

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

 **Caracterización de las islas de calor urbanas superficiales en una agrociudad.****El fenómeno de isla de frío urbano en Culiacán, México****ID Catalina Borbolla Gaxiola**

Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, catalinaborbolla@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-4543-0189

ID Massiel Guadalupe Osuna Gallardo

Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, massielosuna@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-3201-6448

ID Luis Rodrigo Zazueta Medina

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, luisrodrigo.zazueta@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-3171-9811

Recepción: 23 de febrero, 2024**Aceptación:** 15 de abril, 2024**Doi:** <https://doi.org/10.36677/qret.v26i2.22970>

Resumen: El cambio de uso del suelo es apreciado como un elemento importante que moldea el comportamiento de las islas de calor urbanas (ICU). El presente artículo tiene como objetivo caracterizar las islas de calor urbanas superficiales en una agrociudad, considerando la presencia del fenómeno isla de frío urbano —concepto asociado a contextos agrícolas—. A partir del procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución, con el programa ArcGis 10.80, se elaboraron mapas de temperatura superficial terrestre para realizar un análisis del comportamiento de las islas de calor urbanas superficiales desde la actividad agrícola en el área periurbana de la ciudad de Culiacán. Se detectó que el efecto de estas presenta características del fenómeno isla de frío urbano en determinadas temporadas.

Palabras clave: isla de frío urbano, Landsat, agrociudad, sistemas de información geográfica

RESEARCH SCIENTIFIC ARTICLES



Characterization of Surface Urban Heat Islands in an agrocity.


The Phenomenon of Urban Cold Island in Culiacan, México

 **Catalina Borbolla Gaxiola**

Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, catalinaborbolla@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-4543-0189

 **Massiel Guadalupe Osuna Gallardo**

Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, massielosuna@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-3201-6448

 **Luis Rodrigo Zazueta Medina**

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, México, luisrodrigo.zazueta@uas.edu.mx; ORCID: 0000-0003-3171-9811

Doi: <https://doi.org/10.36677/qret.v26i2.22970>

Abstract: Land use change is appreciated as an important element shaping the behaviour of urban heat islands (UHI). This article claims to characterize surface urban heat islands in an agrocity, considering the presence of the urban cold island phenomenon –a concept associated with agricultural contexts–. High-resolution satellite imagery processing, using ArcGis 10.80 software, was employed to develop maps of land surface temperature for an analysis of the behaviour of surface urban heat islands stemming from agricultural activity in the peri-urban area of Culiacán City. It was detected that the effect of these islands exhibits characteristics of the urban cold island phenomenon during certain seasons.

Keywords: urban cold island, Landsat, agrocity, geographic information systems

Introducción

Las islas de calor urbanas (ICU) son un fenómeno que constituye una alteración al clima natural de las áreas urbanas, a mesoescala y microescala, donde se presenta un aumento de las temperaturas (Grajeda, 2020), suelen caracterizarse por la presencia de temperaturas más elevadas dentro del área urbana, en comparación con las áreas periurbanas y rurales periféricas de las ciudades (Environmental Protection Agency [EPA], 2023), no obstante es posible encontrar excepciones.

Diversos autores han hecho referencia a conceptos que describen el efecto inverso a las ICU, como el efecto de oasis urbano (López González *et al.*, 2021), asociado a una mayor presencia de vegetación en el interior del área urbana con respecto al suelo desnudo del desierto. Los conceptos *urban heat sink* (Peña, 2008; Peña, 2009), *isla de frío urbano* (Casadei *et al.*, 2021) e *isla de calor negativa* (Soberón Forsberg y Obregón Párraga, 2016) han sido relacionados a condiciones climatológicas que determinan la presencia de vegetación y cuya característica en común es presentar temperaturas menos elevadas en el interior del área urbana con respecto al área rural. Así mismo, otra característica de este tipo de ICU, es que suelen manifestarse en ciudades localizadas en climas tropicales, semiáridos y áridos (Imhoff *et al.*, 2010; Casadei *et al.*, 2021; Taheri Shahraini *et al.*, 2016), presentando mayor intensidad en una estación del año con respecto a las demás temporadas. Adicionalmente, con respecto a las islas de frío urbano, su presencia ha sido asociada a contextos agrícolas (Casadei *et al.*, 2021), siendo este último componente el menos documentado.

En ese sentido, se ha tomado como caso de estudio la ciudad de Culiacán, Sinaloa, la cual cuenta con una rica historia agrícola, puesto que para los primeros años del siglo XXI la ciudad ya contaba con noventa años de bagaje en la agricultura comercial. Además, la estructura económica de Sinaloa se compone de cuatro pilares fundamentales: la agricultura de exportación, la pesca comercial, la ganadería precapitalista y la agricultura de subsistencia. (Mascareño López, 2010)

El área urbana de Culiacán se encuentra delimitada por un área periurbana con un uso de suelo predominantemente agrícola de riego, seguido de agrícola de temporal, y en menor medida se presenta una cobertura natural de selva baja caducifolia. Es por dichas características que puede ser considerada *agrociudad*.

