

ANÁLISIS ESPACIOTEMPORAL DE ISLAS DE CALOR APLICADO EN LA CIUDAD COSTERA DE SAN FRANCISCO DE CAMPECHE, MÉXICO¹

SPATIAL-TEMPORAL ANALYSIS OF HEAT ISLANDS APPLIED TO THE COASTAL CITY OF
SAN FRANCISCO DE CAMPECHE, MEXICO

ROMÁN CANUL-TURRIZA ²
KARIANNA AKÉ-TURRIZA ³
OSCAR MAY-TZUC ⁴
MARIO JIMÉNEZ-TORRES ⁵

1 Este trabajo forma parte de la investigación "Observatorio Climatológico de San Francisco de Campeche (Etapa 01)"

2 Doctor en Ingeniería
Profesor – Investigador de la Facultad de Ingeniería.
Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.
<https://orcid.org/0000-0003-2081-9913>
roacanul@uacam.mx

3 Magíster en Proyectos de Arquitectura y Urbanismo
Estudiante de la Facultad de Ciencias Químico Biológicas
Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, San Francisco de Campeche, México.
<https://orcid.org/0009-0001-6598-216X>
al041220@uacam.mx

4 Doctor en Ingeniería
Profesor-Investigador de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
oscajmay@uacam.mx

5 Doctor en Ingeniería
Profesor de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México.
<https://orcid.org/0000-0002-8331-1888>
majimene@uacam.mx

<https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.49.01>



La urbanización de la ciudad de San Francisco de Campeche influye en la formación de isla de calor urbano debido a materiales de construcción, edificios y estructuras, actividades humanas, falta de vegetación, e infraestructura de transporte. Las islas de calor tienen consecuencias negativas como aumento en el consumo de energía y un mayor estrés térmico en la población. Además, contribuyen al cambio climático debido al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, causadas por la demanda adicional de energía. Ciudades como Sidney, Beijing, Nanjing, Moscú y Hong Kong están implementando estrategias de planificación urbana que promueven la vegetación urbana, el uso de materiales de construcción reflectantes, la mejora del transporte público y la promoción de la eficiencia energética en edificios. Con el fin de identificar islas de calor se utilizaron imágenes satelitales Landsat. Se analizó el crecimiento de la población y la mancha urbana realizando un análisis de índice de vegetación. En relación con los análisis realizados, se identificó que la temperatura ha aumentado aproximadamente 6°C entre los años 1990 y 2022; así como ha disminuido la vegetación ante el crecimiento de la mancha urbana y las viviendas, cuadruplicando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en la clase 0-0.25. Finalmente, se proponen medidas de mitigación para contrarrestar los efectos que causan las islas de calor en la ciudad.

Palabras clave: islas, calor, ciudad, costa

The urbanization of the city of San Francisco de Campeche influences the formation of urban heat islands due to construction materials, buildings and structures, human activities, lack of vegetation, and transportation infrastructure. Heat islands have negative consequences such as increased energy consumption and heat stress for the population, contributing to climate change due to increased greenhouse gas emissions caused by additional energy demand. Cities such as Sydney, Beijing, Nanjing, Moscow, and Hong Kong are implementing urban planning strategies that promote urban vegetation, the use of reflective building materials, the improvement of public transport, and the promotion of energy efficiency in buildings. Landsat satellite images were used to analyze population growth and urban sprawl to identify heat islands, and a vegetation index analysis was also made. Regarding the analyses, it was recognized that the temperature increased by approximately 6°C between 1990 and 2022. There has also been a decrease in vegetation due to the urban sprawl and housing growth, quadrupling the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the 0-0.25 class for the same period. Finally, mitigation measures are proposed to counteract the effects caused by heat islands in the city.

Keywords: islands, heat, city, coastline

I. INTRODUCCIÓN

La urbanización es de los procesos humanos con mayor impacto al medio ambiente y clima. En las urbes se concentra el 55% de la población mundial con un incremento previsto al 68% para el 2050 (Ma et al., 2023) y emiten agentes dañinos para la salud e influyen en la meteorología local. Además, el crecimiento urbano, el desarrollo económico y los cambios en el uso del suelo son una amenaza para los seres humanos y el ecosistema (Xu et al., 2021). Las urbes contribuyen al calentamiento global, principalmente por el efecto de las Islas de Calor Urbano o (UHI, por sus siglas en inglés *Urban Heat Island*).

