Salvati, A., Palme, M., Chiesa, G. & Kolokotroni, M. (2020). Built form, urban climate and building energy modelling: case-studies in Rome and Antofagasta. *Journal of Building Performance Simulation* 13(2), 209-225.
- Santamouris, M. (2014). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100-113.
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207.
- Santamouris, M. & Kolokotsa, D. (eds.) (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. Routledge.
- Sarricolea, P. & Martín-Vide, J. (2013). La isla de calor urbana del área metropolitana de Santiago (AMS) de Chile a partir de diferencias térmicas de los observatorios de Talagante y Cerrillos. *Perspectiva Geográfica*, 18(2), 239-256.
- Sarricolea, P. & Meseguer-Ruiz, O. (2019). *Urban Climates of Large Cities: Comparison of the Urban Heat Island Effect in Latin America*. En C. Henríquez & H. Romero (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Springer, pp. 17-32.
- Smith, P. & Henríquez, C. (2019). Perception of thermal comfort in outdoor public spaces in the medium-sized city of Chillán, Chile, during a warm summer. *Urban Climate*, 30.
- Stone, B. (2012). *The city and the coming climate. Climate Change in the Places We Live*. Cambridge University Press.
- Valenzuela, J. (2021). *Influencia de la implementación de cubiertas verdes en la ciudad de Valparaíso*. Tesis de grado en Ingeniería, Universidad de Valparaíso.

Cambio climático y evaluación prospectiva del riesgo por islas de calor urbano en ciudades chilenas

Cristian Henríquez¹, Pamela Smith², Nikole Guerrero³, Jorge Qüense⁴

¹ Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Centro Interdisciplinario de Cambio Global. ORCID: 0000-0001-6845-1973. cghenriq@uc.cl

² Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR). ORCID: 0000-0001-9355-9601. pamelasmit@uchilefau.cl

³ Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). ORCID: 0000-0001-9892-2289. nikole.guerrero@cigiden.cl

⁴ Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. ORCID: 0000-0002-0692-9414. jquense@uc.cl

RESUMEN

Los impactos del cambio climático están afectando a todas las ciudades en distintos órdenes de magnitud, sin embargo, no hay mucha información sobre el nivel de riesgo para las ciudades latinoamericanas. A su vez, el impacto del aumento de temperatura se ve acentuado por el propio efecto urbano, a través del efecto de isla de calor urbano (ICU). En tal sentido, el propósito de este capítulo es estimar el nivel de riesgo asociado al efecto de ICU en un escenario presente y futuro considerando los factores de amenaza, exposición, vulnerabilidad y adaptación en las principales ciudades de Chile. Parte de los resultados forman parte del Atlas de Riesgos Climáticos (ARClim). Para ello se utiliza un enfoque espacial múltiple que combina información climática, urbana, demográfica y social. Se concluye que los principales riesgos se encuentran en las grandes metrópolis,

obviamente determinados por la gran exposición y amenaza. Sin embargo, si mejoramos la resiliencia y disminuimos la vulnerabilidad el impacto se puede controlar. Hay ciudades menores que tienen una baja ICU (por ejemplo, Hanga Roa o Coyhaique, con valores bajo 1.5 °C), pero debido al cambio climático pueden aumentar su ICU sobre los 2.5 °C, y en promedio el aumento estimado para el conjunto de ciudades sería superior a los 4.2 °C para 2065. De esta forma, el nivel de riesgo podría aumentar junto con el mayor crecimiento urbano y demográfico, por lo que es urgente implementar medidas y acciones de adaptación urbana.

Palabras clave: islas de calor urbano, cambio climático, exposición, índice de vulnerabilidad social, índice de resiliencia comunitaria, adaptación.

ABSTRACT

The impacts of climate change are affecting all cities in different orders of magnitude; however, there is not much information on the level of risk for Latin American cities. In turn, the impact of temperature increase is accentuated by the urban effect itself, through the urban heat island (UHI) effect. In this sense, the purpose of this chapter is to estimate the level of risk associated with the UHI effect in a present and future scenario considering the factors of hazard, exposure, vulnerability and adaptation in the main cities of Chile. Part of the results are part of the Climate Risk Atlas (ARClim). A multiple spatial approach combining climate, urban, demographic and social information is used. It is concluded that the main risks are found in large metropolises, obviously determined by the high exposure and threat. However, if we improve resilience and reduce vulnerability, the impact can be controlled. There are smaller cities that have a low UHI (for example, Hanga Roa or Coyhaique with values below 1.5 °C) but due to climate change their UHI may increase above 2.5 °C and on average the estimated increase for the cities as a whole would be higher than 4.2 °C. Thus, the level of risk would increase considering the greater urban and demographic growth, making it urgent to implement urban adaptation measures and actions.

Keywords: urban heat islands, climate change, exposition, social vulnerability index, resilience, indicator for communities, adaptation.

1 INTRODUCCIÓN

La urbanización mundial y el cambio climático son dos procesos de cambio global que en la actualidad están poniendo en riesgo la sostenibilidad de la población y el medio ambiente. A nivel global, la urbanización planetaria alcanza al 55 % y se proyecta que para el 2050 alcance el 68 % (UN, 2019). Por su parte, el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) prevé que la temperatura mundial durante los próximos veinte años alcanzará o superará un calentamiento de 1.5 °C, alejándose del objetivo planteado en el acuerdo de París (IPCC, 2021).

En particular, el Sexto Reporte de Evaluación (AR6, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2021) plantea que algunos aspectos del cambio climático pueden verse amplificados, específicamente el calor en las ciudades, ya que las zonas urbanas suelen ser más cálidas que sus alrededores. En este marco, el fenómeno de isla de calor urbano (ICU) surge como uno de los principales efectos que reúne tanto las dinámicas de urbanización como los procesos locales de conformación del clima urbano, aspecto que no aparece o aparece muy poco desarrollado en las evaluaciones de riesgo climático, por ejemplo en las evaluaciones ambientales estratégicas de planos reguladores comunales o intercomunales en Chile, considerando especialmente los impactos de intensificación de temperatura por el cambio climático.

La ICU se refiere a la diferencia de temperatura entre el área urbana y el espacio no urbano que la rodea (Oke, 2002). Es un efecto que se manifiesta en todas las ciudades con distintos órdenes de magnitud. En grandes metrópolis latinoamericanas se ha encontrado que las intensidades de las ICU varían entre 3 y 8 °C, donde la densidad de población y la latitud ofrecen explicaciones parciales para estas diferencias entre las temperaturas urbanas y no urbanas (Sarricolea & Meseguer-Ruiz, 2019). En algunas ciudades medias chilenas (Chillán y Los Ángeles) también se han registrado ICU con intensidad máxima entre 6 y 7 °C (Henríquez, 2014).

Los efectos de la ICU son de diverso tipo e intensidad tanto en el medio urbano como en la salud de las personas. Dentro de los impactos se pueden mencionar la alteración del confort térmico ambiental y, en casos más extremos, especialmente asociados a olas de calor de gran magnitud, un incremento de episodios de estrés y golpes de calor que se relacionan con un aumento en las tasas de morbilidad e incluso de mortalidad de la población (Macintyre et al., 2021; Xu et al., 2016). Así, por ejemplo, las temperaturas extremadamente altas del verano de 2003 en Europa se asociaron con hasta setenta mil muertes en exceso en Europa (Mitchell et al., 2016). La existencia de las ICU en las ciudades se relaciona con las olas de calor, aumenta su efecto (Tejedor et al., 2016) y contribuye a una mayor permanencia de las altas temperaturas, lo que puede observarse en las mediciones nocturnas, donde factores de diseño urbano, como su materialidad, aportan a la reserva de calor (Nakata & de Souza, 2013).

En este sentido, comprender la cadena de impactos asociada a eventos extremos en áreas urbanas resulta fundamental desde una óptica de riesgo climático. En este caso se analiza el riesgo climático por ICU considerando los factores de amenaza, exposición y vulnerabilidad tanto presentes como futuros, de acuerdo con el enfoque metodológico planteado por el Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ & EURAC, 2017). Esta guía aporta una forma de entender y cuantificar el concepto de riesgo asociado al cambio climático propuesto por el (Reisinger et al., 2020). Este concepto, empleado en torno a la reducción de riesgo frente a los desastres, cambia el foco empleado previamente por el grupo de trabajo II (WGII) del IPCC (AR4), que se centraba en el concepto de vulnerabilidad climática. Tal cambio de paradigma ha generado confusiones entre los investigadores y profesionales que trabajan en cambio climático (Pica-Téllez et al., 2020). En este sentido, este trabajo pretende ser un aporte a esta discusión, explorando además la posibilidad de incluir los niveles de resiliencia en esta ecuación.

En Chile, la mayor parte de las estrategias y planes de acción diseñados para enfrentar el cambio climático en las ciudades priorizan la mitigación, vinculándola principalmente a medidas de reducción de gases efecto invernadero y de eficiencia urbana. Sin embargo, el cambio climático también implica dirigir los esfuerzos hacia la adaptación, especialmente en países en vías de desarrollo (Barton, 2009). El éxito de las medidas de adaptación

se produce cuando están en sintonía con las prioridades de desarrollo, tales como la reducción de la pobreza y la reducción del riesgo de desastres (Measham et al., 2011) y puede producir cobeneficios en áreas urbanas, mejorando las condiciones de seguridad de los hogares.

El proyecto de Atlas de Riesgos Climáticos (ARClim) del Ministerio de Medio Ambiente de Chile (Pica-Téllez et al., 2020), acogiendo este enfoque, ha abordado el desafío de evaluar y cartografiar cadenas de impactos para distintos sectores del país. En este Atlas se incluye el sistema de ciudades, que a su vez incluye los subsistemas de medio construido y espacios públicos. En particular se desarrolla el cálculo de riesgo para tres cadenas de impactos: islas de calor, confort térmico y heladas (Henríquez et al., 2020). En este trabajo se muestra como ejemplo la determinación de riesgo por ICU, incluyendo como nuevo factor el nivel de resiliencia de las ciudades. Esto permite mejorar la capacidad para enfrentar y sobreponerse a estos impactos de manera anticipada y estratégica.

En este marco, el presente capítulo tiene por objetivo aportar a la determinación del riesgo por ICU para las principales ciudades de Chile, incluyendo la resiliencia como factor de reducción del riesgo. Para ello se usa una adaptación del marco conceptual de la evaluación del riesgo propuesto por Chen (2021), que incluye cuatro factores determinantes del riesgo: amenaza, exposición, sensibilidad y resiliencia comunitaria. Todos estos factores se expresan de manera cartográfica para el presente y futuro, determinando cambios y brechas que permitan sustentar medidas de planificación en adaptación. Finalmente, se discuten y proponen lineamientos para abordar los riesgos de este impacto y se concluye sobre la importancia del monitoreo y seguimiento de este riesgo para lograr ciudades más sostenibles.

2 MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La selección de las ciudades se ha basado en el criterio de tamaño de población, identificando las ciudades o conurbaciones mayores a 50 000 habitantes y las capitales regionales del país. En primer lugar, se

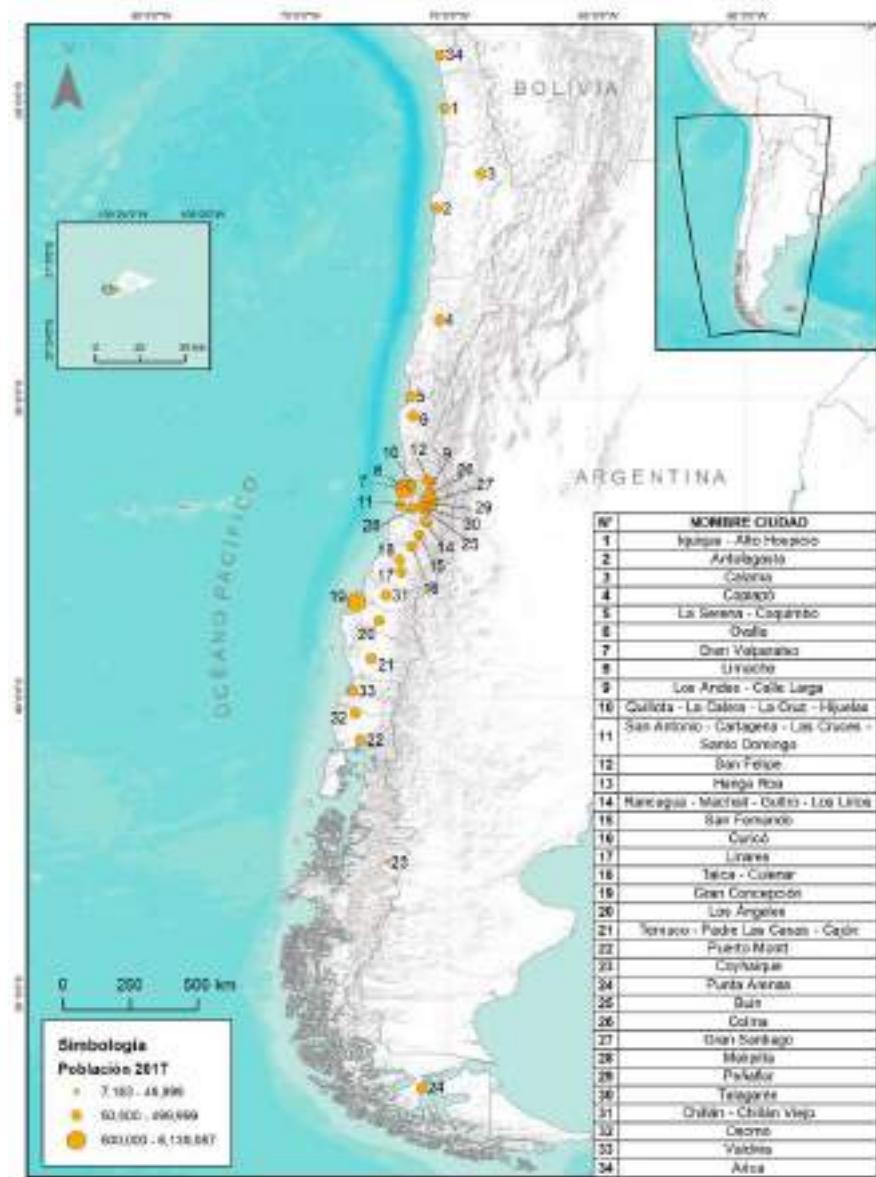


Figura 1. Mapa de área de estudio: ciudades chilenas seleccionadas.

revisaron los datos de población del Censo de Población de 2017 del documento Ciudades, Pueblos y Aldeas del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2019). Lo anterior fue complementado con el criterio de Área Urbana Consolidada (AUC), término desarrollado por el INE y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (INE & MINVU, 2018) para identificar las áreas urbanas conurbadas, que conforman una única unidad urbana morfológica.

De esta forma, se han considerado 34 ciudades, incluyendo las ciudades de Coyhaique (capital de la región de Aysén) y la localidad de Hanga Roa en Isla de Pascua, territorio insular perteneciente a la región de Valparaíso, que tienen una población bajo el umbral de 50 000 habitantes pero que permiten contar con todas las capitales regionales y representar la amplia variedad climática del país (Henríquez et al., 2021) (Figura 1).

2.2 Conceptualización general

El esquema metodológico general del riesgo por impacto debido al efecto ICU se basa en el siguiente esquema general adaptado de GIZ y EURAC (2017), donde el riesgo se determina a partir de la combinación de los factores de:

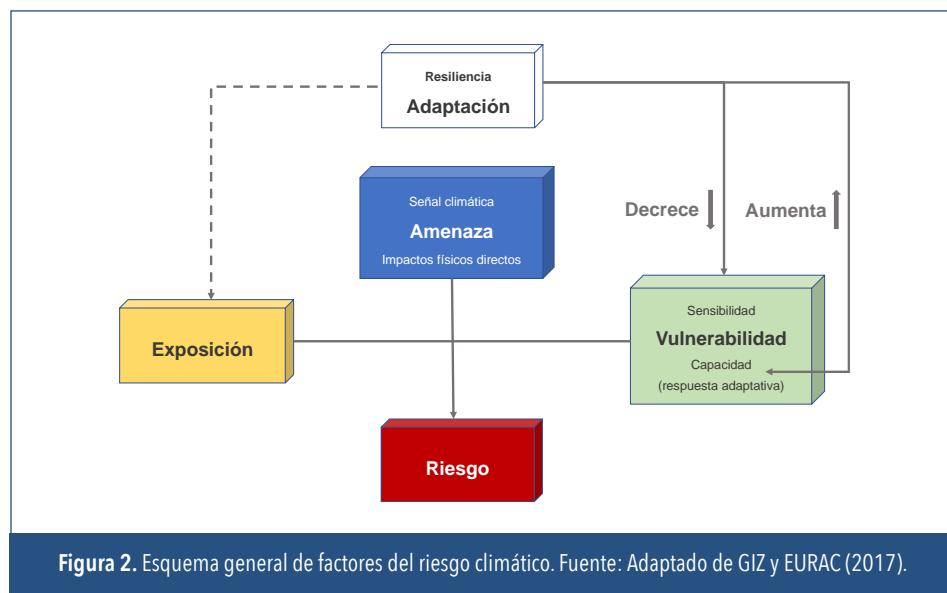


Figura 2. Esquema general de factores del riesgo climático. Fuente: Adaptado de GIZ y EURAC (2017).

amenaza (intensidad de la ICU), exposición (población urbana), vulnerabilidad (en este caso sensibilidad), menos la adaptación (resiliencia). Cada uno de estos factores se explica a continuación (Figura 2).

2.3 Determinación de la amenaza por ICU

Debido a la dificultad de contar con observaciones de temperatura atmosférica urbana y rural representativas para las 34 ciudades consideradas, este trabajo estimó la intensidad de la ICU a través de un método indirecto propuesto por Oke (2002). Dicho método permite obtener la intensidad máxima de la ICU a partir de la cantidad de población urbana y la velocidad del viento. La ecuación original formulada por Oke, y que fue considerada para la estimación de la intensidad presente de la ICU, es la siguiente:

$$\Delta ICU_{u-r} = \frac{p^{0.27}}{4*(\underline{u})^{0.56}} \quad (1)$$

Donde:

ΔICU_{u-r} es la diferencia máxima de temperatura del aire entre el campo y ciudad en grados Celsius, correspondiente a la ICU presente.

p es la población urbana presente.

\underline{u} es la velocidad del viento presente en m/s a una altura de 10 m en un área rural próxima a la ciudad.

La evaluación futura de la ICU considerando el efecto del cambio climático se basó en la propuesta de Henríquez et al. (2021). Este efecto se calcula a partir de la diferencia de la temperatura mínima diaria promedio futura de verano menos la temperatura mínima diaria promedio actual en grados Celsius (ΔT_{min}), y esta diferencia se suma a la ecuación original (Ecuación 2).

$$\Delta ICUC_{u-r} = \frac{p^{0.27}}{4*(\underline{u})^{0.56}} + \Delta T_{min} \quad (2)$$

Donde:

$\Delta ICUCC_{u-r}$ es la diferencia máxima de temperatura entre el campo y ciudad en grados Celsius, correspondiente a la ICU futura incluyendo el efecto de cambio climático.

p es la población urbana futura.

u es la velocidad del viento futura en m/s a una altura de 10 m en un área rural próxima a la ciudad.

ΔT_{min} es la diferencia de temperatura mínima diaria promedio futura de verano menos la temperatura mínima diaria promedio presente en grados Celsius, atribuida al efecto del cambio climático.