Una agrociudad es definida como un tipo de ciudad con una fuerte dinámica agrícola, aunada a una alta fertilidad empresarial, capaz de ser un punto de referencia para la administración y atención del área agrícola que lo rodea. Proveer un conjunto de servicios imprescindibles como almacenamiento, mantenimiento, diversión, educación, seguridad, crédito, salud y contactos sociales. Aglomerar parte importante de la transformación industrial de la materia prima cosechada en el entorno rural y ser preponderante en un sistema de ciudades pequeñas y medianas que se desarrollan en el mismo territorio (Cerutti, 2006).

Durante la última década, se han estudiado los efectos de la agricultura urbana y periurbana en la reducción de la temperatura en las ciudades (Evans *et al.*, 2022; Jenerette *et al.*, 2011; Lucertini y Di Giustino, 2021) evidenciando la importancia de entender este fenómeno, ya que, la creciente demanda de alimentos también implica un estrés para las agrociudades y la preservación del ecosistema.

Por lo tanto, su estudio desde el fenómeno de las ICU estaría contribuyendo al entendimiento de la línea de investigación en contextos agrícolas. Para el caso de Culiacán, no se cuenta con estudios documentados o trabajos publicados sobre el análisis de ICU, a pesar de ser un fenómeno urbano altamente documentado a escala global (Manzanilla, 2022).

La evidencia documental analizada sugiere que en una ciudad con las características que posee Culiacán será posible observar el efecto de isla de frío urbano, así como una marcada diferencia entre las ICU que sean identificadas principalmente en verano e invierno, siendo estas significativamente mayores y más observadas en verano que las de invierno.

Por lo tanto, por medio del presente estudio se busca en primer lugar, identificar la presencia del fenómeno de ICU en Culiacán, para posteriormente comprobar si su comportamiento responde al componente de contexto agrícola al ser una agrociudad y con ello, contribuir a la literatura de islas de frío urbanas en contextos agrícolas por medio de la generación de evidencia.

El documento se compone de un apartado de metodología, en el que se describe el diseño metodológico, de forma secuencial, empleado en la investigación, acompañado de las fórmulas empleadas y su debida explicación; posteriormente, en el apartado de resultados se muestran los datos obtenidos mediante la aplicación metodológica; seguido de un apartado de discusión, y un breve apartado de prospectiva. Se finaliza con las principales conclusiones.

Metodología

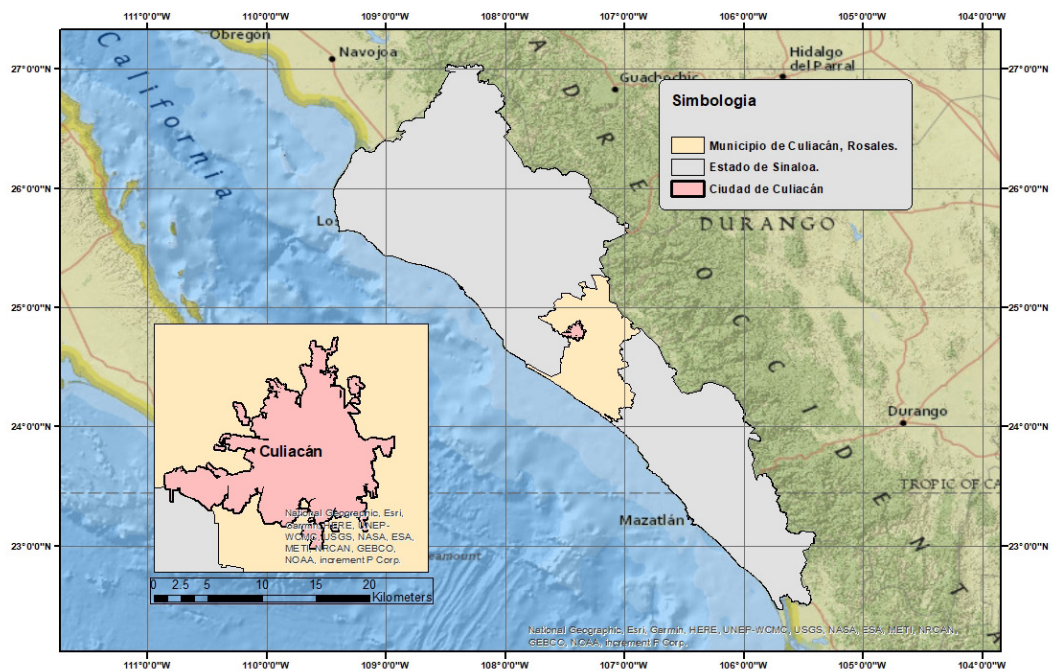
En este apartado se expone la metodología empleada para la obtención de mapas de temperatura superficial terrestre (TST) por medio del procesamiento de imágenes satelitales, para la caracterización de las islas de calor urbanas superficiales (ICUS),

que son aquellas que hacen referencia a la capa inmediata al suelo (Mercado y Marincic, 2017), y su obtención se da a partir de la medición de las temperaturas de superficie terrestre mediante percepción remota. Así mismo, suelen manifestar una mayor diferencia térmica durante el día (Barrera Alarcón *et. al.*, 2022).