Por ejemplo, en las regiones costeras del mundo el efecto de la UHI es extremo, modificando la meteorología regional desde extremas olas de calor hasta inundaciones y se prevé que se intensifique el fenómeno (Qiu et al., 2023). En estas regiones la complejidad aumenta producto de la brisa marina que dirige las UHI varios kilómetros tierra dentro hasta su disipación (Yun et al., 2020). Es necesario comprender la fenomenología permitiendo la formulación de políticas apoyando la toma de decisiones y planificación de escenarios que consideren: a) análisis de la escala de tiempo; b) inclusión del paisaje y forma urbana, proporción de áreas verdes y azules, mejora del albedo, distribución modal del transporte; c) tecnologías pasivas en la envolvente de edificios; d) tecnologías activas considerando climatización artificial; e) salud pública y participación ciudadana (Degirmenci et al., 2021). Por ello, enfocarse en la descentralización urbana, control de expansión, tasa de cobertura verde y la densidad de edificación mejorarán el entorno térmico y contaminación del aire (Luo y He, 2021).

Actualmente, existe una falta de conocimiento sobre la variación espacio-temporal de la intensidad de la UHI superficial tanto diurno como nocturno; así como se carecen de recursos para hacer frente a los rápidos impactos de la urbanización. Como alternativa, en los últimos años se ha recurrido al uso de imágenes satelitales para auxiliar en la detección de UHI, debido a su disponibilidad, acceso gratuito y amplio historial de registro. San Francisco de Campeche es una región importante porque pertenece a la lista de Patrimonio Mundial de la Humanidad y se encuentra en una zona costera con rápida urbanización, por lo que realizar un estudio enfocado en las Islas de Calor Urbano, utilizando imágenes satelitales del periodo 1990 – 2020, permitirá cuantificar los cambios históricos de la temperatura superficial y atmosférica, así como los cambios en la cobertura vegetal para identificar y caracterizar las Islas de Calor Urbano (UHI). Así mismo, se hipotetiza que los resultados del siguiente estudio revelarán las zonas con mayores cambios de temperatura y cobertura vegetal, proporcionando una base para proponer acciones de mitigación de los efectos de las Islas de Calor Urbano en San Francisco de Campeche.

II. MARCO TEÓRICO

Islas de Calor Urbano (UHI)

Las UHI son una anomalía térmica resultante de la diferencia de temperatura entre un área urbana y rural circundante, que incrementa la temperatura atmosférica debido al calor adicional emitido (Ortiz Porangaba et al., 2021). Éstas aumentan las cargas de refrigeración en verano y en consecuencia el consumo de energía, lo que deriva en mayores emisiones de gases de efecto invernadero (Khare et al., 2021). Este proceso térmico afecta a la población tanto por el incremento local de la temperatura, como por la liberación de agentes contaminantes a la atmósfera y la contaminación del aire. Por ello, es importante comprender cómo los componentes de las ciudades interfieren en las UHI, para establecer medidas de mejora en el entorno térmico urbano y reducir la contaminación del aire (Kim y Brown, 2021; Liang et al., 2021).

Con la rápida expansión de la urbanización en todo el mundo, el efecto de isla de calor urbano tiene un enorme impacto negativo en las ciudades, incluyendo energía, medio ambiente y condiciones de salud. Desafortunadamente la geometría constructiva y las actividades humanas intensifican severamente el fenómeno de UHI (Xu et al., 2021).

También se ha observado que la UHI y la contaminación del aire son responsables de grandes impactos en la salud. Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire en interiores causó aproximadamente 3,8 millones de muertes en 2016 y alrededor de 4,2 millones de muertes se atribuyeron a la contaminación del aire en el mismo año. Además, se estima que el 91% de la población vive en lugares donde el índice de calidad del aire supera los límites de las pautas entregadas por la OMS. Por lo tanto, regular la urbanización podría tener beneficios de doble vía (Singh et al., 2020). La urbanización coincide con cambios ambientales notables que incluyen la vegetación, el suelo y el clima (Vasenev et al., 2021), por lo que comprender cómo los componentes de las ciudades interfieren en la UHI se ha convertido en un gran desafío para las sociedades que buscan mejorar la calidad de vida a través de la implementación de criterios de planificación urbana (Hidalgo García y Arco Díaz, 2021).

La selección de indicadores de planificación urbana como la densidad de edificación, la superficie construida, la tasa de cobertura verde, entre otros, durante la fase de preparación de la planificación urbana puede regular la intensidad del desarrollo urbano y la configuración del entorno térmico urbano tras la aplicación de la propuesta de planificación (Luo y He, 2021); esta comprensión de la relación entre los indicadores de planificación urbana y la formación del ambiente término permite abordar con mayor detalle el