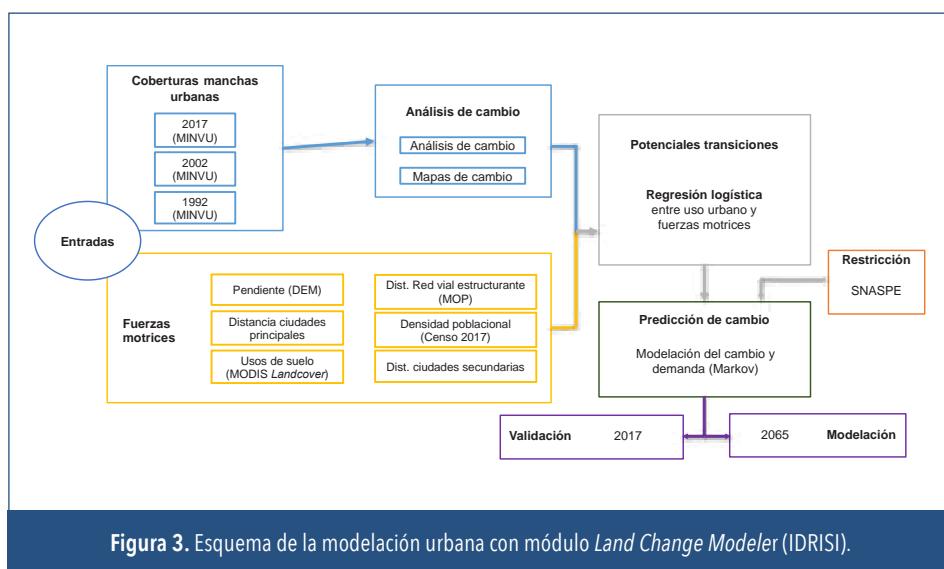
Los datos de velocidad del viento y temperatura, para el presente (1980 y 2010) y futuro (2035-2065) —escenario RCP8.5— fueron generados con base en proyecciones realizadas por Meteodata para el proyecto Atlas de Riesgos Climáticos (Pica-Téllez et al., 2020) (<https://arclim.meteodata.cl/>). Las proyecciones climáticas tienen una resolución espacial de 5 por 5 km².

2.4 Estimando la exposición presente y futura

La población urbana presente se obtiene de los registros censales, en este caso del Censo de Población y Vivienda realizado por el INE del año 2017, en particular del reporte Ciudades, Pueblos y Aldeas 2019 (INE, 2019). Para el caso de la población urbana futura se usó un modelo espacial de cambio de uso de suelo que permite estimar la superficie urbana proyectada al 2065, y con ello la cantidad de población mediante un modelo de regresión lineal simple.

Este modelo considera el mismo horizonte temporal de los modelos climáticos para determinar la exposición futura a través de las superficies urbanas simuladas, lo cual se usó para estimar la población al 2065 y con ello la ICU futura. Para la obtención del uso urbano del año 2065 se utilizó un modelo de predicción de cambio de uso de suelo, mediante el módulo de IDRISI, *Land Change Modeler*, en todas las áreas urbanas del país. Este modelo consideró seis fuerzas motrices correspondientes a: pendiente del terreno, distancia a red vial estructurante, distancia a ciudades principales, distancia a ciudades secundarias, usos de suelo y densidad poblacional.

Como base se utilizaron las coberturas de mancha urbana provistas por el MINVU para los años 1992, 2002 y 2017, y como restricciones se usaron las Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). Luego se realizó una regresión logística entre el uso urbano y las fuerzas motrices. Para estimar las demandas de uso urbano se aplicó el método de cadenas de Markov. Todo esto permitió modelar el uso urbano al año 2065. Para validar el modelo se proyectó al año 2017 y se comparó con el año 2017 observado mediante el índice Kappa. Todo el proceso de simulación espacial se resume en el siguiente esquema (Figura 3).



Finalmente, mediante una regresión lineal entre los datos de población de los censos de 1992, 2002 y 2017 y la superficie real del MINVU 1992, 2002 y 2017, y la estimada mediante la modelación al año 2065, se proyectó la población urbana al año 2065.

2.5 Construcción de un indicador de vulnerabilidad social

La vulnerabilidad es un concepto que ha sido estudiado desde diversas disciplinas, como producto de su complejidad; como tal, sus definiciones y

maneras de evaluar han correspondido a las distintas ramas de la ciencia (Khan, 2012; Lee, 2014; Menoni et al., 2012). A pesar de esta diversidad de definiciones y metodologías, todas las visiones concuerdan en que la vulnerabilidad es la susceptibilidad de un sistema, comunidad, persona o elemento a ser impactado por una amenaza (Adger, 2006; Cutter et al., 2003a; Lee, 2014; McEntire, 2005).

Desde la mirada del riesgo, la vulnerabilidad se ha analizado históricamente bajo una perspectiva con foco en las características biofísicas del territorio. No obstante, desde las últimas dos décadas, este enfoque ha dado paso a la integración del componente social como un factor clave del riesgo (Birkmann, 2007; Lee, 2014; Menoni et al., 2012). En este sentido, informes como el IPCC (AR5) ya han definido la importancia de la vulnerabilidad como un constituyente clave del riesgo climático, junto a los factores de exposición y amenaza.

En términos de evaluación, la vulnerabilidad social se ha medido a través de las condiciones sociales y económicas que existen previamente a la ocurrencia de un desastre y que incrementan o disminuyen la capacidad de las comunidades para prepararse, responder y recuperarse de un desastre (McEntire, 2005). Sin embargo, a pesar de estos avances y del desarrollo de nuevas metodologías para su estudio y medición, aún se torna necesario seguir profundizando en su comprensión y evolución dinámica a lo largo del tiempo, destacando su importancia como herramienta para tomadores de decisión y su influencia en la creación de políticas públicas efectivas para el manejo del riesgo.

Entre los distintos métodos desarrollados para la evaluación de la vulnerabilidad social, uno de los más replicados y con mayor validación es el índice de vulnerabilidad social (SoVI, en inglés) elaborado por Cutter et al. (2003b). Este índice cuenta con la ventaja de cuantificar y zonificar variables que suelen tener un uso cualitativo mediante la validación estadística, lo que permite la comprensión de su origen y su distribución sobre el territorio. Estudios previos han replicado esta metodología, identificando como factores principales de la vulnerabilidad social: el género, el nivel socioeconómico, el empleo y las características sociodemográficas, entre otros (Fatemi et al., 2017). El modelo aplicado está basado en el método realizado en Portugal e Italia (Frigerio & De Amicis, 2016; Guillard-Gonçalves et al., 2014).

Para la construcción del indicador SoVI se utilizaron 24 variables correspondientes a distintas dimensiones de la vulnerabilidad social (Tabla 1). Se recogieron datos a partir de dos fuentes nacionales. La primera, el Censo 2017 realizado por el INE, y la segunda, la Encuesta de Caracterización Socioeconómica (CASEN) 2017 elaborada por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (2017). Considerando estas dos bases de datos se definió como unidad de análisis espacial la zona censal. Cabe destacar que el presente estudio de vulnerabilidad, a pesar de estar basado en la metodología SoVI, es una adaptación para el caso chileno, por tanto, algunas de las variables utilizadas no se encuentran definidas como tal por los autores internacionales, sin embargo, estas variables responden a las dimensiones de la vulnerabilidad consideradas y validadas en otros estudios, que son citados.

TABLA 1. VARIABLES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ÍNDICE SOVI

Núm.	Variable	Fuente del dato	Referencia
1	Porcentaje viviendas con muros irrecuperable	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	de Loyola Hummell et al. (2016)
2	Porcentaje viviendas con techos irrecuperable	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	de Loyola Hummell et al. (2016)
3	Porcentaje viviendas piso irrecuperable	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	de Loyola Hummell et al. (2016)
4	Porcentaje viviendas de tipo irrecuperable	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
5	Porcentaje sin red pública de agua	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	de Loyola Hummell et al. (2016)
6	Porcentaje mujeres	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter (1996)
7	Porcentaje mujeres jefas de hogar	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Banford & Froude (2015)
8	Porcentaje población menor 15 años	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)

TABLA 1. (CONTINUACIÓN)

Núm.	Variable	Fuente del dato	Referencia
9	Porcentaje población mayor 65 años	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	de Loyola Hummell et al. (2016)
10	Porcentaje desempleados	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Miletí & Noji (1999); Guillard-Gonçalves et al. (2014)
11	Porcentaje población estudiando	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
12	Porcentaje población jubilados	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
13	Porcentaje de mayores de 25 sin educación básica completa	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
14	Porcentaje población perteneciente a etnia	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
15	Porcentaje población migrante	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
16	Porcentaje viviendas arrendadas	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
17	Porcentaje hogares vulnerables por ingreso económico per cápita	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
18	Porcentaje población analfabeta mayor a 15 años	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
19	Porcentaje población con ocupación sector primario o secundario	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
20	Porcentaje población con discapacidad	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003); Guillard-Gonçalves et al. (2014)
21	Porcentaje viviendas sin red de alcantarillado	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Guillard-Gonçalves et al. (2014)
22	Porcentaje población en pobreza multidimensional	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003)
23	Porcentaje viviendas con hacinamiento medio alto-crítico	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2003); de Loyola Hummell et al. (2016)
24	Número de viviendas en campamentos	Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2022)	de Loyola Hummell et al. (2016)

La metodología contempló la realización de un Análisis de Componentes Principales (ACP). En primer lugar, se prepararon los datos transformando los valores porcentuales o de media, con el propósito de hacer comparables las zonas a pesar de las diferencias en términos de población. En segundo lugar, las variables fueron estandarizadas en valores Z (Zscore), con media 0 y desviación estándar 1, con el fin de obtener datos en una misma escala. Por tanto, es importante considerar que SoVI es un modelo relativo, puesto que al ser medido en desviaciones estándar depende exclusivamente de los valores de la media. En consecuencia, el SoVI es representativo solo para el área analizada y de manera comparativa entre las unidades analizadas, por ende, cualquier cambio en el área de estudio requiere una nueva realización del modelo.

En cuanto a la conformación de los componentes o factores de la vulnerabilidad, estos se obtuvieron a través del ACP, mediante el uso del programa estadístico SPSS. Se utilizó el criterio de Eigenvalue >1 para que el modelo considerara como componentes aquellos que abarcaran más de una variable; a su vez, se utilizó una rotación Varimax, que permite un ajuste más estricto de los componentes para una mejor comprensión e interpretación del usuario. De esta manera, el valor final de SoVI se obtuvo de la sumatoria lineal de los componentes obtenidos para cada unidad de análisis; mientras que, para la obtención de los valores por ciudad, se obtuvo el promedio por componente para posteriormente realizar la sumatoria lineal.

2.6 Propuesta de indicador de resiliencia comunitaria

Al igual que el concepto de vulnerabilidad, definir resiliencia conlleva un proceso de alta complejidad, ya que su conceptualización varía según la rama científica desde la que se analice. No obstante, entre las definiciones más aceptadas por la literatura se entiende a la resiliencia como: “La capacidad de absorber, responder y adaptarse que tiene un sistema, comunidad o individuo frente al impacto de un desastre” (Adger, 2006; Cutter et al., 2008).

En este contexto, la forma de comprender la resiliencia va a depender de las múltiples acepciones del concepto, lo que a su vez permite que se configuren distintas dimensiones de la resiliencia. Es así como histó-

ricamente los estudios se han orientado a la resiliencia de los sistemas físicos o del medio construido, siendo tan solo en las últimas décadas en que el estudio de la resiliencia comunitaria, como tal, ha tomado mayor importancia.

La relevancia que ha tenido la resiliencia comunitaria ha permitido el desarrollo de diversos enfoques para su comprensión, permitiendo la construcción de una robusta pero variada base teórica para su medición. De ella, es posible entender que el objetivo del concepto es la identificación de las capacidades de las comunidades para enfrentar una amenaza y un posterior desastre y, a su vez, que características como la demografía, los recursos, la capacidad de participación social, y los niveles de comunicaciones y de delincuencia influyen en su desarrollo (Cutter et al., 2008; Platts-Fowler & Robinson, 2013).

Ahora bien, la diversidad tanto de dimensiones como de definiciones que presenta el concepto implica que la forma de evaluación también sea compleja. Dentro de los métodos más replicados por la comunidad científica se encuentra el modelo BRIC (*Baseline Resilience Indicators for Communities*), siglas de indicadores básicos de resiliencia comunitaria, el cual fue desarrollado por Cutter et al. (2014) a partir del modelo de resiliencia del lugar DROP (*Disaster Resilience of Place*) planteado por la misma autora (Cutter et al., 2008).

Si bien hubiese sido ideal desarrollar el método BRIC para el cálculo de la resiliencia comunitaria, se optó por realizar un método similar al desarrollado para la evaluación de la vulnerabilidad social, con el objeto de obtener dos variables comparables, tal como se plantea en Chen (2021). En este sentido, se desarrolló un análisis de ACP para doce variables definidas con anterioridad (Tabla 2), las cuales son representativas de las diferentes características que influyen en los parámetros de la resiliencia.

En cuanto a la fuente de datos, estos fueron tomados principalmente del Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017) y de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica (CASEN, 2017). No obstante, algunos datos fueron recopilados de distintos ministerios gubernamentales a través de su canal de transparencia, como en el caso del Ministerio de Salud (MINSAL) y el Servicio de Impuestos Internos (SII). En cuanto a la escala de los datos, estos fueron recopilados a nivel distrital.

En cuanto al ACP, se realizó el mismo proceso de estandarización que con la base de datos de vulnerabilidad. Finalmente, una vez elaborado el análisis ACP, se realizó la sumatoria lineal de los componentes obtenidos para el cálculo de la resiliencia comunitaria para cada unidad de análisis; mientras que para la obtención de los valores por ciudad se obtuvo

TABLA 2. VARIABLES PARA DETERMINAR LA RESILIENCIA COMUNITARIA

Núm.	Variable	Fuente del dato	Referencia
1	Número de médicos	Ministerio de Salud, 2018	Cutter et al. (2014)
2	Número de psicólogos	Ministerio de Salud, 2018	Cutter et al. (2014); Springgate et al. (2011)
3	Número de centros educacionales	Ministerio de Educación, 2021	Cutter et al. (2014); Cross (2014)
4	Número de empresas comercio	Servicio de Impuestos Internos, 2019	Wein & Rose (2011)
5	Ocupación y/o tenencia de la vivienda	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2014)
6	Porcentaje población no cesante	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Heinz Center (2002)
7	Porcentaje población activa (15-64 años)	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Chen (2021)
8	Porcentaje población que participa en organizaciones religiosas	Ministerio de Desarrollo Social y Familia (CASEN 2017)	Sherrieb et al. (2010)
9	Porcentaje población con fondo de pensiones	Ministerio de Desarrollo Social y Familia (CASEN 2017)	Cutter et al. (2014)
10	Porcentaje población con sistema de previsión de salud	Ministerio de Desarrollo Social y Familia (CASEN 2017)	Cutter et al. (2014)
11	Porcentaje población con acceso a internet	Ministerio de Desarrollo Social y Familia (CASEN 2017)	Cutter et al. (2014)
12	Porcentaje población mayor de 25 con Educación Básica Completa	Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017)	Cutter et al. (2014); Morrow (2008)

el promedio por componente para posteriormente realizar la sumatoria lineal.

Es importante mencionar que tanto el factor de resiliencia comunitaria como de vulnerabilidad son los únicos que no se pudieron proyectar al año 2065, debido a la imposibilidad metodológica de estimar tendencias futuras.

2.7 Integración y cartografía del riesgo por ICU

Para efectos de la integración de todos los factores de riesgo climático se usó una adaptación del enfoque teórico-metodológico propuesto por Chen (2021). Este se expresa en la siguiente fórmula: $R = A + E + S - R_e$. Donde, R es riesgo, A es amenaza, E es exposición, S es sensibilidad (vulnerabilidad) y R_e es resiliencia.

Como todos los factores están en unidades distintas se normalizaron en una escala homogénea de 0 a 1. Luego se clasificaron los cuatro componentes en tres categorías: alto (3), medio (2) y bajo (1) utilizando intervalos iguales. Así, la categoría baja corresponde a los valores normalizados entre 0 y 0.33, la categoría media a los valores normalizados entre 0.33 y 0.66, y la categoría alta a todos los valores sobre 0.66. Esto se basa en un criterio de estadístico simple de agrupación de valores. Luego, cada ciudad se clasifica en una de las tres categorías según el valor resultante de cada componente, basado en lo propuesto por Chen (2021).

Posteriormente, se realizó la operación aritmética de sumar los tres primeros factores y luego restar la resiliencia para obtener un mapa integrado de riesgo que va de 0 a 8, donde 0 corresponde a una situación sin riesgo y 8 es máximo riesgo. Por ejemplo, la situación de máximo riesgo corresponde a una alta amenaza, alta exposición y alta sensibilidad, esto es, $3 + 3 + 3 = 9$, menos una baja resiliencia (1), lo que da un resultado de $9 - 1 = 8$.

Los resultados se expresan en mapas utilizando el sistema de información geográfica (SIG) ArcGIS 10.8.

3 RESULTADOS

3.1 Intensidad de la ICU (amenaza)

La intensidad de la ICU promedio del conjunto de ciudades chilenas estudiadas mediante el método de Oke para el periodo presente es de 2.86 °C. La ciudad de Santiago presenta la mayor ICU, con un valor estimado de 9.2 °C, mientras que Hanga Roa registra el menor valor, con 0.6 °C, donde prácticamente no se evidencia el fenómeno. Para el futuro (2065) se estima, usando la adaptación a la ecuación de Oke, que el valor promedio de la ICU será de 4.26 °C. De esta forma se puede estimar un aumento de la intensidad en la ICU de 1.4 °C (Figura 4). Estos datos son similares al valor de ICU de varias ciudades chilenas mediante mediciones experimentales: en el caso de mediciones con estaciones meteorológicas oficiales, el valor promedio de ICU nocturna es 1.7 °C (Arica, Antofagasta, Calama, Valparaíso, Los Andes, Santiago, Curicó, Talca, Chillán y Osorno, Coyhaique y

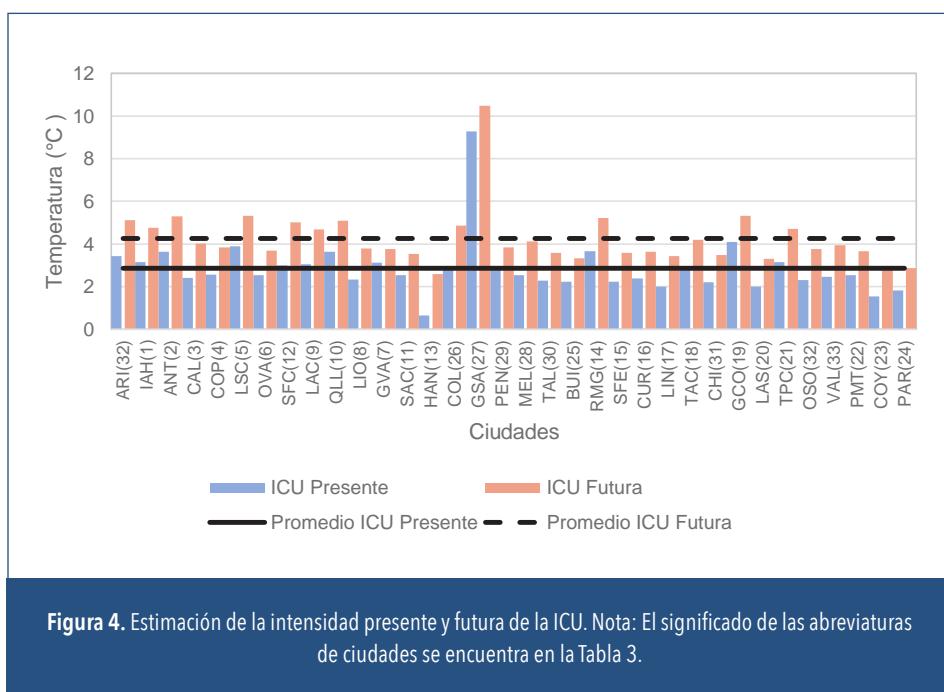


Figura 4. Estimación de la intensidad presente y futura de la ICU. Nota: El significado de las abreviaturas de ciudades se encuentra en la Tabla 3.