Caso de estudio

La ciudad de Culiacán se localiza en el estado de Sinaloa, México. Es la capital del estado y la zona urbana más grande y poblada de este. Sus coordenadas geográficas son 107°23'16.15"O de longitud y 24°47'25.15"N de latitud (imagen 1).

Imagen 1. Localización de la ciudad de Culiacán

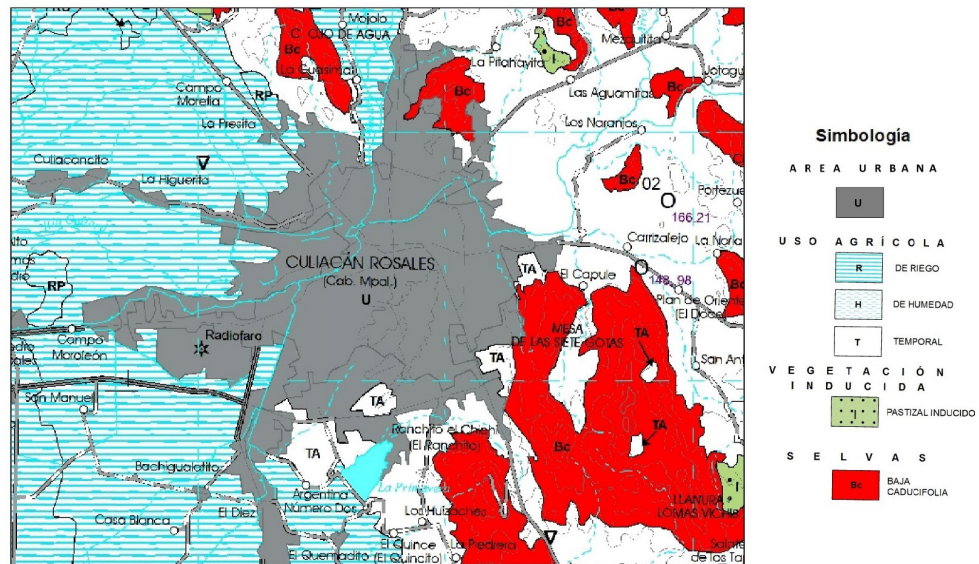


Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), la ciudad de Culiacán tiene un tipo de clima BS1(h')W, denominado cálido semiárido, con régimen de lluvias en verano. Las principales características de este tipo de clima son temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Las lluvias inician en junio y terminan en septiembre, con una precipitación media a nivel estatal de 790 mm anuales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024), no obstante la temporada de huracanes suele extenderse hasta el mes de noviembre.

Al ser considerada una agrociudad, Culiacán presenta una fuerte influencia agrícola en sus actividades económicas; el área urbana se encuentra delimitada por un alto porcentaje de suelo agrícola de riego, seguido de suelo agrícola de temporal y cobertura natural de selva baja caducifolia (imagen 2).

Imagen 2. Cobertura agrícola y natural en el área periurbana de Culiacán



Fuente: Elaborada por autores, con datos de INEGI.

Dicho cambio de uso de suelo de cobertura natural a suelo agrícola de riego representa una alteración en los ciclos naturales de presencia de vegetación de acuerdo al régimen de lluvias, suponiendo una influencia directa en la TST e impactando en el comportamiento de las ICU.

Procesamiento de imágenes

Se consideraron los metadatos capturados por el satélite Landsat 8, Collection 2, Level 1, obtenidos de la plataforma de libre acceso USGS Earth Explorer. Para su procesamiento se trabajó con el programa de georreferenciación ArcGis y las fórmulas establecidas por The United States Geological Survey (USGS). Para la obtención de la TST se utilizaron las bandas 10 y 11 (térmicas); la banda 4 (roja) y banda 5 (infrarroja) para el cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Para realizar el análisis, se seleccionaron los eventos de los días 1 de enero, 13 de abril, 23 de julio y 30 de octubre de 2022, todos capturados a las 15:35 h. La selección de los eventos se realizó de acuerdo a dos criterios: buscando la poca o nula presencia de nubes en la imagen y que cada uno de los eventos correspondiera a una estación del año.

Cálculo de la radiancia espectral (TOA)

Para el cálculo de TOA (*Top of Atmosphere*), se empleó la ecuación dada por la USGS (Condori Ccollanqui, 2020):

$$TOA = ML * Qcal + AL$$

Donde (Ariza, 2013):

ML= Factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato

(RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda)

Qcal= Corresponde a cada banda (banda 10 y banda 11). La ecuación debe ser aplicada para cada banda, sustituyendo el valor de Qcal.

AL= Factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato

(RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

La ecuación escrita en la calculadora ráster sería: (RADIANCE_MULT_BAND_x)*"x"+ (RADIANCE_ADD_BAND_x). Donde la x debe ser sustituida por los valores de la banda correspondiente. Así mismo, es importante mencionar que la ecuación debe ser aplicada de manera individual a las bandas 10 y 11, teniendo como resultado un TOA cada una de estas.