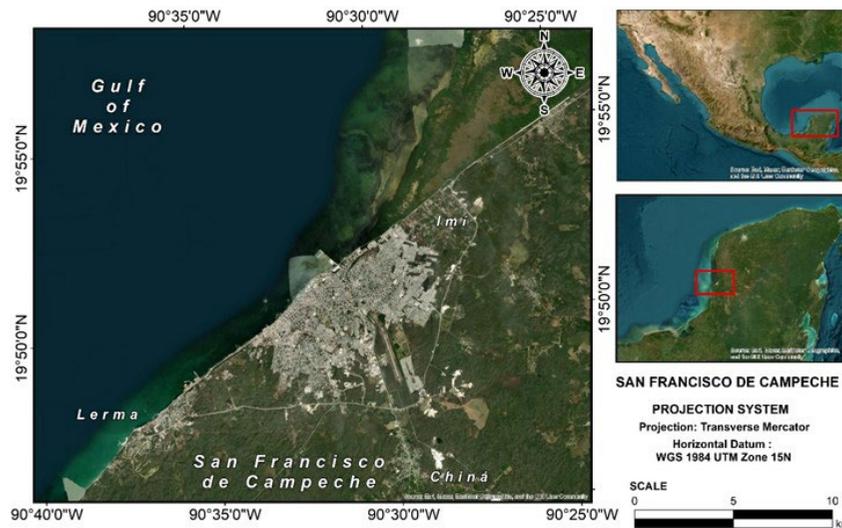


Figura 1. Locación de la ciudad de SFC, México. Fuente: Elaboración de los autores.

aspecto térmico durante la etapa de planificación, lo que facilita optimizar la propuesta de planificación urbana para mitigar los efectos de UHI (Luo y He, 2021).

Aún cuando las áreas urbanas enfrentan múltiples desafíos ambientales que interactúan con el cambio climático, incluido el efecto de UHI, la vegetación puede ser una solución basada en la naturaleza para la mitigación del efecto UHI (Tan et al., 2021). La interacción de las UHI en una ciudad tropical costera puede ser diferente a la de las ciudades en zona de clima templado, afectándola gravemente. Sin embargo, hay una carencia de estudios sobre UHI centradas en las ciudades tropicales costeras (Chew et al., 2021)

A nivel internacional se han realizado algunos estudios en ciudades costeras como Grecia (Giannaros y Melas, 2012), Oman (Charabi y Bakhit, 2011), en el Mar Caspio (Firozjaei et al., 2023), Estambul (Dihkan et al., 2015), China (X. Xu et al., 2023) y en el Mar Mediterráneo (Kassomenos et al., 2022), sin embargo, estos estudios aún son emergentes en México y el Golfo de México.

III. ESTUDIO DE CASO

Caso de estudio: Campeche, México

El estudio se realizó en la ciudad de San Francisco de Campeche (SFC) (19°50'41"N y 90°32'23"O) cabecera del Estado de Campeche (México) ubicada en la península de Yucatán, a orillas del Golfo de México (Figura 1).

San Francisco de Campeche es una ciudad histórica fortificada y una de las pocas ciudades amuralladas de América. Su centro histórico y sus antiguos barrios poseen construcciones que datan de los siglos XVI al XIX con arquitectura militar, civil y religiosa. Dado su contexto histórico y comercial, la homogeneidad de su arquitectura fue declarada en el año 1986 Zona de Monumentos Históricos, y en el año 1999 forma parte de la lista de Patrimonio Mundial de la Humanidad de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Posee una extensión de 3,410.64 km² con altitud promedio de 5 msnm (Figura 1). Se caracteriza principalmente por un clima cálido-húmedo con lluvias en verano, distribuido en tres temporadas: "Lluvias" (junio-septiembre); "Nortes" (octubre-enero); y "Seca" (febrero-mayo). La temperatura media anual de la ciudad es de 27°C, con promedios máximos en verano de 29°C y una temperatura máxima histórica de 43°C (INEGI, 2022).

Demográficamente, cuenta con 294,077 habitantes, 32% de los habitantes del Estado, con un incremento poblacional del 25 % en los últimos 10 años (INEGI, 2020) ; repercutiendo en una urbanización no planificada, originada por la invasión de terrenos que se transformaron en zonas habitacionales, reduciendo de este modo las áreas verdes dentro de la ciudad. Estas zonas son identificadas como potenciales UHI, generando un incremento urbano en el uso de aires acondicionados, alza en la demanda energética y mayor contaminación atmosférica.

Este tipo de patrón de crecimiento urbano, en San Francisco de Campeche está en gran manera asociado a un alto consumo energético, razón por la que se considera a esta ciudad como caso de estudio. Este análisis servirá para generar

una metodología que permita detectar y proponer mejoras exportables a otras ciudades con características similares, como el abordaje de problemas de salud pública, la mejora en la eficiencia energética, la protección del medio ambiente y la adaptación al cambio climático.