Punta Arenas), mientras que la ICU calculada con registradores HOBO, instalados en algunas ciudades chilenas (Antofagasta, Valparaíso, Santiago, Chillán y Concepción), que miden la temperatura del aire cada hora, los datos de ICU nocturna para las ciudades analizadas varían entre 2.5 °C (Chillán) y 6.8 °C (Santiago) (Henríquez et al., 2021).

En Santiago se proyecta la ICU más intensa (10.4 °C) para el año 2065; luego le siguen Gran Concepción, La Serena-Coquimbo y Antofagasta con valores en torno a los 5.3 °C. Las ICU más bajas corresponden a Hanga Roa, Punta Arenas y Coyhaique, con valores entre 2.6 y 2.9 °C, respectivamente. En todas las ciudades se proyecta un aumento de la ICU, destacando las ciudades de San Felipe, Hanga Roa y Colina con un aumento esperado por sobre 1.9 °C. Por el contrario, Valparaíso, Peñaflor y San Antonio muestran el menor crecimiento de la intensidad de la ICU con valores bajo 1.0 °C.

3.2 Crecimiento urbano y aumento de la población (exposición)

La exposición de la población urbana ha aumentado un 40 % entre 1992 y 2017, pasando de 8.7 millones de personas a 10.5 millones (Tabla 3). Se observa que la ciudad de Santiago es la más expuesta ante la ICU, con una población mayor a 6 millones de personas y que concentra más de la mitad de la población urbana del conjunto de ciudades estudiadas, lo que demuestra la gran macrocefalia del sistema nacional. Además, este valor tiene un estrecho correlato con la gran superficie ocupada por la metrópoli (75,500 ha). Luego le siguen las conurbaciones de Gran Valparaíso y Gran Concepción, con una población mayor a los 700 000 habitantes. El resto de las ciudades corresponden a lo que se entiende como ciudades intermedias, con población superior a 50 000 habitantes, excepto Coyhaique, que tiene una cifra levemente menor, pero corresponde a un capital regional y la localidad de Hanga Roa en Isla de Pascua con una población sobre los 7 000 habitantes.

Esta tendencia demográfica se mantiene a futuro. Se espera que la población urbana aumente 30 % en el 2065 respecto al 2017. En este escenario, Santiago sigue concentrando la mayor cantidad de población urbana (44.5 %) y de superficie urbana (85 000 hectáreas). El resto de las ciudades siguen creciendo a tasas importantes, destacando, aparte de las metrópolis

principales de Valparaíso y Concepción, las ciudades de Antofagasta, La Serena-Coquimbo, Iquique, Rancagua, Talca y Temuco, con una población proyectada por sobre los 300 000 habitantes.

Ciudad	1992 diurna	2002	2017	2065 (proyectada)
Gran Santiago (GSA)	4,295,593	5,428,590	6,139,087	6,903,681
Gran Valparaíso (GVA)	750,713	803,683	896,528	982,832
Gran Concepción (GCO)	610,380	666,381	719,944	801,687
La Serena-Coquimbo (LSC)	220,172	296,253	399,450	657,577
Antofagasta (ANT)	225,316	285,255	348,517	460,882
Iquique-Alto Hospicio (IAH)	150,659	214,586	293,068	357,561
Rancagua-Machalí-Gultro-Los Lirios (RMG)	204,119	239,290	290,029	512,490
Temuco-Padre Las Casas (TPC)	210,587	260,783	277,529	318,179
Talca-Culenar (TAC)	159,861	189,722	236,347	386,175
Arica (ARI)	161,333	175,441	202,131	231,549
Puerto Montt (PMT)	110,139	153,118	169,736	218,104
Chillán (CHI)	145,759	146,701	164,270	196,135
Calama (CAL)	106,970	126,135	157,575	255,683
Copiapó (COP)	98,188	125,983	150,804	196,788
Valdivia (VAL)	112,712	122,750	150,048	224,555
Quillota-La Calera-Hijuelas-La Cruz (QLL)	113,308	128,874	149,159	260,235
Osorno (OSO)	114,239	132,245	147,666	164,494
Los Ángeles (LAS)	94,716	117,972	143,023	160,066
Curicó (CUR)	77,733	93,447	125,275	214,167
Punta Arenas (PAR)	109,110	116,005	123,403	135,661
San Antonio-Cartagena-Las Cruces-Santo Domingo (SAC)	89,209	106,101	118,668	155,391

TABLA 3. (CONTINUACIÓN)

Ciudad	1992 diurna	2002	2017	2065 (proyectada)
Colina (COL)	52,769	58,769	88,858	266,399
Peñaflor (PEN)	79,520	63,209	82,959	93,700
Ovalle (OVA)	53,515	66,405	75,864	100,612
Linares (LIN)	59,658	65,133	73,602	134,453
Melipilla (MEL)	45,722	53,522	72,212	187,157
Los Andes-Calle Larga (LAC)	48,573	60,093	69,041	149,416
Buin (BUI)	33,059	40,091	65,607	100,163
San Felipe (SFC)	49,793	59,801	64,543	207,266
San Fernando (SFE)	42,684	49,519	58,367	113,788
Talagante (TAL)	37,198	49,957	56,878	111,069
Limache-Olmué (LIO)	37,995	45,327	50,998	128,182
Coyhaique (COY)	36,376	44,850	49,667	95,751
Hanga Roa (HAN)	2,686	3,304	7,163	15,608
Total	8,740,364	10,589,295	12,218,016	15,497,456

3.2 Distribución espacial de la vulnerabilidad

A partir de la aplicación del SoVI se obtuvieron seis factores que explican el 69.4 % del fenómeno evaluado para las ciudades analizadas (Tabla 4). Entre los factores determinados destaca el estatus socioeconómico de los grupos más vulnerables, como las mujeres jefas de hogar y los menores de 14 años, con una varianza del 15.1 %. En el caso de las mujeres, ellas suelen percibir una mayor carga social frente a un desastre, puesto que, aparte de tener que conservar su nivel económico, que de por sí es menor al de los hombres, deben mantener su rol de cuidadoras de la familia e hijos, lo que se incrementa cuando la mujer es jefa de un hogar monoparental (Cutter et al., 2003). En el caso de los menores de 14 años, ellos son actores dependientes

económicamente, por lo que frente a un desastre su capacidad va a depender específicamente de sus cuidadores (Bronfman et al., 2021).

En segundo lugar, se obtuvo el factor pobreza multidimensional, en el cual es posible advertir diversas características que marcan la vulnerabilidad de las principales ciudades del país. Entre ellas también destacan características económicas, pero esta vez ligadas a indicadores de baja escolaridad y alto analfabetismo, bajos niveles de capital social y al desarrollo de sectores económicos de origen extractivista como la pesca, la agricultura y la minería (Bronfman et al., 2021; Rufat et al., 2015).

Entre los demás factores, es posible advertir que la calidad de la vivienda, determinada por la materialidad de las construcciones (muros, techos y pisos), es un factor que en la actualidad puede influir en el desarrollo de un desastre, puesto que las viviendas no presentan la capacidad para hacer frente a una eventual amenaza (de Loyola Hummell et al., 2016). Se suma a este factor la concentración de población adulta mayor, la cual se relaciona con la dependencia económica que ejerce este grupo sobre la población económicamente activa, como por la falta de movilidad que esta población puede poseer y que, por tanto, la hacen vulnerable físicamente a una amenaza (Daddoust et al., 2018).

Finalmente, entre los componentes que presentan una menor explicación se encuentra la calidad de vida de los inmigrantes (8.1 %), los cuales

TABLA 4. MATRIZ DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LA VULNERABILIDAD (ACP)

Factores	Varianza factorial (%)	Componentes de vulnerabilidad
Factor 1	15.1 %	Estatus socioeconómico en grupos vulnerables
Factor 2	14.7 %	Pobreza multidimensional
Factor 3	12.8 %	Calidad de la vivienda
Factor 4	10.4 %	Concentración de población dependiente
Factor 5	8.1 %	Calidad de vida de inmigrantes
Factor 6	8.0 %	Acceso a servicios básicos
Varianza total	69.4 %	

han aumentado considerablemente durante la última década en el país, y el acceso a servicios básicos (8 %), relacionado con el acceso a la red de alcantarillado y agua potable.

En cuanto a los niveles de vulnerabilidad, estos se obtuvieron en primer lugar para cada zona censal del estudio y, posteriormente, se calcularon para cada una de las 34 ciudades. En la Tabla 5 se observan los valores obtenidos.

TABLA 5. VALORES DE SOVI

Ciudad	SOVI	Ciudad	SOVI
Antofagasta	-1.09	Curicó	1.97
Gran Santiago	-0.87	Osorno	2.35
Gran Valparaíso	-0.39	Buin	1.33
Gran Concepción	-0.84	Peñaflor	0.09
Punta Arenas	0.53	Hanga Roa	0.93
Temuco-Padre Las Casas	0.51	Puerto Montt	1.83
Valdivia	0.02	San Felipe	2.69
Chillán-Chillán Viejo	1.53	San Fernando	2.55
Iquique-Alto Hospicio	0.46	Colina	-0.8
Talca-Culenar	1.08	Ovalle	2.78
Copiapó	2.22	Limache-Olmué	2.02
Coyhaique	-0.44	Linares	3.45
Calama	1.11	Los Ángeles	2.01
La Serena-Coquimbo	1.05	Talagante	0.95
Quillota-La Calera-Hijuelas-La Cruz	1.68	San Antonio-Cartagena-Las Cruces-Santo Domingo	3.09
Arica	1.43	Los Andes-Calle Larga	2.47
Rancagua	1.48	Melipilla	2.53

A partir de los resultados expuestos se determina que Linares es la ciudad con mayor vulnerabilidad social con un valor de 3.45, mientras que la ciudad menos vulnerable es Antofagasta con un valor de -1.09.

3.3 Indicadores de resiliencia comunitaria

A partir de la metodología se obtuvieron cuatro componentes que explican la resiliencia comunitaria en un 68.3 % para las ciudades analizadas (Tabla 6). Entre los componentes destaca en mayor grado, con un 26.2 % de la varianza del modelo de resiliencia comunitaria, el acceso al personal médico de salud, lo que sugiere que las ciudades chilenas presentan una capacidad adecuada para que las comunidades puedan acceder a personal médico. En este sentido, cabe destacar que, frente a desastres sconaturales, la salud no solo pasa por problemas físicos, sino que las condiciones psicosociales se tornan fundamentales para evitar un impacto potencialmente traumático (Boon, 2014).

En segundo lugar, se obtuvo el factor estatus socioeconómico con un 15.5 % de la varianza del modelo. Este componente permite inferir que la comunidad presenta la capacidad económica y características sociales óptimas para poder enfrentar y disminuir el impacto frente a un potencial desastre o cambio (Cutter et al., 2008). No obstante, cabe destacar que este factor se encuentra de manera similar en los resultados de vulnerabilidad social, pero en específico para los grupos más vulnerables como mujeres y niños.

Entre los últimos factores se encuentran los componentes capital social y educación con un 14.7 % y un 11.8 % de la varianza total, respectivamente. El primero hace referencia a los recursos y formas de organización que presentan las comunidades para hacer frente a los desastres, tales como los vínculos interpersonales o las redes de contacto, los cuales muchas veces se reflejan en los niveles de participación que tiene la población en sus comunidades (Cutter et al. 2008; Norris et al. 2008). El segundo factor hace referencia a que un mayor nivel educativo se refleja en una mayor capacidad para enfrentar un desastre, entendiendo que reconocer potenciales amenazas y su funcionamiento permite a la población tomar medidas para poder sobrelevarlas.

En cuanto a los niveles de resiliencia, estos fueron obtenidos en primer lugar para los distritos y posteriormente para las ciudades en análisis, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 7).

TABLA 6. MATRIZ DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LA RESILIENCIA COMUNITARIA (ACP)

Factores	Varianza factorial (%)	Componentes de resiliencia comunitaria
Factor 1	26.2 %	Acceso a personal médico (salud)
Factor 2	15.5 %	Estatus socioeconómico
Factor 3	14.7 %	Capital social
Factor 4	11.8 %	Educación
Varianza total	68.3 %	

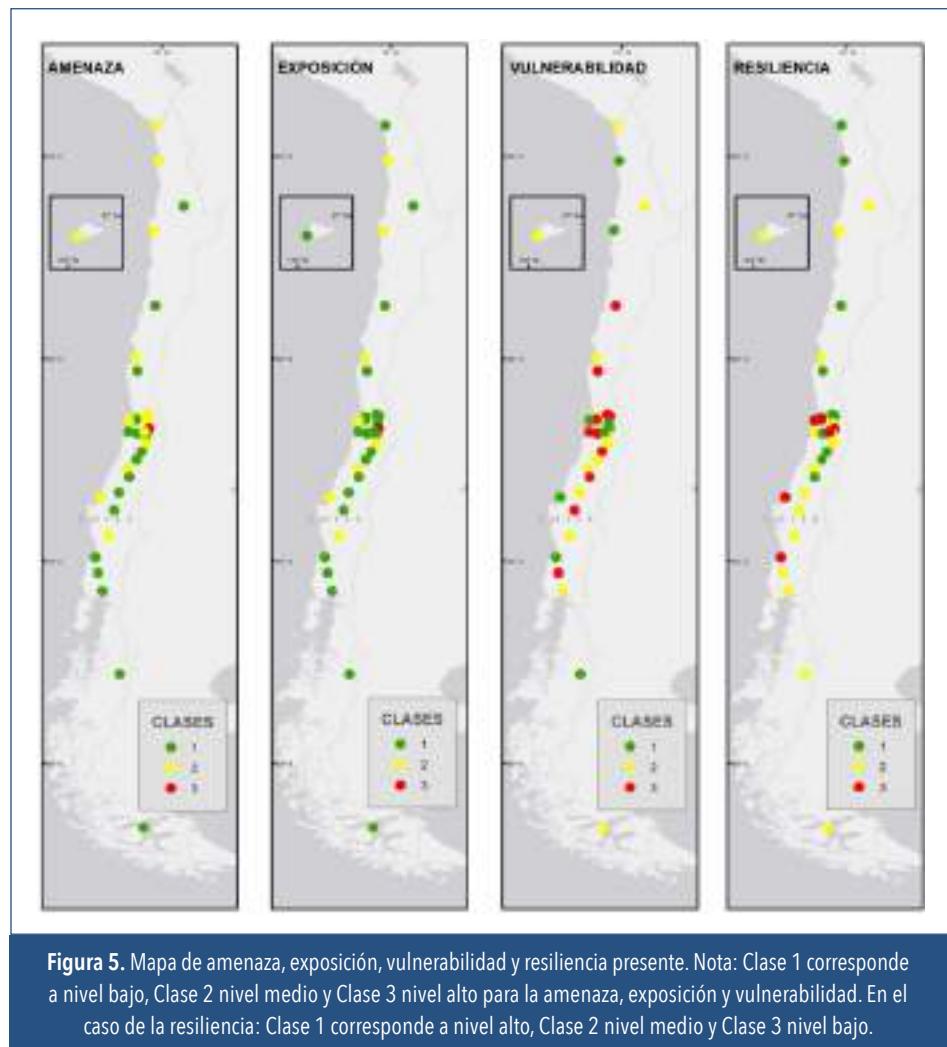
TABLA 7. VALORES DE RESILIENCIA COMUNITARIA (BRIC)

Ciudad	Valor BRIC	Ciudad	Valor BRIC
Antofagasta	-0.7	Curicó	-2.56
Gran Santiago	0.45	Osorno	-0.42
Gran Valparaíso	0.69	Buin	-1.15
Gran Concepción	2.82	Peñaflor	0.27
Punta Arenas	0.19	Hanga Roa	-0.95
Temuco-Padre Las Casas	-0.40	Puerto Montt	0.76
Valdivia	0.65	San Felipe	-2.26
Chillán-Chillán Viejo	-1.58	San Fernando	-2.03
Iquique-Alto Hospicio	-2.47	Colina	-0.93
Talca-Culenar	-1.66	Ovalle	-3.72
Copiapó	-2.90	Limache-Olmué	0.42
Coyhaique	-1.67	Linares	-2.44
Calama	-1.08	Los Ángeles	-1.73
La Serena-Coquimbo	-1.24	Talagante	0.52
Quillota-La Calera-Hijuelas-La Cruz	-2.16	San Antonio-Cartagena-Las Cruces-Santo Domingo	-0.45
Arica	-2.03	Los Andes-Calle Larga	-2.81
Rancagua	-1.41	Melipilla	-2.39

Con relación a los resultados expuestos, se determina que Gran Concepción es la ciudad con mayor resiliencia, con un valor de 2.82, mientras que la ciudad menos resiliente es Ovalle, con un valor de -3.72.