Temperatura de brillo (BT)

Se convierten los datos de las bandas 10 y 11 a la temperatura de brillo (BT), partiendo de la radiancia espectral (TOA), utilizando las constantes térmicas proporcionadas en el archivo de metadatos, siguiendo la siguiente ecuación:

$$BT = \left(\frac{K_2}{LN \left(\frac{K_1}{TOA} \right) + 1} \right) - 273.15$$

Donde (Ariza, 2013):

K1= Constante de conversión térmica específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

K2= Constante de conversión térmica específica para cada banda, dicha constante térmica se suministra en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_x, donde x es el número de la banda, 10 o 11)

BT= Temperatura de Brillo aparente en grados Celsius

TOA= Corresponde a la reflectancia en el techo de la atmósfera TOA

La ecuación escrita en la calculadora ráster sería: $(K2_CONSTANT_BAND_10 / \ln((K1_CONSTANT_BAND_10 / TOA) + 1)) - 273.15$, donde la x debe ser sustituida por los valores de la banda correspondiente.

Una vez aplicada la ecuación a los TOA obtenidos de cada banda (10 y 11) y teniendo como resultado BT de la banda 10 y BT de la banda 11, se debe realizar una combinación de bandas. En ArcGis, ir a Toolbox - Local - Cell Statistics, arrastrar los BT de las bandas 10 y 11 y combinarlos para generar un solo BT.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El cálculo del NDVI se realizó por medio del método expuesto por Stathopoulou y Cartalis (2007). Se emplea la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(Banda\ 5 - Banda\ 4)}{(Banda\ 5 + Banda\ 4)}$$

Donde, (Stathopoulou y Cartalis, 2007):

NDVI 0: Cuando el NDVI es 0, se clasifica como agua

NDVI < 0.2: Los píxeles se consideran como suelo urbano.

0.2 ≤ NDVI ≤ 0.5: valores mayores o igual a 0.2 y menor o igual a 0.5, los píxeles son considerados mixtos entre vegetación y suelo urbano

NDVI > 0.5: Cuando el NDVI tiene valores mayores a 0.5, los píxeles son considerados de vegetación.

La ecuación en la calculadora ráster sería: $\text{Float}("B5" - "B4") / \text{Float}("B5" + "B4")$.

Proporción de vegetación (Pv)

Para el cálculo de la proporción de la vegetación, se empleó la siguiente ecuación:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

Donde:

NDVI_{min} y NDVI_{max}, son los valores que se obtuvieron en el Layer del cálculo de NDVI en ArcGis. El NDVI_{max} corresponde al valor High y el NDVI_{min} corresponde al valor Low.

La ecuación sería: $PV = \text{Square}((NDVI - NDVI_{MIN}) / (NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}))$. Se debe resaltar que, en caso de que el valor de NDVI_{MIN} sea negativo, se deberá respetar el signo.

Emisividad (E)

Se realiza el cálculo de la emisividad, con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 0.004 * Pv + 0.986$$

La ecuación escrita en la calculadora ráster sería: 0.004*“PV”+0.986. Los valores numéricos son constantes.

Temperatura superficial terrestre (TST)

Por último, se calcula la TST, con la ecuación:

$$TST = \left(\frac{BT}{1 + \left(0.00115 * \frac{BT}{1.4388} \right) * LN(\varepsilon)} \right)$$

La ecuación en la calculadora ráster sería: (“BT”/(1+(0.00115* “BT”/1.4388)* Ln(“E”))). Los valores numéricos son constantes.

Caracterización de ICUS presentes en la agrocuidad de Culiacán

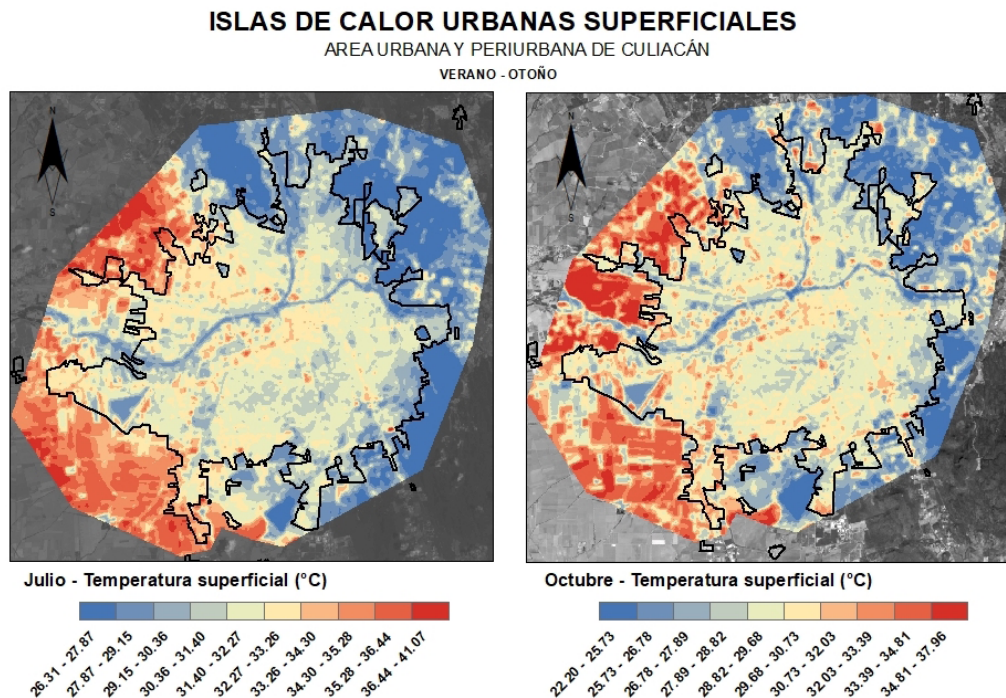
Una vez aplicada la metodología fue posible la elaboración de mapas de TST, los cuales al ser analizados muestran las particularidades de las ICUS en Culiacán. Las tonalidades asignadas a las temperaturas se clasifican en diez rangos de acuerdo a la clasificación de datos de cortes naturales, por lo tanto en cada evento analizado los rangos de temperatura de las ICUS son diferentes. Así mismo, se determinó un polígono de análisis estándar con la finalidad de evitar las nubes presentes en las imágenes satelitales analizadas, ya que estas alteran la TST.