IV. METODOLOGÍA

Con el objetivo de identificar y caracterizar las UHI desde una perspectiva temporal y contrastarlo con el crecimiento poblacional, se propone desglosar el análisis en cuatro fases: (1) analizar el crecimiento poblacional de la ciudad de SFC; (2) cuantificar los cambios históricos de la temperatura (superficial y atmosférica); (3) cuantificar los cambios en la cobertura vegetal; e (4) identificar las zonas con mayores cambios de temperatura, cobertura vegetal y la relación entre ellos. Por lo anterior, la metodología analiza cuatro elementos temporales: temperatura de la superficie terrestre (en inglés *Land Surface Temperature* o LST), índice de vegetación de diferencia normalizada (en inglés *normalized difference vegetation index* o NDVI), crecimiento histórico poblacional y análisis del histórico local de temperatura, este último para reforzar el análisis de los cambios en la temperatura.

El análisis histórico climático se realizó a partir de datos del modelo ERA5 generado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a mediano plazo y por estaciones meteorológicas locales. El análisis poblacional se da a partir de registros demográficos de la región

Para el cálculo del LST y NDVI se emplearon imágenes satelitales Landsat, representadas en bandas espectrales. Estas imágenes son un insumo esencial para el análisis y tratamiento de los problemas ambientales que existen en las ciudades latinoamericanas debido a la escasa información disponible y a la precariedad de los sistemas de monitoreo y observación de cambios ambientales locales. Se analizaron imágenes Landsat-5TM, Landsat-7TM, Landsat-8OLI y Landsat-9OLI obtenidas de las bases del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey [USGS], s.f). El estudio analizó imágenes entre los años 1990 y 2020 en intervalos de 5 años, asociadas al mes de abril, con el fin de caracterizar la estación seca, ya que es la más calurosa de la región.

Crecimiento histórico de la población del ámbito urbano conurbado

Los datos se recabaron del crecimiento poblacional y su relación con la superficie urbanizada. Éstos fueron colectados de registros locales como El Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Campeche 2020-2040 (SEDATU, 2020), así como del Programa Director de Desarrollo Urbano de Campeche 2008-2033 (PDU) y el Programa Municipal de Ordenamiento Ecológico Territorial (PMOET).

Temperatura de la superficie terrestre

Para obtener este dato se utilizaron imágenes de la banda 6 para Landsat-5TM y Landsat-7TM, y banda 10 para Landsat-8OLI y Landsat-9OLI. El cálculo consta de 4 pasos (X. Li et al., 2016) :

1. *Radiancia espectral* ($L_{\lambda}, W/(m^2sr * \mu m)$) para imágenes TM es obtenido con la Ec.1, donde es el valor digital del píxel en un intervalo 0-255, y los valores máximos y mínimos de los píxeles en la banda térmica, y las radiancias espectrales máximas y mínimas escaladas. Para las imágenes OLI, se calculó de la Ec.2 (considerando la obtención de la radiación en la parte superior de la atmósfera o radiancia TOA), donde fue la corrección para la banda 10, y ML y AL representaron factores multiplicativo y aditivo para el reescalamiento de la radiancia a una determinada banda.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda}}{Q_{cal,max} - Q_{cal,min}} \right) * (Q_{cal} - Q_{cal,min}) + L_{min,\lambda} \quad (1)$$

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal} + AL - O_i \quad (2)$$

2. *Temperatura de intensidad luminosa o Bright Temperature (BT)* Ec.3, donde $K1$ y $K2$ son constantes de conversión térmica, asociadas al tipo de imagen satelital (TM u OLI).

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 273.15^{\circ}C \quad (3)$$

3. *Superficie de emisividad del suelo o Land Surface Emissivity (LSE)* Ec. 4, indica la emisividad promedio de un elemento sobre la superficie del suelo a partir del NDVI, donde y y x son el máximo y mínimo del NDVI.

$$LSE = 0.004 * \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 + 0.986 \quad (4)$$

4. *Estimación del LST*, dado por la Ec.5, donde es la longitud de onda de la radiancia emitida (μm), $h=$; s la constante de Boltzman y c la velocidad de la luz.

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\lambda * \frac{BT}{h * c/s} \right) * \ln(LSE) \right)} \quad (5)$$

Serie temporal de temperatura superficial

Para este análisis se recurrió al registro de temperaturas desde el año 1940 hasta el 2023, obtenido de dos fuentes:

- De 1940- 2022 del modelo ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu>), correspondiente a registros de la temperatura del aire a 2m sobre la superficie terrestre para identificar incrementos en la ciudad con el paso del tiempo. Este valor se calcula en intervalos de una hora interpolando entre el nivel más bajo del modelo y la superficie de la Tierra.