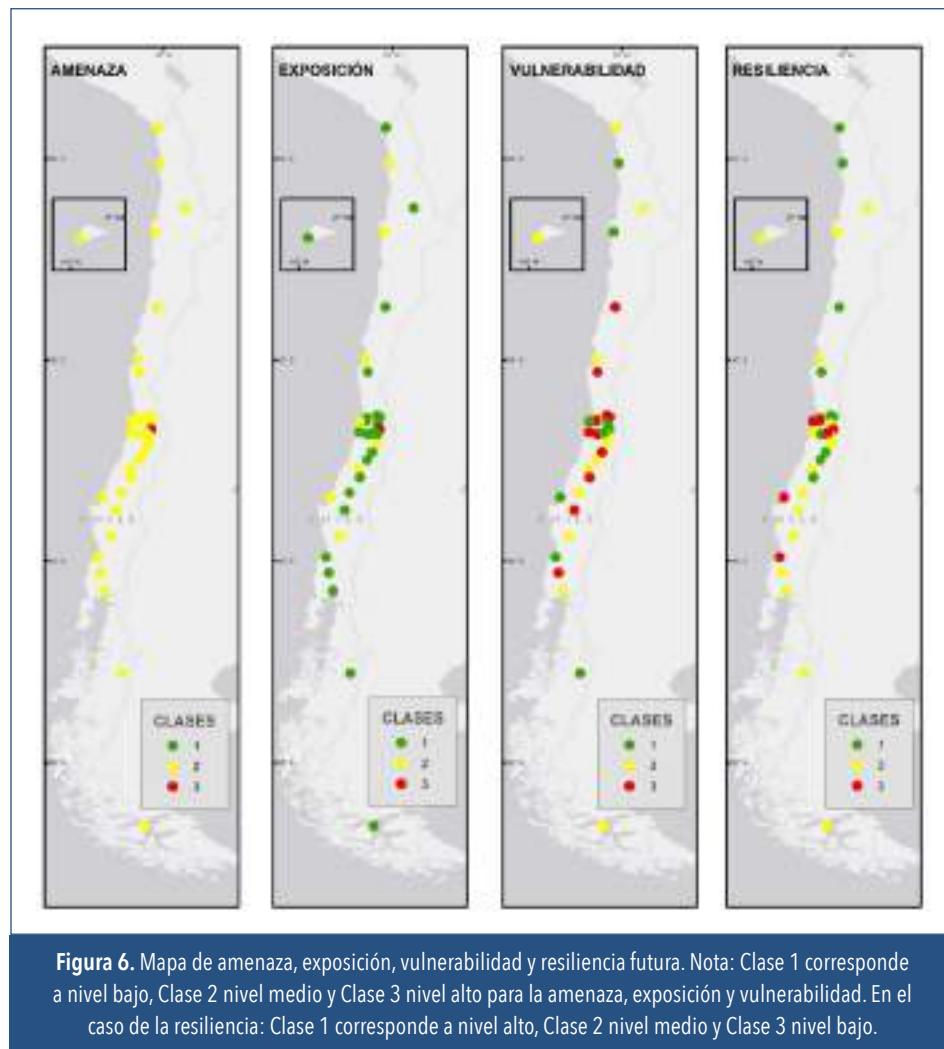
3.4 Evaluación del riesgo por ICU

Los resultados normalizados muestran que la amenaza y exposición aumentarían su intensidad a futuro, mientras que la vulnerabilidad y resiliencia



comunitaria mantienen su nivel por las restricciones anteriormente mencionadas. La distribución espacial de estos factores para la situación presente y futura se aprecia en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

Al integrar estos cuatro factores en el mapa de riesgo ante ICU se puede observar que el riesgo variaría de una condición de bajo nivel de 2.91 en el presente a un nivel a 3.5 a futuro, que se puede calificar como riesgo medio. Los cambios pronosticados permiten advertir que catorce ciudades se mantienen en el mismo nivel de riesgo, mientras que veinte ciudades aumentan



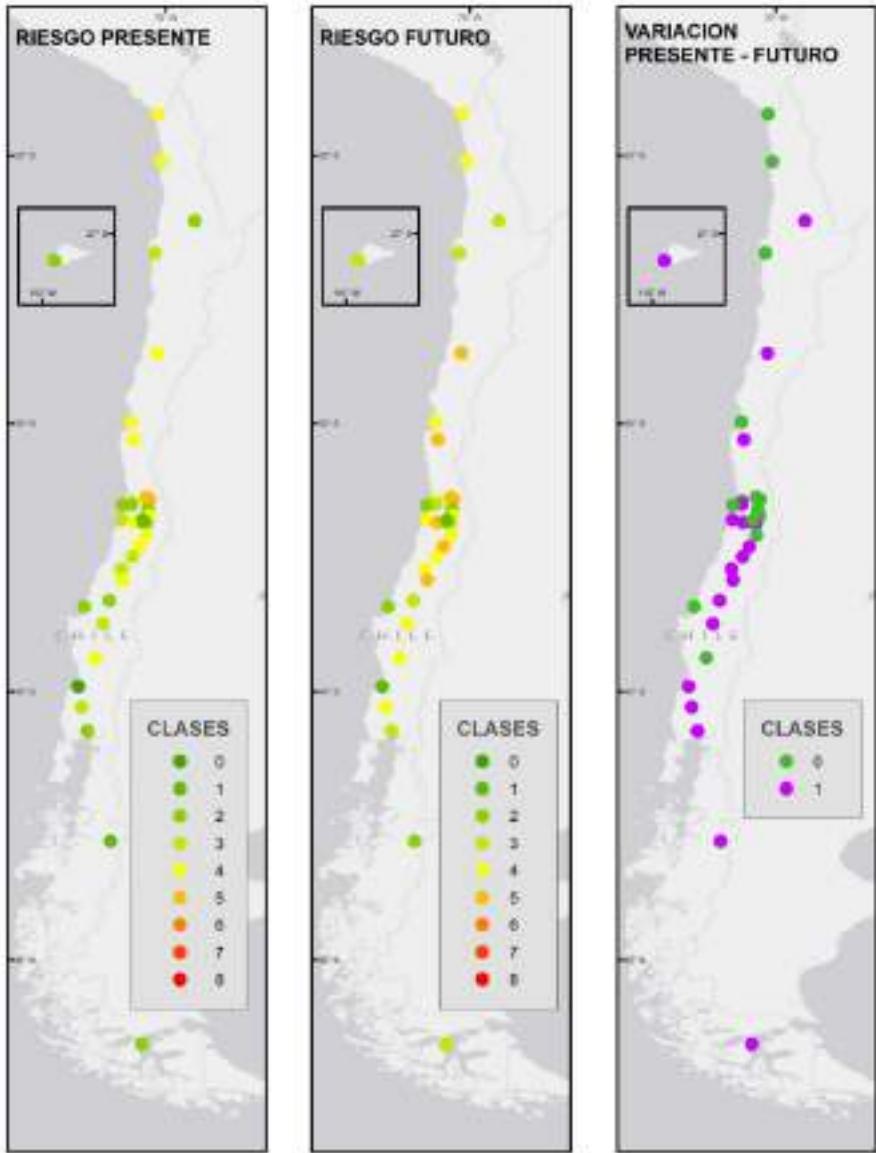


Figura 7. Mapa de riesgo por ICU. Nota: Clases 0-2, bajo riesgo; Clases 3-5, riesgo medio; Clases 6-8, alto riesgo. Variación: 0 sin variación; 1 con variación presente-futuro. En el caso de la resiliencia: Clase 1 corresponde a nivel alto, Clase 2 nivel medio y Clase 3 nivel bajo.

su riesgo (Figura 7). Ninguna ciudad disminuye su condición de riesgo climático. En términos espaciales se puede afirmar que las ciudades que tienen mayor riesgo son las ubicadas en Chile central, en especial las ubicadas en el valle central. Las ciudades costeras y las ubicadas en el extremo sur muestran un bajo nivel de riesgo.

4 DISCUSIÓN

Los datos obtenidos permiten una primera aproximación para elaborar un diagnóstico y jerarquía de ciudades que se encuentran mayormente amenazadas, en relación con la intensidad de la ICU y los efectos del cambio climático. Asimismo, se avanzó en la propuesta de un indicador de riesgo que incluye un indicador de resiliencia comunitaria, que define el grado de preparación con el que cuenta cada ciudad para enfrentar la amenaza de la ICU. No obstante, los resultados obtenidos representan a cada ciudad con un único valor de acuerdo con los factores constituyentes del riesgo, lo que puede invisibilizar importantes diferencias intraurbanas en relación con los factores evaluados, sobre todo considerando que estudios de clima urbano en algunas ciudades chilenas han demostrado que el comportamiento de la temperatura urbana representa un amplio mosaico asociado a las diferencias sociales y económicas de los barrios de la ciudad, lo que se traduce en grandes diferencias espaciales, representadas por distintas intensidades de la ICU: por ejemplo, Smith y Henríquez (2019) en la ciudad de Chillán o Smith y Romero (2016) en la ciudad de Santiago.

Lo anterior se reproduce también para la vulnerabilidad y la resiliencia comunitaria, que depende de las condiciones sociales y económicas de la población y que, considerando la fuerte segregación socioespacial de las ciudades latinoamericanas, se traduciría en importantes diferencias al interior de cada ciudad estudiada.

En la actualidad no existen muchas evidencias sobre la sensibilidad a las condiciones ambientales y menos aún del clima en la construcción de la ciudad. La planificación consciente al clima (Oke et al., 2017) y el diseño de los espacios públicos abiertos que ofrece el acceso a la sombra, y el acceso/protección al viento o el sol, es importante para generar condiciones que

permitan a las ciudades y su población adaptarse (Wilson et al., 2008) y mejorar su calidad de vida. La evidencia bibliográfica da cuenta de que los instrumentos de planificación urbana se basan en parámetros estético-formales y funcionales y no han sido capaces de incorporar la complejidad de los climas urbanos (Mills et al., 2010). Lo anterior se puede explicar por limitaciones económicas, falta de conocimiento, prioridades, planificación a corto plazo (Eliasson, 2000), carencias de datos meteorológicos o datos inadecuados (Alcoforado et al., 2009), conflictos de intereses y falta de voluntad política (Andrade, 2005). A su vez, los documentos e informes elaborados en relación con la adaptación y mitigación al cambio climático han destacado la importancia de resaltar el clima urbano en la toma de decisiones.

A nivel nacional, el Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades 2018-2022 es un gran avance en materia de política pública en adaptación, aunque algunos indicadores propuestos son de mitigación y no de adaptación. Una parte importante de las estrategias presentadas en este plan requieren de su implementación a nivel local, a través de los municipios —que conforman cada ciudad—, obligando a movilizar recursos, levantar información e instalar capacidades que dependen del nivel de recursos de cada comuna. Una estrategia para enfrentar lo anterior podría ser la creación de la Red Chilena de Municipios ante el Cambio Climático (RedMuniCC) del año 2014, que es coordinada por la Organización Adapt Chile y que presta apoyo y colaboración técnica a todos los municipios que de manera voluntaria se comprometen a planificar y gestionar su territorio considerando los desafíos que impone el escenario de cambio climático (<https://actionlac.net/redmunicc/>). Actualmente, la Red cuenta con 59 de los 346 municipios que existen en Chile (lo que representa un 17 % del total), 39 de los cuales cuentan con su perfil climático y 25 de ellos con un Plan Local de Cambio Climático (PLCC) vigente.

De las ciudades estudiadas, solo 11 forman parte (por completo) de la RedMuniCC. Se agregan además algunas comunas que son parte de conurbaciones y áreas metropolitanas; por ejemplo, 18 comunas del área metropolitana de Santiago (AMS), cuatro comunas del área metropolitana de Concepción (AMC) y solo una en el área metropolitana de Valparaíso (AMV). Solo algunas ciudades y comunas han derivado en la formula-

ción de su PLCC, de norte a sur: Quillota, San Antonio, Colina, Talagante, Temuco, la comuna de Chillán Viejo (parte de la ciudad de Chillán), San Pedro de la Paz y Penco en el AMC, y en el AMS las comunas de Independencia, Providencia, Santiago, La Pintana, Vitacura, Peñalolén, La Reina, Macul, Maipú, Quilicura y Renca.

Por otra parte, la Ley 21364 se refiere a la Gestión del Riesgo de Desastres para Chile, estableciendo comités y planes de reducción de riesgo a diferentes escalas, nacional, regional y comunal. Para el financiamiento de este último, el municipio puede solicitar que sean adjudicados recursos del fondo nacional dispuesto para estos fines (Art. 41). Si bien cada comuna deberá contar con dicho comité, este tiene un énfasis hacia el tratamiento y respuesta de la emergencia (Art. 8) más que a la planificación adaptativa.

Finalmente, es importante destacar la importancia de contar con indicadores que permitan hacer un seguimiento del riesgo climático, como el propuesto en esta investigación. En este sentido, se destaca el aporte de ARCLim en el seguimiento y mapeo de factores de riesgo climático a nivel nacional. Los indicadores son muy importantes para comunicar y evaluar los avances y retrocesos en la adaptación al cambio climático, sin embargo, se necesita avanzar en la inclusión de indicadores de adaptación y resiliencia como lo hace esta investigación tanto en ARCLim como en las políticas y planes de adaptación urbana. En términos de amenaza, es fundamental disponer de modelos climáticos o estaciones meteorológicas en distintos usos de suelo urbano y en el medio rural para realizar un cálculo preciso de la ICU. En este ámbito, es importante resaltar que el método para estimar la ICU presente y futura mediante la fórmula propuesta por Oke usando población y viento es una generalización como todo modelo, ya que la ICU ha demostrado tener múltiples factores espaciales y temporales que afectan su distribución al interior de las ciudades, por lo que este se debe entender como una aproximación al fenómeno considerando la complejidad e incertidumbre de los factores incidentes. En relación a la exposición, los resultados muestran las ventajas del modelo de cambio de uso de suelo urbano para estimar las manchas urbanas futuras y con ello la futura exposición, especialmente de ciudades que a futuro crecerán de manera significativa o experimentarán procesos de conurbación. La vulnerabilidad, por su parte, corresponde a un indicador multidimensional

fundamental para identificar y focalizar los recursos que permitan a la población sobreponerse de mejor manera a las amenazas no solo climáticas, sino naturales, económicas y sanitarias, entre otras. El indicador de resiliencia comunitaria nos ayuda a potenciar y reforzar aquellas condiciones de base que nos permitan adaptarnos y enfrentar la crisis climática que ya estamos viviendo. Por último, el indicador de riesgo es una síntesis de los factores constituyentes, en este caso realizado con una metodología simple y pedagógica, que permite a futuro evaluar el desempeño de medidas de adaptación que se puedan implementar en las ciudades, como por ejemplo: infraestructura verde y azul, eficiencia energética de viviendas y edificios, mejoramiento de espacios públicos, optimización del recurso agua, entre otras. Muchas de estas medidas pasan por cambios normativos, tecnológicos, políticos y, sobre todo, por un nuevo modelo de gobernanza.

5 CONCLUSIONES

La ICU es uno de los fenómenos climáticos-urbanos más complejos, tanto por las dimensiones urbanas que inciden en él como por las condiciones climáticas y geográficas locales y globales, como el efecto de cambio climático. Por tal razón, el cálculo de riesgo climático por ICU resulta un gran desafío, especialmente considerando las múltiples dimensiones que lo conforman, así como por la visión prospectiva que se utilizó. En este sentido, la presente propuesta teórico-metodológica ofrece una posibilidad de medir este complejo fenómeno de riesgo por ICU para los planificadores urbanos, de modo que sea posible sugerir medidas y propuestas orientadas a disminuir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia. Como se indicó anteriormente, se debe considerar como limitante que la estimación de la ICU se realizó con base en un modelo general que no considera todos los factores incidentes en la ICU, ya que el foco está puesto en la proyección y el riesgo futuro y no en la distribución intraurbana. Sin embargo, es un método perfectible, especialmente considerando la posibilidad de incluir nuevas variables, especialmente medidas de adaptación y mitigación que permitan aumentar el factor de resiliencia y aminorar el factor de vulnerabilidad, y de esta forma disminuir el valor de riesgo final.

Los principales riesgos se encuentran en las grandes metrópolis, obviamente determinados por la gran exposición y amenaza de estas extensas áreas urbanas. Sin embargo, si mejoramos la resiliencia y disminuimos la vulnerabilidad el impacto se puede aminorar. Hay ciudades medias y menores que tienen una baja ICU pero debido al cambio climático y su crecimiento urbano pueden aumentar su nivel de riesgo, por lo que es urgente implementar medidas y acciones de adaptación para enfrentar de manera anticipada este riesgo. Muchas de estas medidas pasan por mejorar las condiciones térmicas de vivienda o invertir en espacios públicos de calidad, lo cual debe incluirse en los planes, normativas y modelos de gobernanza urbana, especialmente para ciudades conformadas por más de una comuna.

Algunas recomendaciones futuras pasan por aplicar este enfoque a una escala espacial más detallada, por ejemplo, a nivel distrital o barrial; así como también hay que recordar que la amenaza de las ICU también puede tener aspectos positivos, especialmente en invierno, donde una mayor temperatura del ambiente urbano puede ayudar a reducir los costos de calefacción, especialmente de las viviendas más precarias.

Como desafío futuro, este enfoque se podría emplear para analizar otro tipo de riesgos, como aquellos asociados a fenómenos hidrometeorológicos, como incendios, inundaciones o remoción en masa. Tal como indica Wu et al. (2023), eventos extremos cálidos y húmedos pueden ser más frecuentes en el futuro, por lo que es probable que también aumenten los peligros. En este mismo sentido, es necesario explorar la forma de incorporar este tipo de estudios en el diseño urbano de nuestras ciudades y mejorar la respuesta de la ciudad ante eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de Atlas de Riesgos Climáticos (ARClim) del Ministerio de Medio Ambiente de Chile, en particular se agradece al Centro de Cambio Global UC y al Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)². Reconocemos también el apoyo a los proyectos de investigación Fondecyt/ANID 1220688, 11191011 y de los Centros de investigación CEDEUS, ANID/FONDAP 1522A0002 y CIGIDEN, ANID/FONDAP 1522A0005.

REFERENCIAS

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-81.
- Alcoforado, M. J., H. Andrade, A. Lopes & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning: The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning*, 90(1-2), 56-65.
- Andrade, H. (2005). O Clima Urbano-Natureza, Escalas de Análise e Aplicabilidade. *Finisterra, Revista Portuguesa de Geografia*, 40(80), 67-91.
- Banford, A. & Froude, C. K. (2015). Ecofeminism and natural disasters: Sri Lankan women post-tsunami. *Journal of International Women's Studies*, 16(2), 170-187.
- Barton, J. R. (2009). Adaptación al cambio climático en la planificación de ciudades-regiones. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43, 5-30.
- Birkmann, J. (2007). Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, 7(1), 20-31.
- Boon, H. J. (2014). Disaster resilience in a flood-impacted rural Australian town. *Natural Hazards*, 71(1), 683-701.
- Bronfman, N. C., Repetto, P. B., Guerrero, N., Castañeda, J. V & Cisternas, P. C. (2021). Temporal evolution in social vulnerability to natural hazards in Chile. *Natural Hazards*, 107(2). 1757-1784.
- Chen, I. H. (2021). New conceptual framework for flood risk assessment in Sheffield, UK. *Geographical Research*, 59(3), 465-482.
- Cross, J. A. (2014). Disaster devastation of US communities: long-term demographic consequences. *Environmental Hazards*, 13(1), 73-91.
- Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to Environmental Hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), 529-539.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J. & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-61.
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E. & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18(4), 598-606.
- Cutter, S. L., Ash, K. D. & Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 29, 65-77.
- Daddoust, L., Khankeh, HR., Ebadi, A., Sahaf, R., Nakhaei, M. & Asgary, A. (2018). The Social Vulnerability of Older People to Natural Disasters: An Integrative Review. *Health in Emergencies & Disasters Quarterly*, 4(1), 5-14.

- de Loyola Hummell, B. M., Cutter, S. L. & Emrich, C. T. (2016). Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(2), 111-22.
- Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 31-44.
- Fatemi, F., Ardalan, A., Aguirre, B., Mansouri, N. & Mohammadfam, I. (2017). Social vulnerability indicators in disasters: Findings from a systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 22, 219-227.
- Frigerio, I. & De Amicis, M. (2016). Mapping social vulnerability to natural hazards in Italy: A suitable tool for risk mitigation strategies. *Environmental Science & Policy*, 63, 187-196.
- GIZ & EURAC (2017). *Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook. Guidance on how to apply the Vulnerability Sourcebook's approach with the new IPCC AR5 concept of climate risk*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T. & Zêzere, J. L. (2014). Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal. *Journal of Risk Research*, 18(5), 651-674.
- Heinz Center (2002). *Human Links to Coastal Disasters*. The H. John Heinz III Center For Science, Economics and the Environment.
- Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Ediciones UC.
- Henríquez, C., Qüense, J., Contreras, P., Guerrero, N., Smith, P. & González, F. (2020). *Informe Proyecto ARCLim: Ciudades*. Centro de Cambio Global UC, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y CEDEUS coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.
- Henríquez, C., Smith, P., Contreras, P. & Qüense, J. (2021). Variación en la intensidad de la isla de calor arbana por efecto del cambio climático en ciudades chilenas. *Geographicalia* (73), 133-54.
- INE (2017). *Censo de Población y Vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas.
- INE (2019). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*. Instituto Nacional de Estadísticas.
- INE & MINVU (2018). *Metodología para Medir el Crecimiento Urbano de las Ciudades de Chile*. Departamento de Geografía, Instituto Nacional de Estadísticas / Comisión de Estudios Habitacionales y Urbanos, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

- IPCC (2021). Summary for Policymakers. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell & N. Caud (eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution of to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press / Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Khan, S. (2012). Vulnerability assessments and their planning implications: A case study of the Hutt Valley, New Zealand. *Natural Hazards*, 64(2), 1587-1607.
- Lee, Y.-J. (2014). Social vulnerability indicators as a sustainable planning tool. *Environmental Impact Assessment Review*, 44, 31-42.
- Macintyre, H. L., Heaviside, C., Cai, X. & Phalkey, R. (2021). The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. *Environment International*, 154.
- McEntire, D. A. (2005). Why vulnerability matters: Exploring the merit of an inclusive disaster reduction concept. *Disaster Prevention and Management*, 14(2), 206-222.
- Measham, T. G., Preston, B. L., Smith, T. F., Brooke, C., Gorddard, R., Withycombe, G. & Morrison, C. (2011). Adapting to climate change through local municipal planning: barriers and challenges. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(8), 889-909.
- Menoni, S., Molinari, D., Parker, D., Ballio, F. & Tapsell, S. (2012). Assessing multi-faceted vulnerability and resilience in order to design risk-mitigation strategies. *Natural Hazards*, 64(3), 2057-2082.
- Mileti, D. & Noji, E. (1999). *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Joseph Henry Press
- Mills, G., Cleugh, H., Emmanuel, R., Endlicher, W., Erell, E., McGranahan, G., Ng, E., Nickson, A., Rosenthal, J. & Steemer, K. (2010). Climate Information for Improved Planning and Management of Mega Cities (Needs Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 228-246.
- Ministerio de Desarrollo Social (2017). *Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional*. CASEN. Ministerio de Desarrollo Social.
- Ministerio de Educación (2021). Centro de Estudios MINEDUC. *Directorio de Establecimientos Educacionales*. Ministerio de Educación.
- Ministerio de Salud (2018). *Estadísticas de Salud*. Departamento de Estadísticas e Información e Información de Salud, Ministerio de Salud.

- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2022). *Catastro Nacional de Campamentos*. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Mitchell, D. M., Heaviside, C., Vardoulakis, S., Huntingford, C., Masato, G., Guillod, B. P., Frumhoff, P. C., Bowery, A., Wallom, D. & Allen, M. (2016). Attributing human mortality during extreme heat waves to anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, 11(7).
- Morrow, B. H. (2008). *Community Resilience: A Social Justice Perspective*. CARRI Research Report 4, Community and Regional Resilience Initiative.
- Nakata, C. M. & de Souza, L. C. L. (2013). Verification of the influence of urban geometry on the nocturnal heat island intensity. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 7(2), 286-292.
- Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F. & Pfefferbaum, R. L. (2008). Community Resilience as a Metaphor, Theory, Set of Capacities, and Strategy for Disaster Readiness. *American Journal of Community Psychology* 41(1), 127-50.
- Oke, T. R. (2002). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Pica-Téllez, A., Garreaud, R., Meza, F., Bustos, S., Falvey, M., Ibarra, M., Duarte, K., Ormazábal, R., Dittborn, R. & Silva, I. (2020). *Informe Proyecto ARClim: Atlas de Riesgo Climático para Chile*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Platts-Fowler, D. & Robinson, D. (2013). *Neighbourhood Resilience in Sheffield: Getting By in Hard Times*. Sheffield Hallam University, Centre for Regional Economic and Social Research.
- Reisinger, A., Howden, M., Vera, C., Garschagen, M., Hurlbert, M., Kreibiehl, S., Mach J., K., Mintenbeck, K., Brian O'Neill, K., Pathak, M., Pedace, R., Pörtner, H., Poloczanska, E., Rojas Corradi, M., Sillmann, J., van Aalst, M., Viner, D., Jones, R., Ruane, A. & Ranasinghe, R. (2020). *The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross-working group discussions*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland.
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G. & Maroof, A. S. (2015). Social Vulnerability to Floods: Review of Case Studies and Implications for Measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14(P4), 470-486.

- Sarricolea, P. & Meseguer-Ruiz, O. (2019). *Urban Climates of Large Cities: Comparison of the Urban Heat Island Effect in Latin America*. En C. Henríquez & H. Romero (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Springer, pp. 17-32.
- Servicio de Impuestos Internos (2019). *Registros de Formularios 22, 29 y Declaraciones Juradas N° 1887, 1879 y 1827*. Departamento de Estudios Económicos y Tributarios de la Subdirección de Gestión Estratégica y Estudios Tributarios del Servicio de Impuestos Internos.
- Sherrieb, K., Norris, F. H. & Galea, S. (2010). Measuring Capacities for Community Resilience. *Social Indicators Research*, 99(2), 227-247.
- Smith, P. & Henríquez, C. (2019). Perception of thermal comfort in outdoor public spaces in the medium-sized city of Chillán, Chile, during a warm summer. *Urban Climate* (30).
- Smith, P. & Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 45-62.
- Springgate, B. F., Wennerstrom, A., Meyers, D., Allen, C. E., Vannoy, S. D., Bentham, W. & Wells, K. B. (2011). Building Community Resilience through Mental Health Infrastructure and Training in Post-Katrina New Orleans. *Ethnicity & Disease*, 21(S1), 20-29.
- Tejedor, E., Cuadrat, J. M., Saz, M. Á., Serrano-Notivoli, R., López, N. & Aladrén, M. (2016). *Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015*. En J. Olcina, A.M. Rico & E. Moltó (eds.), *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación del Territorio*. Asociación Española de Climatología, pp.141-151.
- UN (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. United Nations.
- Wein, A. & Rose, A. (2011). Economic resilience lessons from the ShakeOut earthquake scenario. *Earthquake Spectra*, 27(2), 559-573.
- Wilson, E., Nicol, F., Nanayakkara L. & Ueberjahn-Tritta, A. (2008). Public Urban Open Space and Human Thermal Comfort: The Implications of Alternative Climate Change and Socio-Economic Scenarios. *Journal of Environmental Policy and Planning*, 10(1), 31-45.
- Wu, H., Su, X. & Singh, V. P. (2023). Increasing risks of future compound climate extremes with warming over global land masses. *Earth's Future*, 11(9).
- Xu, Z., FitzGerald, G., Guo, Y., Jalaludin, Bin B. & Tong, S. (2016). Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: a systematic review and meta-analysis. *Environment international* (89-90), 193-203.

Enfoque multiescalar de los climas urbanos y los problemas socioambientales en Santiago de Chile

Hugo Romero¹, Pablo Sarricolea², Flávio Henrique Mendes³

¹ Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago de Chile. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1005-0269>. hromero@uchilefau.cl

² Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo y Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile, Santiago de Chile. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6679-2798>. psarricolea@uchilefau.cl

³ Departamento de Ciencias Forestales, Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidad de São Paulo, Piracicaba, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7628-4850>. friquemendes@usp.br

RESUMEN

Las diferencias climáticas observadas al interior de la ciudad de Santiago se asocian espacialmente con las disparidades socioeconómicas, dando cuenta de la segregación socioambiental que caracteriza a los espacios urbanos latinoamericanos. Para analizar dichas diferencias a la escala de los límites urbanos han sido considerados los valores promedio de las islas de calor y los cambios experimentados por sus distribuciones espaciales observando las temperaturas de la superficie terrestre (TST) registradas en días de invierno y verano del periodo 2001-2020, mediante el análisis de imágenes satelitales MODIS. A escala de barrios, las correlaciones entre TST, niveles socioeconómicos y coberturas vegetales demuestran los niveles de injusticia socioclimática. La vegetación se ha reducido en el invierno al interior y alrededor de la ciudad debido a la intensa sequía que ha afectado a Santiago por más de doce años, dificultando su asociación espacial con la dinámica

de las islas de calor urbano superficial (ICUS). La asociación espacial entre las TST, las temperaturas superficiales (obtenidas esta vez a partir de imágenes Landsat-7) y las tasas de contagio de covid-19 demuestra la importancia de los climas urbanos sobre la salud pública como un componente más de las injusticias socioambientales. A la escala del dosel urbano, la aplicación del modelo ENVI-met realizada en barrios seleccionados en función de sus contrastantes niveles socioeconómicos indica diferentes comportamientos de las temperaturas superficiales, factor de visibilidad del cielo, y la velocidad y dirección de los vientos, influyendo en la calidad de vida, cuyo mejoramiento debería ser una tarea prioritaria de las políticas públicas.

Palabras clave: islas de calor urbano, Santiago de Chile, socioclimas, injusticias climáticas.

ABSTRACT

The climatic differences observed within the city of Santiago are spatially associated with the socioeconomic disparities, giving account of the socio-environmental segregation that characterizes Latin American urban spaces. To analyze these differences at the scale of the urban limits, the average values of the heat islands and the changes experienced by their spatial distributions have been considered, observing the Land Surface Temperatures (TST) recorded on winter and summer days of the period. 2001-2020, through the analysis of MODIS satellite images. At the neighborhood scale, the correlations between TST, socioeconomic levels and vegetation cover demonstrate the levels of socio-climatic injustice. Vegetation covers have been reduced in winter in and around the city due to the intense drought that has affected Santiago for more than 12 years, hindering its spatial association with the dynamics of urban surface heat islands. The spatial association between the TST, surface temperatures (obtained this time from Landsat-7 images), and the contagion rates of COVID-19 demonstrates the importance of urban climates on public health as one more component of the socioenvironmental injustices. At the scale of the urban canopy, the application of the ENVI-met model carried out in se-

lected neighborhoods based on their contrasted socioeconomic levels indicates different behaviors of surface temperatures, Sky View Factor and the speed and direction of the winds, influencing the quality of life, whose improvement should be a priority task of public policies.

Keywords: urban heat islands, Santiago de Chile, socioclimates, climatic injustices.

1 INTRODUCCIÓN

Santiago, la ciudad capital de Chile, está situada en el centro del país (Figura 1), posee un clima tipo mediterráneo —con veranos secos y cálidos prolongados entre los meses de diciembre y marzo, y una estación de invierno fría y lluviosa entre junio y agosto— correspondiente a un paisaje semiárido desarrollado en la franja subtropical (33°S) del sudeste de Sudamérica. Se trata de una ciudad-región que con sus aproximadamente ocho millones de habitantes concentra más del 40 % de la población total del país. Para propósitos administrativos se encuentra dividida en comunas o municipios que corresponden, a su vez, a barrios diferenciados según su

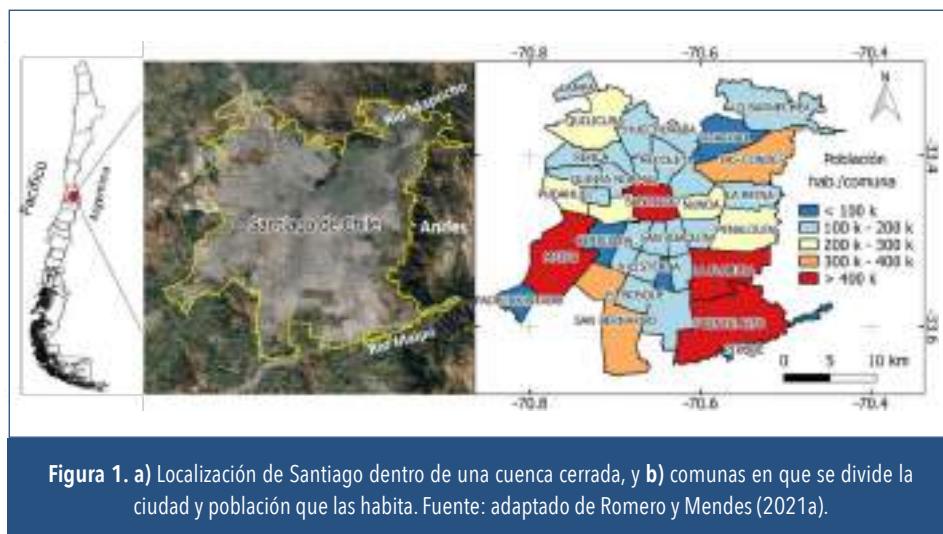


Figura 1. a) Localización de Santiago dentro de una cuenca cerrada, y b) comunas en que se divide la ciudad y población que las habita. Fuente: adaptado de Romero y Mendes (2021a).

posición al interior de la cuenca donde se ubica la ciudad y de acuerdo con las condiciones socioeconómicas de sus habitantes.

Santiago de Chile ocupa crecientemente la cuenca drenada por los ríos Maipo y Mapocho, que se alimentan de las lluvias invernales escasas e irregulares (en promedio 300 mm anuales que caen en veinte días al año) y principalmente de las nieves y glaciares depositados en la cordillera de los Andes, que limita la urbe por el oriente. La escasez de precipitaciones, relativa continentalidad de sus temperaturas, ausencia de ventilación, presencia constante de inversiones térmicas de radiación y subsidencia, y los consiguientemente altos niveles de contaminación atmosférica, constituyen desafíos relevantes para la gestión de sus climas urbanos, acción no considerada explícitamente hasta ahora en sus planes y programas de desarrollo (Mendes et al., 2020; Romero, 2019).

A mesoescala, al interior de los límites urbanos, los usos y coberturas de los suelos se asocian a la segregación social que diferencia, a su vez, la calidad de los climas y del aire entre los barrios en que residen los habitantes de clase alta, media o baja, impidiendo cualquier generalización válida a escala de la ciudad completa. Al interior de la ciudad, los diversos tipos de urbanización han construido socialmente diferentes climas en términos de temperatura, humedad, ventilación y calidad del aire. El acceso de los actores sociales a estos diversos tipos de climas urbanos depende de su poder adquisitivo, lo que implica que el clima, como cualquier otro objeto urbano, se ha transformado en un producto de consumo, dejando de lado su condición de bien libre y común, en la medida que el mercado lo privatiza, valoriza y comercializa como parte de los proyectos inmobiliarios (Castree, 2003; Thornes & Randalls, 2007; Romero & Mendes, 2020a). Quienes viven o trabajan en las metrópolis deben irremediablemente adaptarse a las condiciones que les son dadas por quienes hegemonizan el poder político sobre la planificación, el diseño, la construcción y la gestión de los espacios urbanos. Lo cierto es que, para parte importante de sus habitantes, las actuales condiciones climáticas son inaceptables y demuestran claramente la existencia de profundos y permanentes niveles de injusticia climática (Romero, 2019).

Entre los rasgos socioclimáticamente más diferenciados al interior de Santiago se encuentran las islas, archipiélagos y corredores de calor urbano,

cuya magnitud y distribución espacial han evolucionado durante los últimos veinte años como consecuencia de los cambios en los usos y coberturas de suelos, como es posible apreciar a través de las imágenes satelitales —en este caso del Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)— que registran diariamente las variaciones en las temperaturas de la superficie terrestre (TST).

La carencia de redes que provean de datos climáticos urbanos es aún mayor al interior de los barrios, por lo que es necesario recurrir a simulaciones obtenidas de modelos como ENVI-met, que, si bien permiten identificar el rol de las edificaciones, áreas verdes y vías de circulación sobre los microclimas urbanos, requerirían ser validados con mediciones sistemáticas en espacios seleccionados según sus zonas climáticas locales (LCZ, por sus siglas en inglés) (Mendes et al., 2020). Durante los años recientes, los déficits de los climas urbanos para garantizar la salud de los ecosistemas y de la sociedad han sido claramente advertidos a raíz de la distribución de los contagios y muertes provocados por la pandemia de covid-19 en relación con las desigualdades socioambientales.

Para mejorar el conocimiento sobre las desigualdades socioclimáticas y la falta de justicia ambiental dentro de las ciudades, el enfoque de la geografía física crítica (Lave et al., 2014; Lave et al., 2018) postula que el estudio de las propiedades físicas o químicas de la naturaleza, como es el caso de la atmósfera urbana, no puede separarse de los componentes sociales y económicos. Estos últimos discriminan a la sociedad en términos de clase social, género, edad o etnia, influyendo en la salud pública y el bienestar social (Tang et al., 2017; Chakraborty et al., 2019; Sun et al., 2019).

En los países considerados desarrollados, los barrios socialmente más vulnerables son generalmente habitados por minorías sociales; en América Latina, en cambio, estos concentran a la mayoría de la población urbana, que, consecuentemente, resulta excluida del acceso a climas confortables, ambientalmente seguros, dotados de amenidades, espacios públicos y áreas verdes. Por el contrario, por lo menos en las ciudades chilenas, los barrios más pobres registran siempre las oscilaciones térmicas más marcadas entre el calor excesivo de los días de verano y las noches frías del invierno, así como concentran las islas, archipiélagos y corredores de calor y frío, humedad y ventilación.

Naturalmente, las áreas climáticamente más favorables al interior de la ciudad de Santiago dependen especialmente de su localización topográfica en la cuenca de los ríos Maipo y Mapocho, diferenciando el sector oriente, más cercano a la cordillera de los Andes (y que por ello registra mayores precipitaciones, temperaturas más moderadas, mayor frecuencia y velocidad del viento por las brisas de valle-montaña, mayor humedad en el suelo y superficies naturales verdes más extensas), del sector poniente (que ocupa las áreas más bajas de la cuenca y por ello registra una mayor estabilidad atmosférica, ventilación débil, menores lluvias, mayor aridez, y vegetación circunscrita a la presencia de humedales y ejes fluviales).

Estas diferencias climáticas y paisajísticas naturales, adicionadas a los climas urbanos, resultan ser relevantes para el mercado inmobiliario, influyendo en los precios de la tierra. En Santiago de Chile, para vivir en un barrio con temperaturas y humedad templadas, adecuada ventilación y una calidad ambiental y del aire saludable, como aquellos localizados al oriente de la ciudad, se debe pagar un precio por metro cuadrado construido que puede superar hasta en veinticinco veces el valor de la construcción ubicada, por el contrario, en el sector poniente.

Los procesos de gentrificación climática urbana consideran actos de comisión y omisión por parte de los poderes públicos en alianza con los poderes económicos que controlan el mercado inmobiliario (Harper, 2019; Shokry et al., 2020), transformando barrios de pobres cualidades ambientales y climáticas en lugares amenos, controlando las densidades, alturas y localización de las edificaciones, generando o conservando áreas verdes, construyendo avenidas anchas y, especialmente, obligando al traslado de sus habitantes originales, incapacitados para pagar los altos impuestos y costos de vida de los barrios así remodelados.

En Santiago de Chile, los beneficios y daños provocados por la gentrificación climática pueden ser observados comparando las temperaturas, humedad, cubiertas vegetales y niveles de ventilación entre barrios ricos y pobres (Irarrázaval, 2012; Smith y Romero, 2016; Mendes et al., 2020; Romero y Mendes, 2020b). La gentrificación climática es parte de la llamada gentrificación socioecológica, que es una propuesta de los planificadores y gestores urbanos para adaptarse al proceso de cambio climático global

ofertando en el mercado una cierta fantasía de inmunidad, comprando y vendiendo modos de vida eco-amistosos.

De acuerdo con Harper (2019, p. 64), esta forma de vida vacía de significado a la naturaleza y a la sustentabilidad, actuando en la planificación urbana “como combustible para dar la apariencia de que se está haciendo algo respecto a los cambios globales y al mejoramiento del medio ambiente, cuando en efecto se trata de despliegues destinados a mantener la prioridad del crecimiento económico para la competitividad”.

En el caso de Santiago, en los años recientes se han propuesto una serie de iniciativas nacionales e internacionales para luchar contra el cambio climático, pero ninguna de ellas ha tenido la fortaleza necesaria para avanzar desde su retórica discursiva hacia intervenciones reales significativas en beneficio de la totalidad de la sociedad e integradas en planes de mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes. Las intervenciones propuestas no han dispuesto de suficiente soporte político y menos económico para enfrentar la hegemonía del mercado y del sector privado en la construcción y manejo de la fábrica urbana concebida como negocio de alta rentabilidad (Mendes et al., 2020; Romero y Mendes, 2020a).