La primera característica particular de las ICUS obtenidas es una clara diferenciación en su comportamiento durante verano-otoño e invierno-primavera. Durante el evento de verano las temperaturas fueron de 26.31°C a 41.07°C (imagen 3), encontrándose las temperaturas más bajas en los cuerpos de agua y en las zonas no urbanizadas de la periferia norte, noreste y sureste, coincidiendo con la temporada de lluvias, por lo tanto, el regreso de la cobertura natural en estas zonas.

Es también durante este evento que la zona agrícola periurbana presenta las temperaturas más altas. La época de cosecha ocurre en mayo y el suelo agrícola queda desnudo durante el verano, lo que da paso a la absorción de la radiación solar, que es liberada durante la noche en forma de calor.

Además, se presentan ICUS de menor extensión al interior de la ciudad, predominantemente en áreas de alta concentración de actividad económica y flujo vehicular.

Imagen 3. Mapas de islas de calor urbanas superficiales de la ciudad de Culiacán en verano-otoño



Fuente: Elaboración propia, con base en análisis de mapa de temperatura superficial terrestre en verano-otoño con datos de USGS EarthExplorer.

Durante el otoño se presentaron temperaturas desde 22.20°C a 37.96°C (imagen 3), se observa una disminución de la temperatura más alta con respecto del evento analizado en verano, sin embargo, en este evento las condiciones de las ICUS son similares a las de verano, ya que las temperaturas más bajas se encuentran en los cuerpos de agua y la zona de cobertura vegetal natural; las más altas, de nuevo en la zona agrícola periurbana.

Las ICUS que se localizan al interior de la ciudad coinciden con las del evento analizado en verano, sin embargo, aunque presentan una disminución en las temperaturas, la extensión de estas se incrementa.

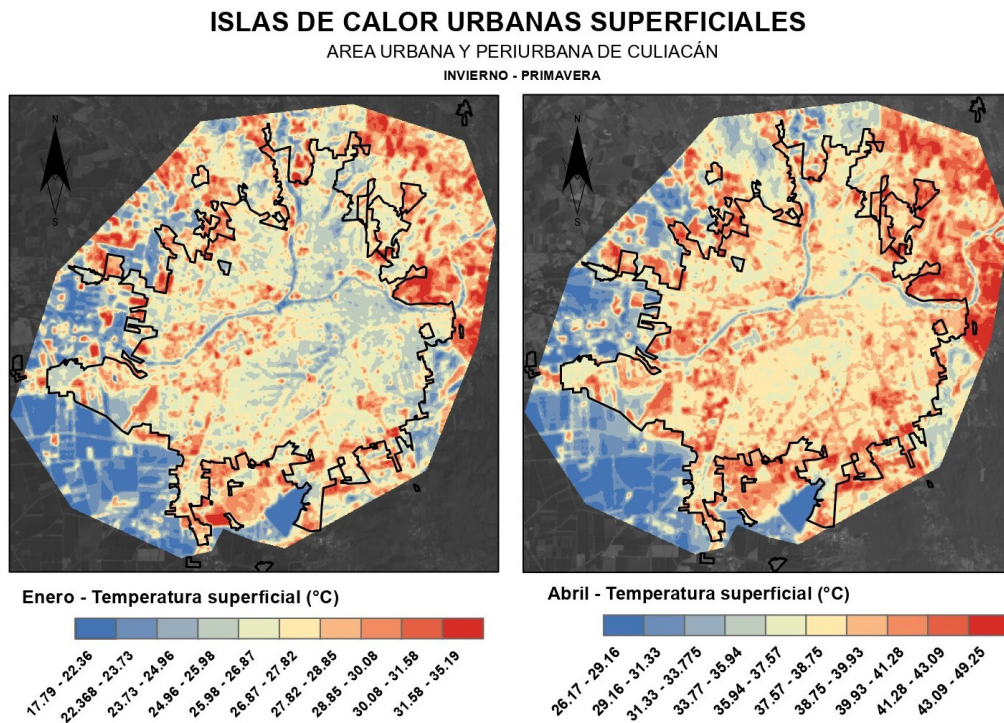
Durante estos dos eventos se observaron áreas con las temperaturas más bajas en las grandes zonas habitacionales rodeadas de importantes zonas comerciales y avenidas de alto flujo vehicular.