- De 2022-2023, de una estación meteorológica inalámbrica multifuncional ubicada dentro de la ciudad en las coordenadas 19.85°N – 90.50°O. La serie de datos de temperatura se colectó desde octubre de 2022 al mes de abril de 2023 con un registro cada 10 minutos.

Índice de vegetación de diferencia normalizada

Este indicador que verifica la condición de vegetación a partir de bandas de infrarrojo cercano (en inglés *Near Infra-Red*, NIR) y roja (R) de las imágenes Landsat. Su estimación se realizó a través de la siguiente fórmula Ec. 6 (H. Li et al., 2018) :

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \quad (6)$$

Para las imágenes del Landsat-5TM y Landsat-7TM se emplearon las bandas espectrales 4 y 3 para los valores de NIR y R; para Landsat-8OLI y Landsat-9OLI corresponden las bandas 5 y 6. Los valores del NDVI oscilan entre ± 1.0 . La vegetación verde se encuentra entre los valores de 0.2-0.8 (Wang et al., 2020).

V. RESULTADOS

Análisis de crecimiento histórico de la población

La Figura 2 presentan el histórico del crecimiento demográfico, viviendas construidas y repercusión en la fragmentación urbana para la ciudad de 1950-2019 (último censo). La Figura 2 contrasta el crecimiento poblacional de la ciudad respecto a las viviendas edificadas. A lo largo del periodo identificado que abarca 70 años, la población ha crecido un 87% en el Estado siendo 1970 y 2019 los de mayor aumento. La tercera parte del incremento se ha dado en los últimos 10 años. Por otra parte, el crecimiento del número de viviendas ha sido mayor, aumentando un 91% desde el año 1980 a la fecha. Particularmente, desde el año 2000 la expansión de inmuebles ha crecido un 38% asociándolo con el crecimiento demográfico. Estos resultados se vinculan con el aumento de la mancha urbana (Figura 2), producto de la expansión urbana al sur y este de la ciudad. En la década de los ochenta y noventa el crecimiento habitacional se concentró en las zonas del sur y sureste. Los cambios de uso del suelo están asociados directamente con el incremento de la temperatura del suelo.

Temperatura de la superficie terrestre (LST)

La Figura 3 compila los mapas de LST de 1990 a 2020 en intervalos de cinco años, catalogando la temperatura en la superficie en 5 rangos de colores: azul (< 20°C), celeste (20-25°C), verde (25-30°C), amarillo (30-35°C), naranja (35-40°C) y rojo (>40°C). Durante la década de los noventa, la ciudad no superaba los 25°C a nivel de suelo en la época más calurosa del año, siendo los barrios más antiguos y céntricos aquellos con

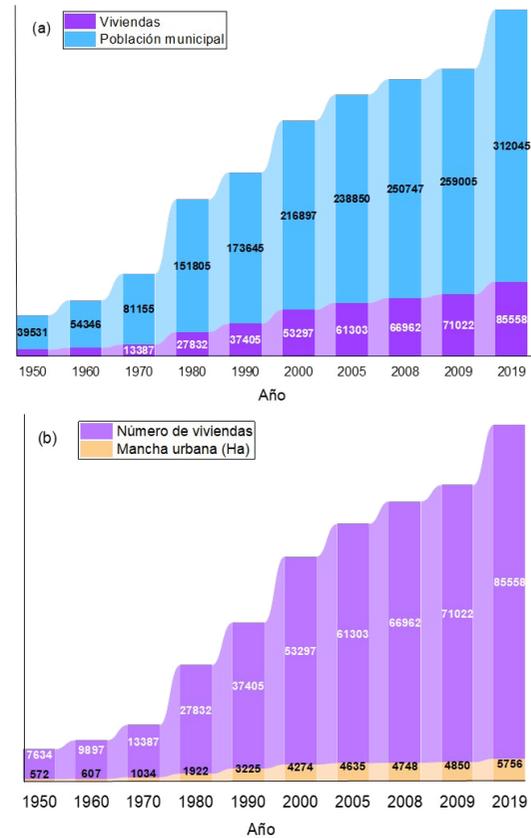


Figura 2. a) Comportamiento de la vivienda y mancha urbana en Campeche (arriba), b) Comportamiento de la vivienda respecto a la población de Campeche (abajo). Fuente: Elaboración por los autores.

temperaturas más elevadas, producto de la mancha urbana reducida. En décadas posteriores (2000-2020) la LST superaba los 30°C debido a la expansión urbana hacia los ámbitos aledaños a la ciudad. Esto concuerda con el surgimiento de colonias habitacionales en el oriente y poniente, ocasionaron una expansión del 37% sobre suelo forestal.