Los estudios como los de Smith y Romero (2016), Mendes et al. (2019), Romero (2019), y Romero y Mendes (2021b) concuerdan en que la impermeabilización de los suelos y los índices de productividad de la biomasa son factores principales que determinan la distribución especial y temporal de las islas, archipiélagos, corredores y olas de calor en Santiago, y que a su vez son indicadores de injusticia socioambiental en la medida en que los barrios más pobres, por ejemplo, carecen de los recursos y espacios para crear y mantener una infraestructura verde que requiere regadío artificial la mayor parte del año dadas las condiciones de aridez predominantes.

Las imágenes satelitales de la TST facilitan la identificación y caracterización de las ICUS como representativas de diferenciación socioambiental a escala de barrios. Las comunas ricas registran fluctuaciones térmicas estacionales, mensuales y diarias siempre menores comparadas con las áreas de menores ingresos. Si llegasen a concentrar olas o islas de calor o frío dispondrían de los instrumentos tecnológicos necesarios para su mitigación, lo que no es el caso de los sectores socialmente más vulnerables. Según Barret (2013), los enfoques actuales de justicia climática urbana no

incorporan suficientes datos empíricos a escalas múltiples. Esto es aún más evidente en América Latina como resultado de la falta de redes de mediciones meteorológicas dentro de las ciudades. Consecuentemente, resulta difícil evaluar cuantitativamente la influencia de los climas urbanos sobre la salud ambiental y el bienestar de las comunidades, como para sostener e impulsar las políticas públicas necesarias de implementar.

Mena et al. (2021) analizaron la incidencia atribuida a la pandemia de covid-19 en relación al estado demográfico y socioeconómico de las comunas de Santiago, sobre la base de la consideración del exceso de número y tasas de mortalidad, demostrando que son las desigualdades socioeconómicas las que explican la mayor parte de las variaciones en las cifras y su subestimación en los informes oficiales. A fines de agosto de 2020, la ciudad de Santiago concentraba el 55 % de los casos confirmados de covid-19 y el 65 % de las muertes causadas por la pandemia. En términos de disparidades intraurbanas, la comuna de Vitacura, con el más alto nivel socioeconómico del país y de la ciudad, alcanzaba 22.6 casos por cada 10 000 habitantes y una tasa de incidencia máxima a mediados del mes de mayo (otoño), mientras que La Pintana, la comuna con los más bajos indicadores socioeconómicos de la ciudad, registraba 76.4 casos por cada 10 000 habitantes la primera semana de junio (invierno). En términos de mortalidad, la comuna de San Ramón, clasificada como uno de los barrios urbanos con los más bajos indicadores socioeconómicos, registraba 4.4 muertes por semana en la segunda semana de junio de 2020, mientras que la mencionada comuna de Vitacura registraba menos de una muerte en el mismo periodo.

Para comprender las diferencias socioclimatológicas en Santiago de Chile, se compararon dos comunas: Estación Central y Vitacura, lo que subraya la importancia de conocer de mejor manera las variaciones espaciales y temporales de las temperaturas, ventilación y factor de visibilidad del cielo. La comuna de Estación Central, ubicada al oeste del centro histórico de la capital y clasificada entre aquellas en que residen la clase media y media-baja, constituye un ejemplo de condiciones microclimáticas empeoradas como consecuencia de la gentrificación por omisión y la especulación inmobiliaria, marcadas por el predominio de edificaciones de gran altura, ausencia de áreas verdes y generación de cañones urbanos, donde una multitud de habitantes, especialmente migrantes, residen en apartamentos

de pequeñas superficies atraídos por la centralidad y accesibilidad del barrio. Al comparar la morfología urbana y las condiciones microclimáticas igualmente simuladas para Vitacura, la comuna más rica de la ciudad y del país, se evidencian grandes diferencias que sustentan la injusticia socioclimática predominante en la ciudad.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La distribución promedio diurna de las TST de las ICUS de la ciudad de Santiago de Chile para las estaciones de verano e invierno en el periodo 2001-2020 fue obtenida de las imágenes satelitales de temperaturas de emisión adquiridas desde el Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE). De igual fuente se obtuvieron las representaciones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El estatus socioeconómico de las comunas de la ciudad se basó en las informaciones publicadas por el Censo Nacional de Población y Vivienda ejecutado en 2017 a escala de distrito (IDEOCUC, 2017).

Las TST diarias son proporcionadas por el sensor Terra/Aqua de los satélites MOD11A1 y MYD11A1 con una resolución espacial de 1 km. El NDVI es registrado por las imágenes MODIS-Terra (MOD13Q1 product) en escalas de resolución temporal cada 16 días y espacial de 250 m. Las clasificaciones en cinco grupos desde las más altas a las más bajas condiciones socioeconómicas de los habitantes de la ciudad son proporcionadas por el Observatorio de Ciudades IDE (IDEOCUC, 2017).

Las TST fueron transformadas desde kelvin a grados Celsius y reclasificadas usando procedimientos bilineales (presencia y ausencia) desde la resolución de 1 km a 250 m en GEE. Se diferenciaron las temperaturas urbanas con un sitio rural de referencia localizado en la comuna de Pirque, en el SE de la ciudad (Sarricolea y Martín-Vide, 2014). Las LCZ, basadas en Stewart y Oke (2012), fueron mapeadas según las indicaciones del World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) (Brousse et al., 2016). En imágenes compuestas del satélite Sentinel-2 de 2017 se seleccionaron zonas de entrenamiento para las 17 LCZ (La et al., 2020).

Para correlacionar espacialmente las temperaturas superficiales, las condiciones socioeconómicas de la población y los NDVI se usó un modelo de regresión polinomial de tercer orden a escala municipal (Tang et al., 2017; Siqi & Yuhong, 2020). A las categorías socioeconómicas se les asignaron valores numéricos, correspondiendo 100 a la clase alta, 75 a la clase media alta, 50 a la clase media, 25 a la clase media baja y 0 a la clase baja. El análisis de tendencia de las variaciones espaciotemporales de la TST y el NDVI siguieron el procedimiento de Mann-Kendall.

Para analizar las interrelaciones espaciales entre la distribución de las tasas de incidencia de los contagios de covid-19 y las TST a la escala de comunas durante 2020 fueron consultados los informes del Ministerio de Salud (MINSAL 2021), mientras que estas últimas fueron obtenidas de imágenes termales captadas por el satélite Landsat-7 (sensor ETM + C1 Nivel-1, banda 6), con un píxel de 60 m para las escenas registradas aproximadamente a las 10:30 h (hora local cada 16 días), seleccionándolas para días de cielos despejados, correspondientes al día más cercano a la publicación del informe epidemiológico por parte de las autoridades de salud de Chile: 7 de abril, 28 de julio y 3 de diciembre de 2020. El geoprocесamiento fue realizado con el software QGIS, usando el Semi-Automatic Classification Plugin desarrollado por Congedo (2014).

El modelo ENVI-met para el estudio de las características microclimáticas de barrios fue aplicado a recortes espaciales de 500 m × 500 m en las comunas de Estación Central y Vitacura, siguiendo la metodología propuesta por Mendes (2014). Este es un modelo tridimensional capaz de simular las interacciones entre la superficie del suelo, las plantas y la atmósfera en superficies de 2.5 km × 2.5 km que se basa en un archivo de extensión .in que se refiere al modelado en sí mismo considerando los edificios y sus alturas, la vegetación y sus clases de follaje, y los tipos de suelos, tales como asfalto, concreto, agua, arenas y arcillas.

Una imagen Google Earth con una extensión .bmp ayuda al operador a identificar cada uno de los elementos. El segundo archivo, de extensión .cf, contiene variables climáticas tales como temperatura, humedad relativa y específica, y dirección y velocidad del viento. El Google Street se usó para estimar la altura de los edificios, mientras que, respecto a la vegetación, las especies de *Robinia pseudoacacia*, *Liquidambar styraciflua*

y *Prunus cerasifera* son las más frecuentes de encontrar, además del pasto, como especie más abundante en Santiago (Hernández & Villaseñor, 2018).

Las variables microclimáticas simuladas a la escala de los barrios seleccionados se basaron en los valores promedio registrados en el Aeropuerto Internacional de Santiago en enero de 2019. La dirección del viento predominante fue el sur (193°), con una velocidad promedio de 6 m s^{-1} a la altura de 10 m. La temperatura potencial fue 303.3 K, 39 % la humedad relativa y 2.1 g de agua por kg de aire a 2500 m. Para analizar y mapear los resultados se usó el complemento Leonardo para ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Distribución de las islas de calor urbano superficial (ICUS) diurno de verano e invierno en Santiago

La distribución espacial promedio de las ICUS es completamente diferente en las estaciones de verano e invierno en Santiago de Chile (Figura 2). Durante un día promedio de verano la ICUS cubre la casi totalidad de la ciudad y más allá de sus bordes, con temperaturas sobre 4°C respecto a la estación rural de referencia; sin embargo, hay dos zonas más frías que pueden ser observadas en los sectores oriental y austral de la ciudad; la primera registra dos grados menos y se localiza en las comunas de Lo Barnechea, Vitacura y Las Condes, ubicadas en el sector oriente y que reúnen los barrios más ricos de la ciudad, caracterizados por bajas densidades construidas y grandes coberturas vegetales, que además se benefician de las masas de aire frío que descienden desde la vecina cordillera de los Andes. La segunda zona relativamente más fresca conforma un corredor ubicado al sur de la ciudad en las cercanías del cauce del río Maipo, que igualmente transporta aire frío desde las montañas cruzando las comunas rurales de San José de Maipo, Pirque, Calera de Tango, Peñaflor y Talagante.

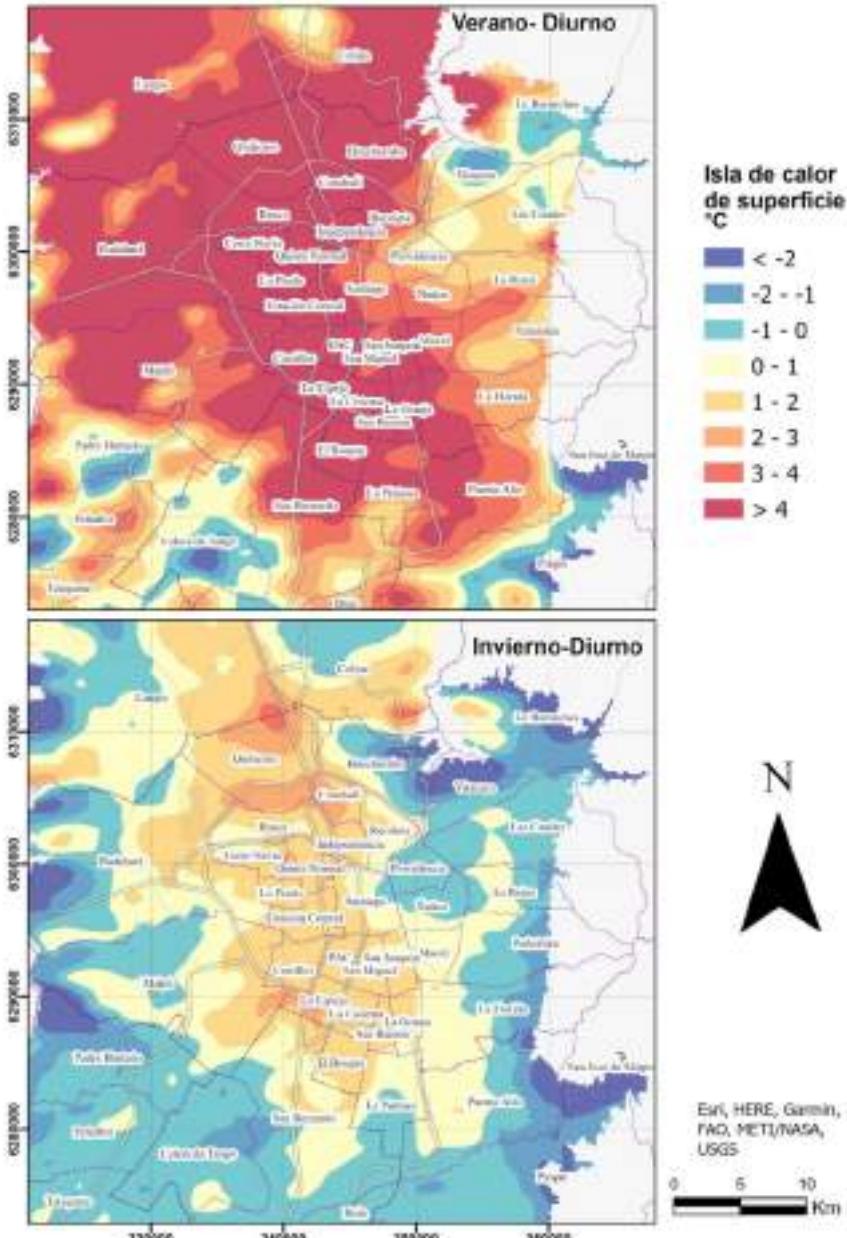


Figura 2. Distribución espacial de las ICUS diurno durante 2001-2020 en Santiago. Fuente: adaptado de Sarricolea et al. (2022).

Durante un día promedio de invierno, se reduce la extensión y magnitud de la ICUS de Santiago, cubriendo las comunas centrales y pericentrales con temperaturas entre 0.1 y 3.0 °C más altas que las de la referencia rural. El resto de la ciudad conforma una gran zona fría que se extiende por todas las direcciones, concentrando los menores valores en las secciones del noreste (comunas de Huechuraba, Vitacura y Lo Barnechea), a través del piedemonte andino (Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y Puente Alto), y a lo largo del río Maipo y las comunas de Calera de Tango, Peñaflor, Maipú, Pudahuel y Lampa.

En términos de las diferencias térmicas entre las comunas ricas y pobres de la ciudad, durante los días de verano los valores promedio de las ICUS, sobre 3 °C, cubren la mayor parte de los paisajes urbanos y rurales que rodean la ciudad; sin embargo, las áreas más ricas del este de Santiago permanecen con temperaturas entre 1 y 2 °C más frías. Estas diferencias

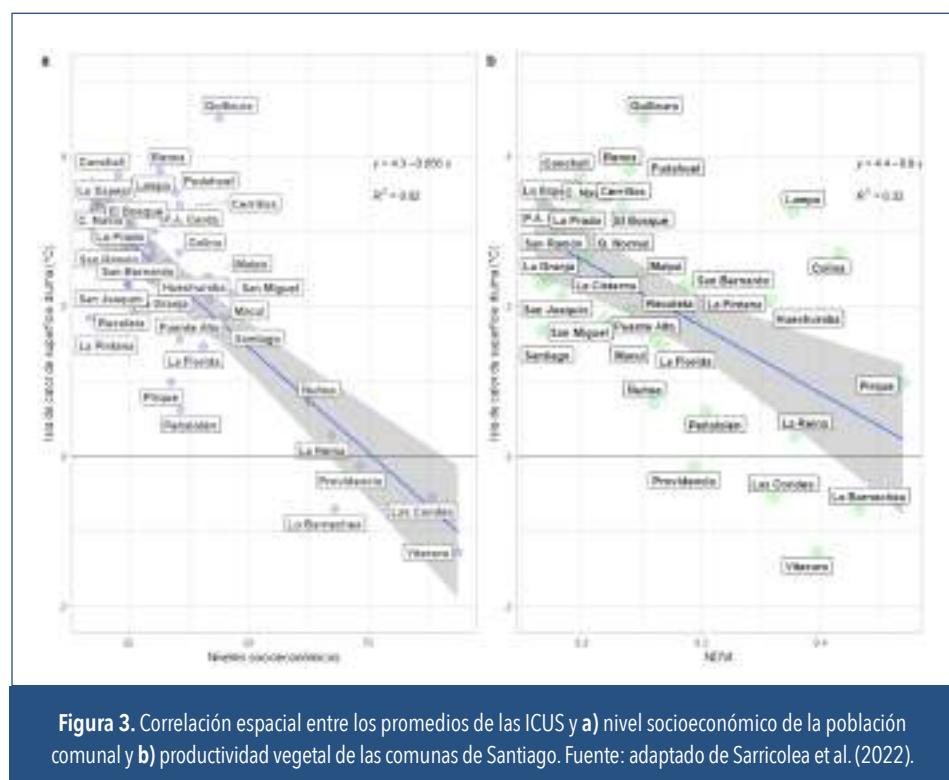


Figura 3. Correlación espacial entre los promedios de las ICUS y a) nivel socioeconómico de la población comunal y b) productividad vegetal de las comunas de Santiago. Fuente: adaptado de Sarricolea et al. (2022).

térmicas entre los barrios más y menos afluentes de la ciudad se registran también en los días de invierno (junio-septiembre), cuando las zonas del este y noreste son más frescas que el resto de la ciudad, aunque algunas zonas frías de menos de 1 °C pueden registrarse en las comunas del oeste y en zonas rurales del norte.

Estas diferencias climáticas al interior de la ciudad están inversamente correlacionadas con la distribución de los niveles socioeconómicos de la población (Figura 3a). Santiago se divide térmicamente en dos secciones: 1) los barrios de clase media y baja, localizados preferentemente en el centro, pericentro y sector occidental de la ciudad, con alguna prolongación hacia el sur, concentran las ICUS, y 2) las comunas ubicadas al NE de la ciudad (La Reina, Providencia, Las Condes, Lo Barnechea y Vitacura), donde viven los grupos de clase media alta y alta, concentran temperaturas con valores inferiores. Estas mismas correlaciones espaciales inversas se observan también entre la distribución de las más bajas TST promedio con las mayores cubiertas vegetales (Figura 3b) en las comunas ricas, mientras que en el resto de Santiago la asociación espacial más frecuente es entre altas temperaturas con bajos porcentajes de cubierta vegetal.

3.2. Tendencias de cambio en las TST en Santiago entre 2001 y 2020

Las tendencias de cambio de las TST entre 2001 y 2020 indican un incremento de más de 2 °C por década en ambas estaciones del año, verano e invierno (Figura 4). Sin embargo, los registros de cambios más elevados en las TST no se localizan en el área urbana propiamente, sino en la periferia rural que rodea la ciudad, particularmente más allá del borde norte y NO (comunas de Colina, Quilicura, Lampa y Pudahuel) y del sur (Maipú y San Bernardo). La hipótesis para explicar este calentamiento más acentuado de la superficie terrestre se relacionaría con la sequía que ha afectado a las áreas rurales durante las últimas décadas y a la especulación inmobiliaria urbana que ha estimulado el abandono de áreas de cultivo y superficies naturales esperando el incremento del precio de los terrenos. En invierno, las TST de las islas de calor aumentan a tasas menores, entre 1 y 2 °C por década. Las comunas del centro histórico y pericentrales muestran condiciones térmicas más estables, aumentando en menos de 1 °C por década.