En invierno se obtuvieron temperaturas de 17.79°C a 35.19°C (imagen 4) representando el evento más frío. En este caso, las temperaturas más bajas se encuentran en los cuerpos de agua y en la zona agrícola periurbana, ya que durante esta temporada la presencia de cultivos provoca una disminución de las temperaturas.

Por el contrario a lo que se observó en verano y otoño, la zona periurbana de cobertura natural se encuentra seca y por lo tanto hay un aumento de las temperaturas en estas zonas.

En cuanto a las ICUS con las temperaturas más altas al interior de la ciudad, estas coinciden frecuentemente con las de los eventos analizados anteriormente, sin embargo, en enero son más numerosas y presentan mayores extensiones, a pesar de que las temperaturas son menores. Estas ICUS interiores también tienden a fusionarse con las zonas periurbanas de cobertura natural.

Imagen 4. Mapas de islas de calor urbanas superficiales de la ciudad de Culiacán en invierno-primavera



Fuente: Elaboración propia con base en análisis de mapa de temperatura superficial terrestre en invierno-primavera, con datos de USGS EarthExplorer.

El evento analizado en primavera presenta temperaturas de 26.17°C a los 49.25°C (imagen 4), esto indica mayores temperaturas que incluso en verano. En abril, el fenómeno de ICUS es similar al de invierno, sin embargo, las temperaturas son más elevadas y las ICUS alcanzan su extensión más amplia en todo el año.

Durante este evento, se repiten los fenómenos de las zonas periurbanas relacionadas a la agricultura y a la cobertura vegetal, donde la presencia de cultivos provoca una disminución de las temperaturas, principalmente en el este y

suroeste; y un aumento, en la zona norte y noreste debido a la pérdida natural de la cobertura vegetal.

Es precisamente durante este evento que se alcanza la máxima pérdida de cobertura vegetal y por lo tanto esto no solo afecta las zonas periurbanas con poca urbanización, sino que al interior de la ciudad también se pierde vegetación y provoca un aumento de las temperaturas y de las extensiones de las ICUS.

Las ICUS interiores coinciden con las del evento de invierno, es decir, que están presentes en las zonas de concentración de actividades económicas, es durante la primavera que se puede apreciar notablemente la formación de ICUS lineales que surgen de la infraestructura vial en avenidas principales y de alto flujo vehicular.

Discusión

Los resultados del estudio son consistentes con la literatura referente al efecto inverso a las ICU (denominado por algunos autores *urban heat sink*, *isla de frío urbano* o *isla de calor negativa*), presente en ciudades localizadas en climas tropicales, semiáridos y áridos, donde además, las condiciones climatológicas determinan la existencia de vegetación en diferentes momentos del año. Se observó la presencia del efecto de isla de frío urbano durante verano, otoño e invierno.

En verano y otoño el efecto es inducido “artificialmente” por el cambio que se ha dado de cobertura natural a suelo agrícola de riego en el área periurbana, ya que de no existir la presencia de suelo agrícola, no se presentaría el efecto de isla de frío urbano. Por otro lado, en el caso de invierno, de no existir suelo agrícola, dicho efecto se incrementaría. Por lo tanto, un hallazgo importante es que los contextos agrícolas en las áreas periurbanas influyen directamente en la presencia de islas de frío urbano, confirmando lo expuesto por Casadei *et al.* (2021).

En Sinaloa, el ciclo de siembra otoño-invierno, por medio de la agricultura de riego, es el de mayor importancia (Ramírez Díaz *et al.*, 2010), lo cual corresponde con lo observado en invierno y primavera (imagen 4); donde el sector oeste periurbano de la ciudad de Culiacán se presenta en color azul, lo que significa temperaturas más bajas por la presencia de siembra agrícola de riego. En cambio, en verano y otoño (imagen 3), ese mismo sector se observa en color rojo, que se traduce como temperaturas de TST elevadas, correspondiente a suelo desnudo al no existir la presencia de siembra. Cabe mencionar que, el ciclo de siembra otoño-invierno comienza, en promedio, a finales del mes de octubre en la zona centro de Sinaloa.

La vegetación en los entornos urbanos tiene un efecto de reducción de temperaturas por lo que contribuye a la dinámica de las ICU, en este sentido, durante la última década se han estudiado los efectos de la agricultura urbana y

periurbana en la reducción de la temperatura en las ciudades (Evans *et al.*, 2022; Jenerette *et al.*, 2011; Lucertini y Di Giustino, 2021), evidenciando la importancia de entender este fenómeno; ya que la creciente demanda de alimentos también implica un estrés para las agrociudades y la preservación del ecosistema.

Por otro lado, se identificó una mayor amplitud de TST (diferencia de temperatura entre el área urbana y área periurbana) durante el evento de abril, lo cual difiere con lo encontrado por Imhoff *et al.* (2010), donde en verano es cuando se presenta una mayor amplitud de TST. Cabe destacar que, dichos resultados corresponden a biomas dominados por bosque templado latifoliado y mixto, a diferencia del caso de estudio abordado en la presente investigación, donde el bioma puede ser descrito como selva baja caducifolia en clima cálido semiárido.