En las zonas del centro histórico y oriente se observó el incremento de la temperatura, ocasionado por la deforestación, incluso superando los 35°C. Además, es interesante la tendencia a generar zonas que alcanzan o superan los 40°C. Lo anterior indica que, en 30 años, una ciudad costera y de poca población como el caso de estudio, ha incrementado aproximadamente 10°C la temperatura a nivel de suelo.

Para visualizar el comportamiento de la temperatura a nivel del suelo, se extrajo información de 24 puntos identificados con mayor cambio a lo largo de la ciudad, para cada una de las imágenes analizadas (Figura 4). El gráfico presenta los cambios

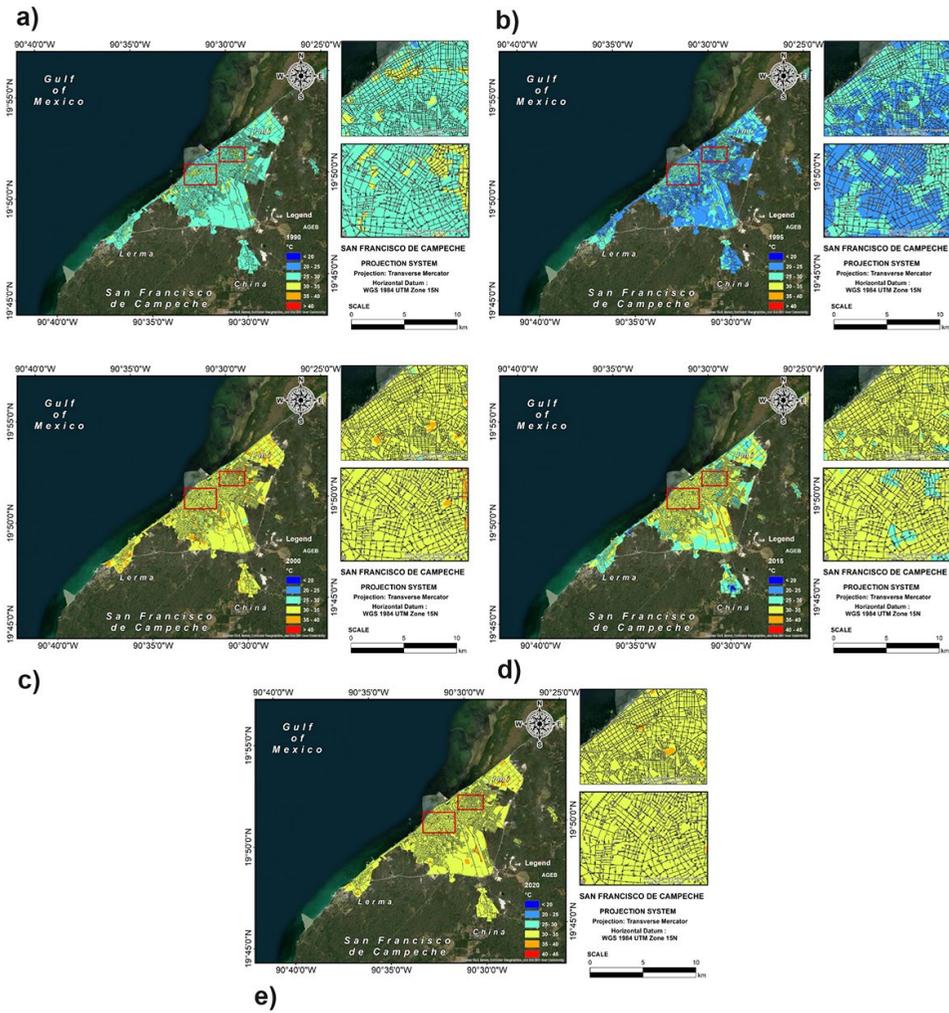


Figura 3. Mapas de temperatura de suelo para el caso de estudio: a)1990; b)1995; c)2000; d)2015; e)2020. Fuente: Elaboración por los autores.