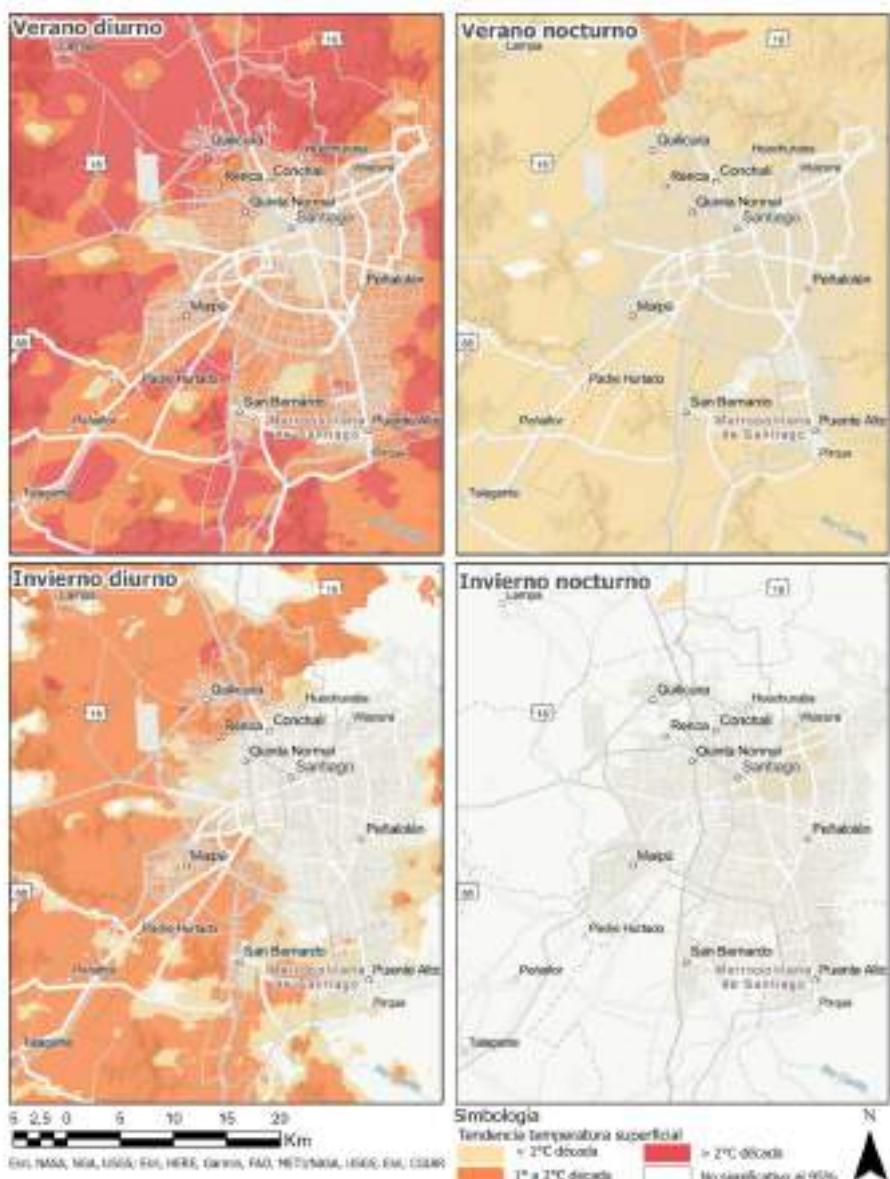


Figura 4. Tendencias de cambio en las ICUS entre 2001 y 2020 en Santiago de Chile. Fuente: elaboración propia.

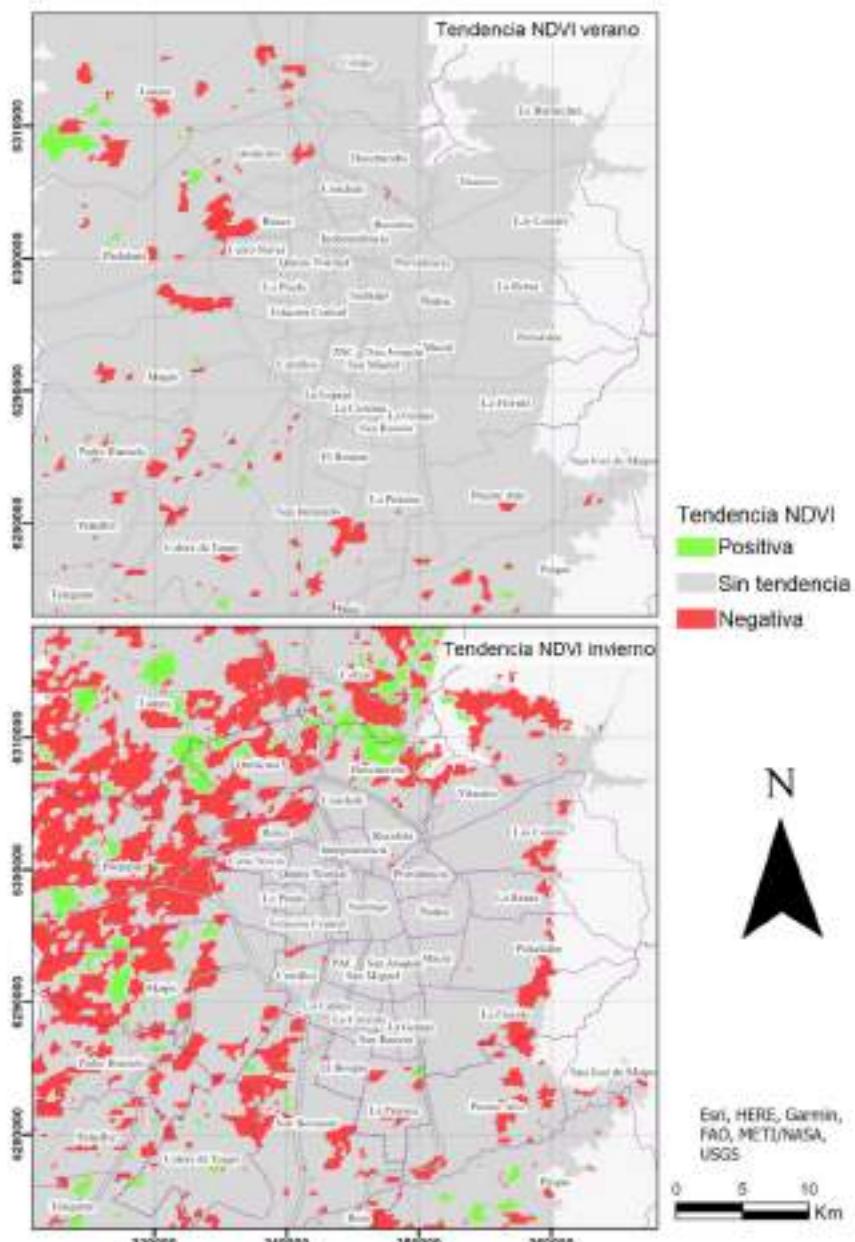


Figura 5. Cambios de la productividad vegetal en las estaciones de verano e invierno en Santiago de Chile entre 2010 y 2020. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 ilustra los cambios en la productividad vegetal (NDVI), demostrando que estos no han sido un factor significativo para explicar los incrementos de TST durante el verano. En la estación de invierno, los cambios han sido aún menos relevantes, especialmente debido al proceso de *browning* que ha afectado a la vegetación de matorrales y bosques nativos de Chile central como consecuencia de la persistente y prolongada sequía que comenzó en 2010 (Miranda et al., 2020).

3.3. La distribución espacial de las TST al interior de Santiago de Chile y su interrelación con la presencia de covid-19

Las TST son directamente influenciadas tanto por la cantidad de la vegetación y de las superficies impermeabilizadas como por los materiales de construcción y la infraestructura urbana (Mendes et al., 2020). Así, el análisis de las variaciones espaciales de las tasas de incidencia de covid-19 durante las estaciones climáticas de 2020 (Figura 6) indica que en el mes de abril las cifras más altas de contagio se registraban en las comunas localizadas al oriente y centro de la ciudad. Aunque el sector poniente registraba un bajo número de pacientes contagiados, algunas comunas de alta vulnerabilidad social, como El Bosque y San Ramón, comenzaban a manifestar numerosos casos.

En el mes de abril de 2020 (Figura 6a), correspondiente a la estación de otoño en Santiago, el promedio general de las temperaturas superficiales para todas las comunas fue 24.3 °C; sin embargo, las comunas del sector oriente de la ciudad (Vitacura, Las Condes, Lo Barnechea y Providencia) registraron valores aproximadamente 2-3 °C más fríos que el resto de la ciudad, como resultado de los paisajes climáticamente más favorables que las caracterizan. Contrariamente, las comunas de Lampa, Quilicura y Cerrillos, clasificadas como más pobres y ubicadas al poniente de la ciudad, fueron más cálidas como resultado de sus mayores densidades construidas, presencia de sectores industriales y predominio de suelos desnudos.

En el mes de julio (Figura 6b), en medio de la estación de invierno, se registró una TST promedio de 5.8 °C para la ciudad entera; sin embargo, las comunas del sector oriente presentaron valores más altos que esta cifra

promedio. Contrariamente, las comunas del sur y oeste de la ciudad, de mayor vulnerabilidad social, tales como La Pintana, San Ramón y Quilicura, registraron TST que variaron entre 0 °C y 1.0 °C, con todo el malestar climático y elevados riesgos para la salud pública que ello implica. Finalmente, en diciembre del año 2020 (Figura 6c), en pleno verano, las TST alcanzaron un promedio de 30.5 °C, manteniéndose la diferenciación entre los barrios del este y oeste de la ciudad. Las comunas ricas de Lo Barnechea, Vitacura, Las Condes, Providencia y La Reina registraron TST promedio de hasta 10 °C menos que los valores extremadamente altos localizados en las áreas del NO (Lampa y Quilicura) y del SO (Cerrillos, El Bosque y San Ramón).

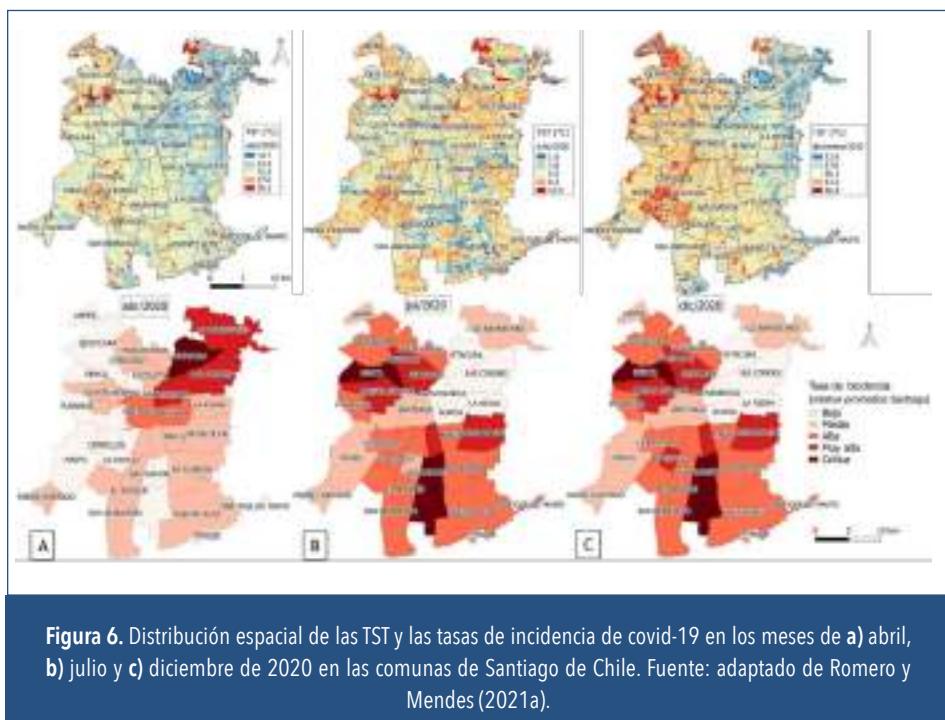


Figura 6. Distribución espacial de las TST y las tasas de incidencia de covid-19 en los meses de a) abril, b) julio y c) diciembre de 2020 en las comunas de Santiago de Chile. Fuente: adaptado de Romero y Mendes (2021a).

La Figura 7 muestra correlaciones espaciales inversas entre las TST y las tasas de incidencia de covid-19 en las comunas de la ciudad de Santiago, excepto en la estación de verano, correspondiente al mes de diciembre

de 2020 (Romero & Mendes, 2020c). Solamente en la estación de otoño (abril) las cifras aún reducidas de contagios emergieron desde las comunas del oriente de Santiago, que registraban elevados valores de temperatura (entre 24 y 26 °C) y el mayor número de viajes al extranjero. En los siguientes meses, el descenso significativo de las TST contribuyó a esparcir la pandemia a través de toda la ciudad. En julio, las más altas de incidencia se ubicaron mayormente en las comunas más pobres y más frías, principalmente en La Pintana (0.1 °C promedio de TST), San Ramón (0.5 °C) y Quilicura (0.7 °C).

En diciembre, el comportamiento de la pandemia mantuvo aun en verano la diferenciación entre las comunas del oriente y poniente de la ciudad y una condición peor en los sectores del sur, que registraron las más altas tasas de incidencia. Estas áreas incluyeron las comunas de La Granja, Renca, La Pintana y San Ramón. Contrariamente, las comunas de altos niveles

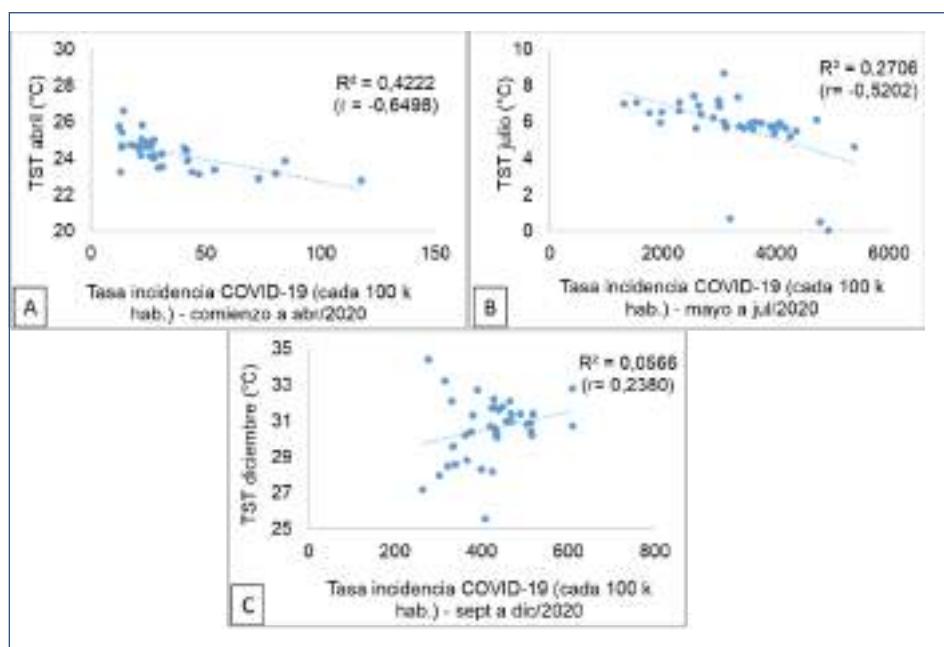


Figura 7. Correlación espacial entre las TST y las tasas de incidencia de covid-19 (por cada 100 000 habitantes) en los períodos de a) marzo-abril, b) mayo-julio y c) septiembre-diciembre de 2020 en Santiago de Chile. Fuente: adaptado de Romero y Mendes (2021a).

socioeconómicos del nororiente de Santiago registraron las menores tasas de incidencia, como sucedió en Vitacura, Las Condes, Providencia, Ñuñoa y La Reina, donde afectaron a entre el 2.0 y 2.8 % de sus poblaciones, por debajo del promedio de la ciudad, que fue de 4.2 %.

3.4. Diferencias en los climas de dosel urbano entre barrios socialmente contrastados al interior de la ciudad de Santiago de Chile

El cambio de escala espacial desde el estudio de la ciudad como totalidad a barrios específicos seleccionados, caracterizados por relevantes desigualdades socioambientales, permite observar que la comuna de Estación Central (Figura 8a), un área de residentes de clase media y media-baja, localizada inmediatamente al poniente del centro histórico de Santiago, ha sido objeto durante los años recientes de un proceso de gentrificación con omisión climática que ha significado el reemplazo de viviendas unifamiliares, de uno o dos pisos, con patios interiores, por edificios de aproximadamente 120 m de altura en más de 40 pisos, con apartamentos pequeños que no superan los 20 m², que han transformado completamente y en forma adversa las condiciones microclimáticas y degradado el medio ambiente urbano. El barrio puede ser caracterizado en la actualidad como un área de alta absorción y emisión de calor debido al predominio de paredes, techumbres y avenidas, generando islotes, corredores y puntos de temperaturas extremas; así como de edificaciones y cañones urbanos que han eliminado o reducido la ventilación, haciendo desaparecer su efecto refrescante y, consecuentemente, facilitando la concentración de contaminantes atmosféricos que tendrían efectos negativos sobre la salud de los ecosistemas y de la población.

Contrariamente, la rica comuna de Vitacura, ubicada a solo 20 km al este de Estación Central (Figura 8b), presenta una mezcla de viviendas unifamiliares de alturas medias y bajas, amplias avenidas y una gran infraestructura verde, representada por parques, jardines en los hogares, calles y avenidas arboladas, y bajas densidades construidas que contribuyen a generar y mantener una adecuada calidad del clima y del aire. El cauce del río Mapocho, ubicado en una de sus márgenes, actúa como corredor

de aire entre la llanura y la cordillera andina, asegurando la ventilación, efecto refrescante y dispersión de la contaminación atmosférica. La inevitable construcción de edificios de altura que también ha tenido lugar en esta comuna se ha realizado, sin embargo, siguiendo regulaciones que han contribuido hasta ahora a impedir que se repitan las consecuencias climáticas negativas que se aprecian en la mayoría de las áreas de remodelación urbana al interior de Santiago.



Figura 8. Usos y coberturas de suelos y paisajes urbanos en a) Estación Central y b) Vitacura. Fuentes: a) elaboración propia y b) Tourism Media (2020).

Las Figuras 9a y 9b corresponden a vistas aéreas de las morfologías y usos del suelo urbano de los dos barrios comparados, ilustrando las grandes diferencias climáticas entre los paisajes grises con escasa vegetación de Estación Central y aquellos con predominio vegetal de Vitacura. La Figura 9c presenta los valores del factor de visibilidad del cielo para ambos barrios. En Estación Central el cielo puede ser visto solo desde la avenida principal que cruza el barrio y desde pequeños espacios situados entre los edificios de altura. Por el contrario, en Vitacura existen muchos espacios abiertos que son particularmente relevantes no solo en cuanto a la calidad escénica, sino también respecto al rol de las sombras y de la radiación solar directa, todos ellos aspectos que influyen grandemente en la calidad de vida y confort climático de los barrios urbanos en un clima de tipo mediterráneo caracterizado por condiciones marcadamente distintas en verano e invierno.

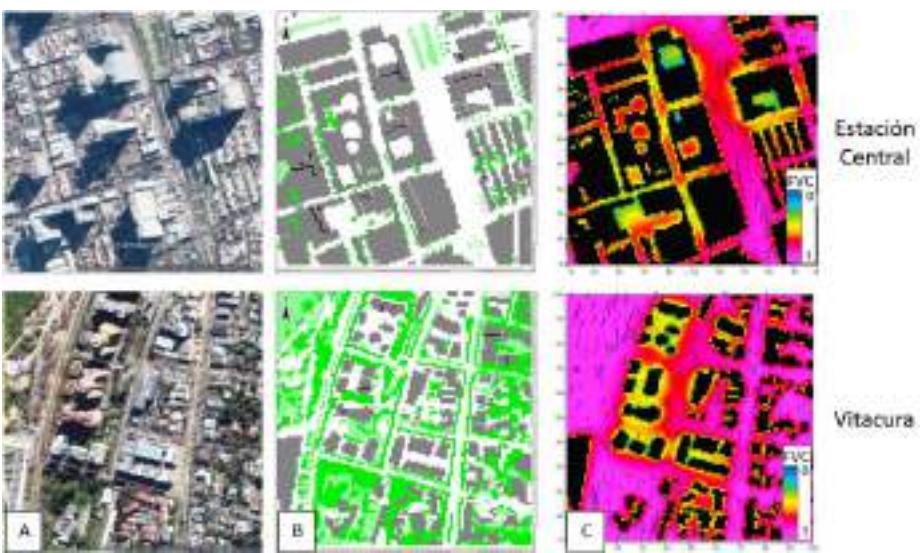


Figura 9. Comparación entre barrios de las comunas de Estación Central y Vitacura: **a)** vistas aéreas, **b)** simulación de la morfología urbana desarrollada con ENVI-met y **c)** factor de visibilidad del cielo (FVC).