Destaca que los resultados permiten identificar la dinámica que se genera por la presencia de suelo agrícola y de cobertura vegetal natural de selva baja caducifolia en la zona periurbana, ya que la distribución de la temperatura en la época de lluvia (medida en los eventos de julio y octubre) evidencia el alza de temperaturas en la zona agrícola periurbana y en la temporada seca (medida en enero y abril).

Desde un punto de vista urbano, las ICUS de los cuatro eventos tienen configuraciones semejantes, con presencia de las fuentes urbanas componentes del calor antropogénico descritas por Grimmond *et al.* (2010); siendo las principales derivadas de sectores con altos consumos de energía, incluyendo densas áreas poblacionales, vialidades con grandes concentraciones de vehículos, áreas industriales, infraestructura de transporte y edificios públicos y privados. Resulta importante resaltar que los núcleos de las ICUS detectados en la condición de invierno (evento menos crítico en cuanto a consumo energético), se mantienen en los demás eventos, siendo estos los núcleos de calor urbano de la ciudad a lo largo del año.

Respecto a las TST obtenidas, los rangos térmicos que componen las ICUS mostraron temperaturas elevadas, llegando a los 49.25°C en el evento correspondiente a primavera; mientras que en invierno la TST más alta detectada es de 35.19°C. Si bien, existe una diferencia notable en los dos eventos, son temperaturas altas, que son percibidas por las personas y expresadas como sensación térmica (Soberón, 2015). Lo cual desde el punto de vista de confort indica que durante los cuatro eventos analizados las personas pueden llegar a experimentar sensación de incomodidad térmica en la ciudad, aun en la temporada más fría del año.

Con relación a la vegetación y los cuerpos de agua, pudo observarse que la cobertura vegetal del terreno natural presente en la periferia de la ciudad y el aumento de los cuerpos de agua, tiene un impacto directo con la TST en el interior de la ciudad. Siendo en los eventos de verano y otoño cuando el efecto de cerros desnudos desaparece y el cauce de ríos y diques aumenta a causa de la presencia

de lluvias, además hay presencia de follaje y la cantidad de ICUS disminuye, así como la concentración de núcleos de calor en estas.

Por todo lo anterior, se encuentra que son las precipitaciones ocurridas durante el régimen de lluvias (verano) y las precipitaciones presentes en la temporada de huracanes (finales de octubre y principios de noviembre), aunado a la dinámica de la cobertura agrícola de riego, lo que moldea principalmente el comportamiento de las ICUS en la ciudad de Culiacán, evidenciando la presencia de dos temporadas preponderantes: seca y lluviosa.

Prospectiva

Esta investigación pretende abrir una nueva temática al entender el comportamiento de las ICUS en una agrociedad de clima cálido semiárido, lo que servirá posteriormente para estudiar los efectos de estas en la estructura urbana, los materiales de las edificaciones y el espacio público, así como los efectos en la movilidad urbana, el calor antropogénico generado por la concentración de actividades y las repercusiones en la población.

Las futuras investigaciones que de aquí se derivarán requerirán de equipo especializado para la medición del calor en áreas específicas de la ciudad y en un mayor rango de tiempo, preferentemente de manera anual con el fin de contrastar el comportamiento de las ICUS en las temporadas lluviosa y seca, su estudio a escala regional, local y microescala.

El fin de entender este fenómeno en una ciudad que cuenta en el área periurbana con suelo agrícola de riego y suelo de cobertura natural de selva baja caducifolia es proponer estrategias de control y mitigación del calor para incidir en la toma de decisiones desde la política pública.

Conclusiones

El análisis de las ICUS por medio de la TST muestra que las variaciones en el comportamiento de las ICUS se encuentra definido por la cobertura agrícola de riego y el régimen de lluvias en verano, no por las estaciones del año, puesto que los hallazgos más relevantes se relacionan con la dinámica generada entre el ciclo de siembra otoño-invierno y la presencia de cobertura natural durante los meses con precipitaciones.

Se concluye que el cambio de uso de suelo de una cobertura natural a una artificial, como es el suelo agrícola de riego, tiene un impacto directo en el comportamiento de las ICUS. En el caso específico de Culiacán, este cambio favorece a la aparición del efecto de isla de frío urbano durante los meses más calientes del año.

Con respecto a las temperaturas de las ICUS, se presenta un efecto hacia el área urbana causado por el uso de suelo del área periurbana; debido a los tiempos

de siembra, se crean dos periferias —cálida y fría— en cada estación, por lo que cuando hay siembra activa, la cobertura natural está en su etapa de pérdida de follaje; por el contrario, cuando es época de cosecha y el suelo agrícola queda descubierto, la cobertura natural está activa.

Por esta razón, la vegetación de las áreas periurbanas de Culiacán y los cambios de esta a lo largo del año configuran la TST. Esta se caracteriza por la presencia de un polo cálido y otro frío, los cuales a su vez se invierten dependiendo de la temporada y determinan los rangos de TST que se presentan en cada evento analizado en esta investigación.

Por lo tanto, en una agrociudad como Culiacán deberían considerarse las actividades de siembra, sus efectos en la TST y en el comportamiento de las ICUS, como variable relevante en las acciones de adaptación y mitigación del cambio climático en el área urbana.