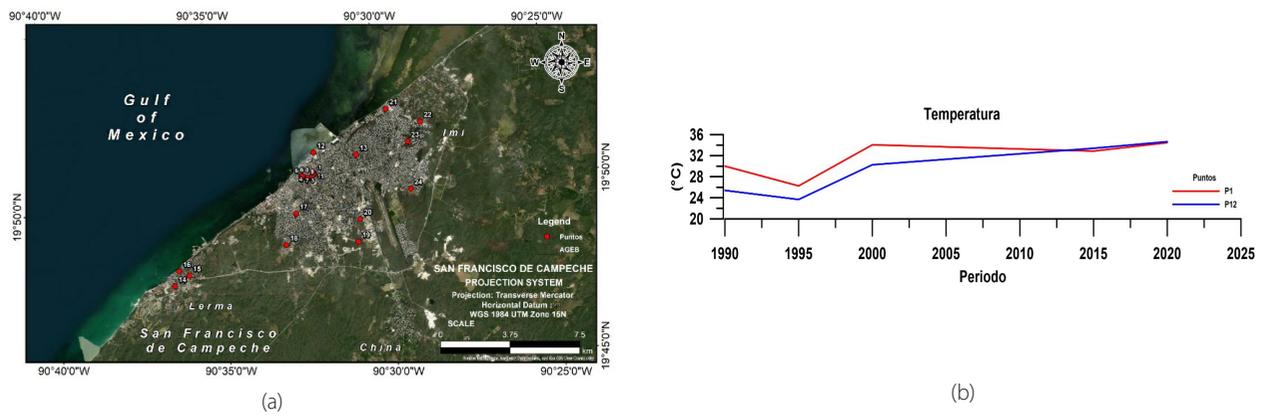


Figura 4. Puntos de extracción de información y Serie para los puntos 1 y 12. Fuente: Elaboración por los autores. Fuente: Elaboración por los autores.

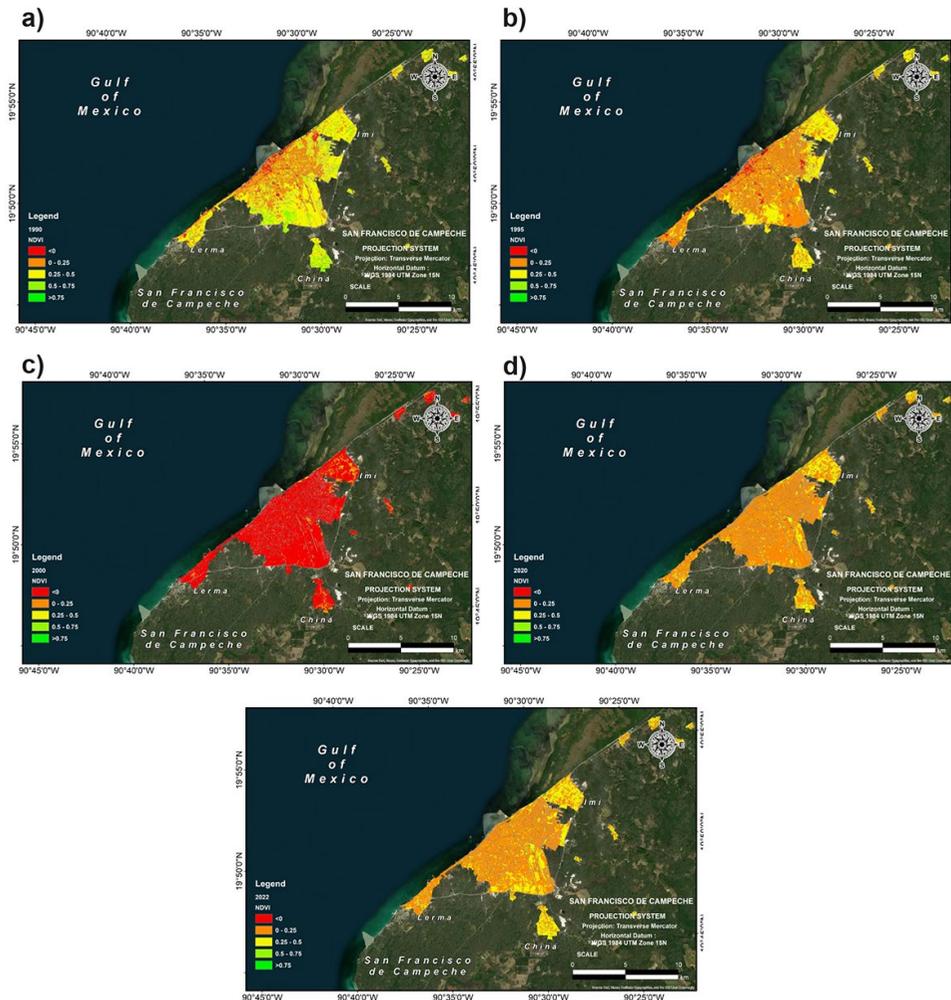


Figura 5. Mapas de NDVI para el caso de estudio; a)1990; b) 1995; c)2000; d)2020; e)2022. Fuente: Elaboración de los autores.

en la temperatura para los puntos 1 y 12, apreciándose un incremento promedio de 6°C en el período de los años 1990-2020.