Fuente: elaboración propia.

La Figura 10 muestra las grandes diferencias en las temperaturas simuladas durante el día entre los barrios comparados. Las temperaturas de Estación Central superan los 30°C al mediodía y se localizan preferentemente en corredores de calor correspondientes a los cañones urbanos constituidos por las avenidas y aportados por las construcciones de elevada densidad y altura, y la congestión de la circulación vehicular. A esa misma hora y durante todo el día, Vitacura registra temperaturas que promedian 10°C menos que Estación Central. La asociación espacial entre la acumulación de calor superficial con el nivel socioeconómico de los barrios es más evidente a microescala, representando diferenciaciones socioclimáticas con directa influencia sobre la calidad de vida, la salud ambiental, el confort climático y, en definitiva, sobre la justicia socioambiental en la medida que los habitantes de menores recursos reciben en forma desproporcionada los costos ambientales que resultan de adicionar las condiciones de pobreza con condiciones climáticas adversas.

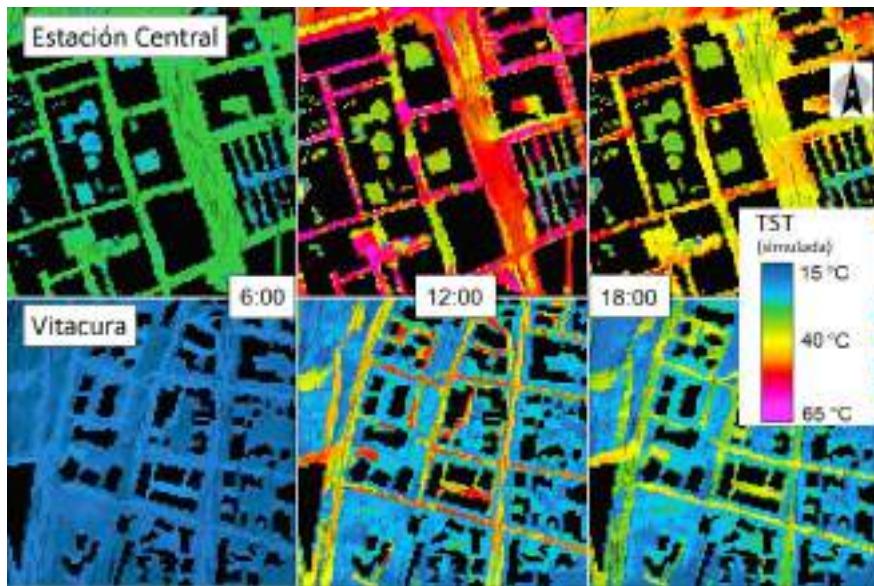


Figura 10. Temperatura de superficie simulada para Estación Central y Vitacura a las 6:00 h, 12:00 h y 18:00 h. Fuente: Romero y Mendes (2020a).

En términos de la ventilación simulada a diferentes alturas para los barrios de Estación Central y Vitacura (Figura 11), se estiman algunos corredores de ventilación en las calles distribuidas entre los edificios en Estación Central. Por el contrario, en Vitacura la presencia de numerosos e interconectados corredores de ventilación se asocia a la existencia de espacios abiertos que brindan mayor confortabilidad a los peatones. A 50 m de altura, la velocidad del viento remarca la influencia de la presencia, localización, posición y orientación de los edificios de tal manera que en Estación Central son relevantes las diferencias de ventilación entre las fachadas ubicadas a barlovento o sotavento, pudiéndose advertir “zonas muertas” (como discuten Aristodemou et al., 2018) en las que la circulación del aire es prácticamente eliminada por el efecto de rugosidad que controla la velocidad del viento hasta varias veces la altitud de los edificios más elevados. Las zonas de sotavento y reducción de la ventilación son mucho menores en Vitacura a 10 m y prácticamente desaparecen a 50 m

de altitud, asegurando una mayor capacidad de depuración del aire, lo que explica las más bajas concentraciones de contaminantes, que en un día de máximos valores pueden ser un décimo de las registradas en el sector poniente de Santiago (Romero, 2019).

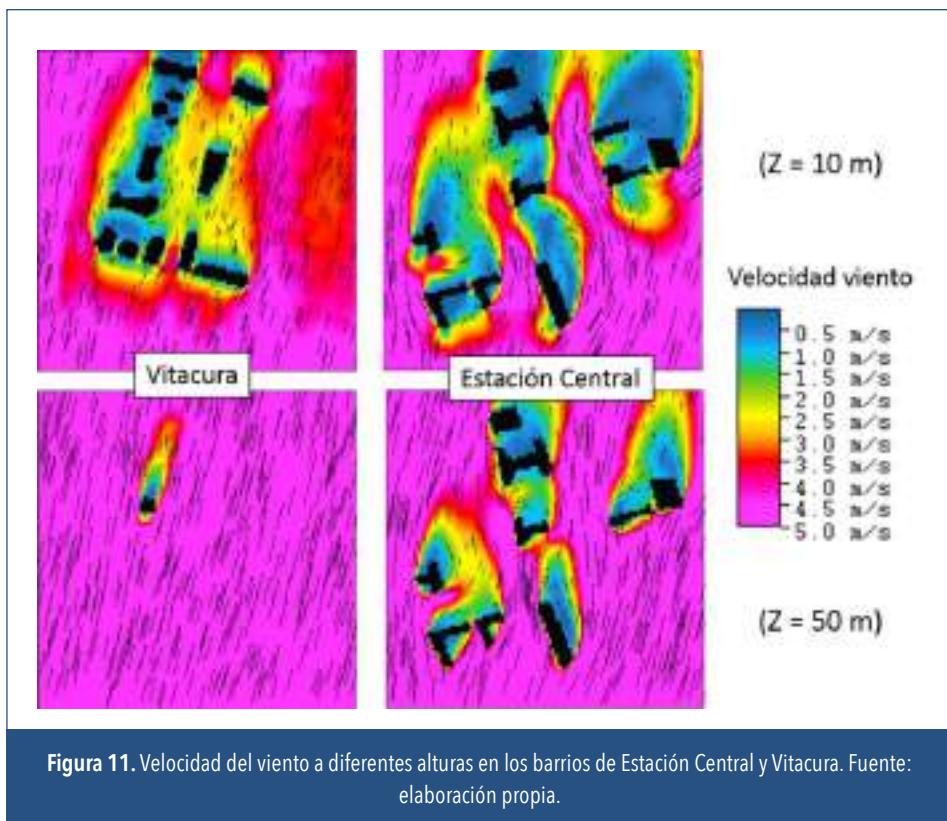


Figura 11. Velocidad del viento a diferentes alturas en los barrios de Estación Central y Vitacura. Fuente: elaboración propia.

La Figura 12 presenta la simulación de los efectos de las áreas construidas sobre los cambios en la dirección de los vientos predominantes, empleando como referencia aquellos de dirección SO registrados a las 15:00 h y a una altura de 2 m para áreas extraídas de a) Estación Central y b) Vitacura. En ambos casos, la distribución de las áreas construidas facilita el desplazamiento de las masas de aire por las avenidas y calles orientadas de sur a norte, mientras que las calles que se orientan O-E pueden alterar en 60° la dirección por la canalización de vientos y brisas, como es discutido por

Amorim et al. (2013) y Mendes et al. (2020). Los efectos reducidos pero significativos que se observan en el túnel de viento generado por el cañón urbano de la principal avenida que cruza Estación Central, comparado con los flujos más libres en Vitacura, indican la importancia del acoplamiento entre la geometría de las calles y la mayor o menor circulación de las masas de aire al interior de la ciudad.

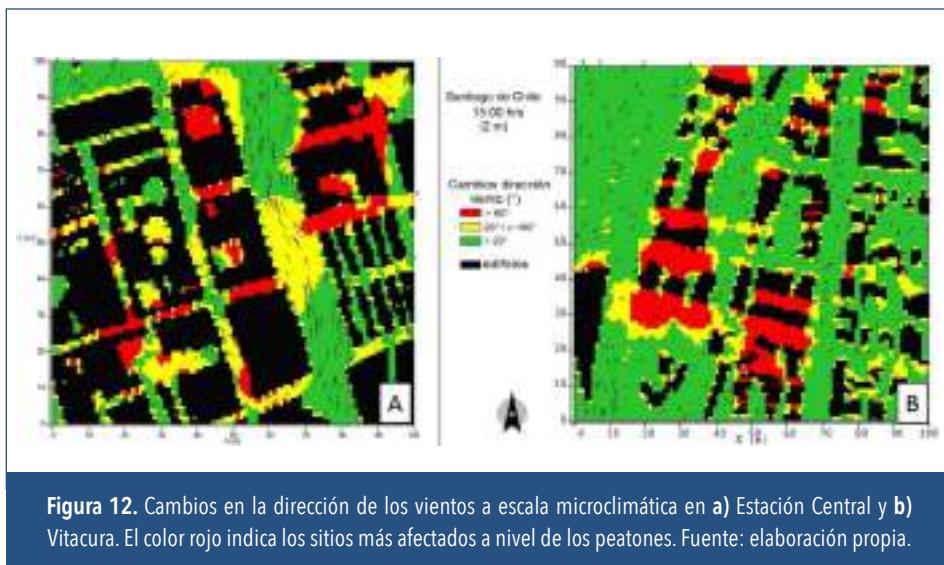


Figura 12. Cambios en la dirección de los vientos a escala microclimática en a) Estación Central y b) Vitacura. El color rojo indica los sitios más afectados a nivel de los peatones. Fuente: elaboración propia.

4 CONCLUSIONES

Los climas urbanos de la ciudad de Santiago registran un elevado dinamismo tanto en el espacio como en el tiempo a las diferentes escalas a que pueden ser observados, tales como las islas de calor que comparan las temperaturas superficiales de las áreas urbanas con las rurales, como respecto a diversas concentraciones de calor y frío que se pueden establecer entre las comunas que se distribuyen al interior de la ciudad, y entre los barrios que conforman estos últimos.

Los cambios en los climas urbanos de Santiago de Chile se asocian especialmente a las transformaciones de sus paisajes naturales, a los cambios en los usos y coberturas de los suelos y a las características socioambientales

del medio ambiente construido. La presencia, distribución y magnitud de las islas, archipiélagos y corredores de calor urbano y el comportamiento de los vientos a todas las escalas dentro de la ciudad representan profundas inequidades y elevados niveles de injusticia socioclimática, que se vieron dramáticamente reflejados en las formas de expansión y concentración espacial de las tasas de contagio y muertes causadas por la epidemia de covid-19.

A pesar de la adhesión de las autoridades nacionales, regionales y urbanas a los acuerdos internacionales sobre control del cambio climático global y a la participación en programas compartidos con otras urbes, la ciudad continúa produciendo aumentos permanentes de calor, mientras que las áreas verdes, que solo existen en los barrios de mayor riqueza y fuera de los límites de la ciudad, continúan desapareciendo o disminuyendo en su extensión y complejidad.

Lo más concluyente es que el desarrollo de los patrones de urbanización no ha considerado suficientemente la generación de climas urbanos que provean un medio ambiente sano y confortable para la mayoría de la sociedad. Por el contrario, la disponibilidad de climas aptos para los habitantes de la ciudad ha llegado a ser un bien privatizado, escaso y solo accesible a sus habitantes más ricos, aumentando las diferencias socioambientales y las injusticias climáticas.

Es evidente que la construcción social de condiciones climáticas más favorables para la salud y bienestar de la mayoría de la población urbana no ha constituido una preocupación explícita en Santiago, por lo que es urgente no solo disponer de mayor conocimiento científico al respecto, sino también informar sistemáticamente a la población sobre los crecientes riesgos, incertidumbres e inconfortabilidades climáticos que enfrentan, para otorgarle a estos asuntos ambientales una importancia política similar a la que han adquirido otras variables, como las de naturaleza económica, social y cultural.

Es necesario generar capacidades individuales, colectivas e institucionales para transformar los discursos retóricos de compromisos climáticos de largo plazo asumidos a escala global en acciones efectivas correctivas e incrementales, implementadas a la escala de cada una de las ciudades y sus barrios, contando con una participación ciudadana informada y empoderada.

REFERENCIAS

- Amorim, J. H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J. & Borrego, C. (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of the Total Environment*, 461-642, 541-551.
- Aristodemou, E., Boganegra, L. M., Mottet, L., Pavlidis, D., Constantinou, A., Pain, C., Robins, A. & ApSimon, H. (2018). How tall buildings affect turbulent air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood. *Environmental Pollution*, 233, 782-796.
- Barrett, S. (2013). The necessity of a multiscalar analysis of climate justice. *Progress in Human Geography*, 37(2), 215-233.
- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G. & Bechtel, B. (2016). WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Climate*, 17, 116-134.
- Bruse, M. & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3-4), 373-384.
- Castree, N. (2003). Commodifying what nature? *Progress in Human Geography*, 27(3), 273-297.
- Chakraborty, T., Hsu, A., Manya, D. & Sheriff, G. (2019). Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods: a multi-city perspective. *Environmental Research Letters*, 14(10).
- Congedo, L. (2014). *Semi-Automatic Classification Plugin User Manual*.
- Harper, E. T. (2019). Ecological Gentrification in Response to Apocalyptic Narratives of Climate Change: The Production of an Inmuno-political Fantasy. *International Journal of Urban and Regional Research*, 44(1), 55-71.
- Hernández, H. J. & Villaseñor, N. R. (2018). Twelve-year change in tree diversity and spatial segregation in the Mediterranean city of Santiago, Chile. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 10-18.
- IDEOCUC (2017). *Observatorio de ciudades UC*. IDE Observatorio de Ciudades UC.
- Irarrázaval, F. I. (2012). El imaginario “verde” y el verde urbano como instrumento de consumo inmobiliario: configurando las condiciones ambientales del área metropolitana de Santiago. *Revista INVI*, 27(75), 73-103.
- La, Y., Bagan, H. & Yamagata, Y. (2020). Urban land cover mapping under the Local

- Climate Zone scheme using Sentinel-2 and PALSAR-2 data. *Urban Climate*, 33.
- Lave, R., Wilson, M. W., Barron, E. S., Biermann, C., Carey, M. A., Duvall, C. S., Johnson, L., Lane, K. M., McClintock, N., Munroe, D., Pain, R., Proctor, J., Rhoads, B. L., Robertson, M. M., Rossi, J., Sayre, N. F., Simon, G., Tadaki, M. & Van Dyke, C. (2014). Intervention: Critical Physical Geography. *The Canadian Geographer*, 58(1), 1-10.
- Lave, R., Biermann, C. & Lane, S. N. (2018). *The Palgrave Handbook of Critical Physical Geography*. Palgrave Macmillan.
- Mena, G. E., Martínez, P. P., Mahmud, A. S., Marquet, P. A., Buckee, C. O. & Santillana, M. (2021). Socioeconomic status determines COVID-19 incidence and related mortality in Santiago, Chile. *Science*, 372(6545).
- Mendes, F. H. (2014). *Tutorial para Iniciantes: software ENVI-met versão 3.1*.
- Mendes, F. H., Sousa-Camilo, A. S., Lopes, A. M. S., Polizel, J. L., Silva Filho, D. F. & Romero, H. (2019). Comportamiento térmico de diferentes superficies urbanas durante un día cálido de verano. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 56, 1-8.
- Mendes, F. H., Romero, H. & Silva Filho, D. F. (2020). Cambio Climático adverso provocado por la urbanización sin planificación ni evaluación ambiental en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 77, 191-210.
- MINSA (2021). *Informe Epidemiológico COVID-19*. Ministerio de Salud.
- Miranda, A., Lara, A., Altamirano, A., Di Bella, C., González, M. & Camarero, J. J. (2020). Forest browning trends in response to drought in a highly threatened mediterranean landscape in South America. *Ecological Indicators*, 115.
- Romero, H. (2019). *Urban Climates and the Challenge of Sustainable Development of Chilean Cities*. En C. Henríquez & H. Romero (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Springer.
- Romero, H. & Mendes, F. H. (2020a). Comodificação dos climas urbanos e criação de injustiças socioclimáticas em Santiago do Chile. *Entre-Lugar*, 11(22), 40-56.
- Romero, H. & Mendes, F. H. (2020b). A construção de diferenças socioclimáticas nas escalas da camada limite urbana e da camada do dossel urbano em Santiago do Chile. En J. L. Sant'anna Neto (ed.), *Clima, Sociedade e Território*, Paco Editorial.
- Romero, H. & Mendes, F. H. (2020c). El avance del COVID-19 en Santiago de Chile y su relación con las vulnerabilidades socio-ambientales urbanas. *Espiral, revista de geografías y ciencias sociales*, 2(4), 69-78.
- Romero, H. & Mendes, F. H. (2021a). La gentrificación de los climas urbanos y su influencia sobre las temperaturas de la superficie terrestre y el COVID-19 durante

- el año 2020 en Santiago de Chile. *Geographicalia*, 73, 155-176.
- Romero-Aravena, H. & Mendes, F. H. (2021b). La construcción social de climas urbanos y su relación con la pandemia de Covid-19 en Santiago de Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 30(2), 376-395.
- Sarricolea, P. & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123-141.
- Sarricolea, P., Smith, P., Romero-Aravena, H., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M. & Meseguer-Ruiz, O. (2022). Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. *Science of The Total Environment*, 832.
- Shokry, G., Connolly, J. & Anguelovski, I. (2020). Understanding climate gentrification and shifting landscapes of protection and vulnerability in green resilient Philadelphia. *Urban Climate*, 31.
- Siqi, J. & Yuhong, W. (2020). Effects of land use and land cover pattern on urban temperature variations: A case study in Hong Kong. *Urban Climate*, 34.
- Smith, P. & Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, 63, 45-62.
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Sun, R., Lü, Y., Yang, X. & Cheng, L. (2019). Understanding the variability of urban heat islands from local background climate and urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 208, 743-752.
- Tang, J., Di, L., Xiao, J., Lu, D. & Zhou, Y. (2017). Impacts of land use and socioeconomic patterns on urban heat Island. *International Journal of Remote Sensing*, 38(11): 3445-3465.
- Thornes, J. E. & Randalls, S. (2007). Commodifying the atmosphere 'pennies from heaven'? *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 89(4), 273-285.
- Tourism Media (2020). *Pictures of Vitacura*.

Avances en el estudio de islas de calor urbano en América Latina,
editado por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental/UNAM,
se publicó en enero de 2024. La edición es digital.

Coordinación editorial: Richard Lemoine-Rodríguez, Azucena Pérez Vega y
Jean-François Mas; cuidado editorial: Israel Chávez Reséndiz y Mónica Braun;
revisión y formación editorial, Mónica Braun.

Para su formación se utilizaron tipos Minion Pro de 12 puntos
y Avenir Next Condensed de 19 puntos.



UNIVERSIDAD DE
VALÉNCIA

Ediciones
Universitarias

ciga