Se considera este trabajo como un punto de partida para el estudio de las ICU en la ciudad de Culiacán, al haber abierto la posibilidad a futuras investigaciones necesarias para entender el comportamiento de las ICUS en la ciudad. En este sentido, se recomienda realizar análisis por periodos de tiempo más prolongados, así como realizar un estudio comparativo con la temperatura del aire por medio de datos recopilados *in situ*, y de ser posible, con datos de estaciones meteorológicas localizadas en la ciudad. No obstante, se corre el riesgo de no obtener datos estadísticos confiables sobre temperatura del aire debido al bajo número de estaciones meteorológicas localizadas en la ciudad.

Así mismo, la agrociudad de Culiacán por sus características particulares como el tipo de clima, la actividad agrícola, el tipo de vegetación, la presencia de cuerpos de agua, entre otras, resulta un caso de estudio interesante, donde la estación con mayores ICU es primavera por la escasez de lluvias, mientras que en verano, otoño e invierno puede ser observado el efecto de isla de frío urbano, ya sea inducido artificialmente por la actividad humana asociada a la agricultura o de forma natural.

Referencias

- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G. y Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*, 5(3), 312–330. <https://doi.org/10.37636/recit.v53312330>
- Casadei, P., Semmartin, M. y Garbulsky, M. F. (2021). Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina. *Ecología Austral*, 31(1) 190-203. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.1.0.970>
- Cerutti, M. (2006). La construcción de una agrociedad en el noroeste de México. Ciudad Obregón (1925-1960). *Secuencia*, 64, 113-143. <https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i64.954>
- Condori Ccollanqui, C. G. (2020). *Evaluación espacial para la identificación de islas de calor mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8 de los años 2014 y 2020 en la ciudad de Juliaca* [Tesis de Bachiller en Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión] Repositorio de la Universidad Peruana Unión <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3759>
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2023). *Heat Island Effect*. <https://www.epa.gov/heatislands>
- Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Mead, B. R. y Davies, J. A. C. (2022). Ecosystem service delivery by urban agriculture and green infrastructure - a systematic review. *Ecosystem Services*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101405>
- García, E. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Grajeda, R. (2020). *Calor antropogénico vehicular en los parámetros físicos de un cañón urbano. Para clima cálido húmedo* [Tesis de doctorado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Repositorio UMSNH
- Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L. S., Liu, C. H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D. y Voogt, J. (2010). Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1(1), 247–274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.016>

- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R.E. y Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (21 de enero de 2024). *Clima. Cuéntame...* Información por entidad. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/sin/territorio/clima.aspx?tema=me&e=25>
- Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Stefanov, W. L. y Martin, C. A. (2011). Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA. *Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America*, 21(7), 2637–2651. <https://doi.org/10.1890/10-1493.1>
- López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E. y Navarro Estupiñán, J. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera Norte*, 33. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2088>
- Lucertini, G., y Di Giustino, G. (2021). Urban and peri-urban agriculture as a tool for food security and climate change mitigation and adaptation: The case of mestre. *Sustainability*, 13(11):5999 <https://doi.org/10.3390/su13115999>
- Manzanilla, U. (2022). Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México. *Desde el Herbario CUCY*, 14, 178–186. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2022/2022-09-01-Manzanilla_Ulises-Islas-de-calor.pdf
- Mascareño López, G. B. (2010). *El funcionamiento del Sistema de Ciudades en Sinaloa*. Universidad Autónoma de Sinaloa. Plaza y Valdés Editores.
- Mercado, L. y Marincic, I. (2017). Morfología de isla de calor urbana en Hermosillo, Sonora y su aporte hacia una ciudad sustentable. *Biotécnica*, 19(E3), 27-33. <https://doi.org/10.18633/biotecnica.v19i0.407>
- Peña, M. A. (2008). Relationships between remotely sensed surface parameters associated with the urban heat sink formation in Santiago, Chile. *International Journal of Remote Sensing*. 29(15), 4385-4404. <https://doi.org/10.1080/01431160801908137>
- Peña, M. A. (2009). Examination of the land surface temperature response for Santiago, Chile. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(10), 1191-1200. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.10.1191>
- Ramírez Díaz, J. L., Wong Pérez, J. J., Ruiz Corral, J. A. y Chuela Bonaparte, M. (2010). Cambio de fecha de siembra del maíz en Culiacán, Sinaloa, México. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 33(1), 61-68. <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.1.61>

- Soberón Forsberg, V. S. y Obregón Párraga, E. (2016). Identificación de islas de calor en la ciudad de Lima Metropolitana utilizando imágenes del Satélite Landsat 5TM. *Anales Científicos*, 77(1), 34-44. <https://doi.org/10.21704/ac.v77i1.475>
- Stathopoulou, M., y Cartalis, C. (2007). Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece. *Solar Energy*, 81(3), 358-368. <https://doi.org/10.1016/j.soler.2006.06.014>
- Taheri Shahraiyni, H., Sodoudi, S., El-Zafarany, A., Abou El Seoud, T., Ashraf, H. y Krone, K. (2016). A Comprehensive Statistical Study on Daytime Surface Urban Heat Island during summer in Urban Areas, Case Study: Cairo and Its New Towns. *Remote Sensing*, 8(8), 643. <https://doi.org/10.3390/rs8080643>