Análisis de vegetación

Los valores NDVI se agruparon en 5 clases vegetación: muy escasa (< 0), escasa ($0-0.25$), reducida ($0.25-0.50$), aceptable ($0.50-0.75$) y abundante (> 0.75); como se aprecia en la Figura 5. La figura 4 muestra que, en el año 1990 la mancha urbana era reducida y concentrada en el centro de la ciudad, con dominio de vegetación escasa. Sin embargo, una porción significativa de lo que en ese momento representaba la periferia de la ciudad (actualmente zonas sur y este), conservaba niveles aceptables de vegetación. Cinco años después, se visualiza una reducción de la vegetación en el este de la ciudad, coincidiendo con

el incremento demográfico y el número de edificaciones. En el año 2020, la reducción de vegetación se extendió al sur y sureste de la ciudad, donde más del 90% del núcleo urbano, se encuentra en la categoría de vegetación escasa, contribuyendo al incremento de temperatura.

La Tabla 1 recopila la evolución del NDVI en los últimos 20 años. La categoría menos frecuente y que más se ha reducido es “vegetación muy escasa” que ha pasado de 16.38ha a 0.38ha. Por su parte, la categoría “escasa” ha sido la más representativa y la única que ha crecido, mientras que las extensiones en la categoría de vegetación “abundante” son casi imperceptibles. Durante estas dos décadas ha existido una tendencia a reducir la vegetación urbana, poniendo en riesgo a la población respecto a las olas calor del clima tropical, sin zonas verdes, ni vegetación urbana que las amortigüen.

Clases	Área en Hectáreas					
	1990	1995	2000	2015	2020	2022
<0	116.45	16.52	579.16	0.32	0.14	0.38
0-0.25	181.75	386.60	54.27	410.3	515.75	433.59
0.25-0.5	371.60	230.85	1.76	224.4	119.29	200.94
0.5-0.75	65.36	1.22	0	0.17	0.01	0.27
>0.75	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Detalles del índice de vegetación de diferencia normalizada de 1990 a 2022. Fuente: Elaboración de los autores.

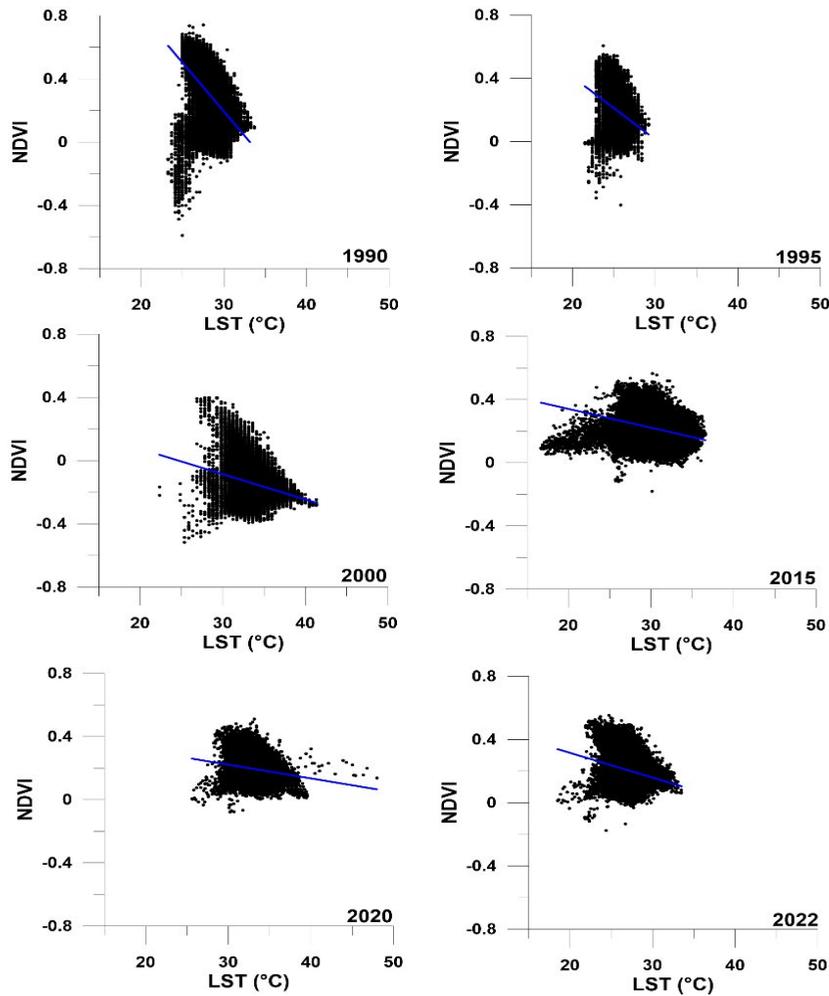


Figura 6. Relación entre NDVI y LST para el caso de estudio en los años: a) 1990; b) 1995; c) 2000; d) 2015; e) 2020; f) 2022. Fuente: Elaboración por los autores.

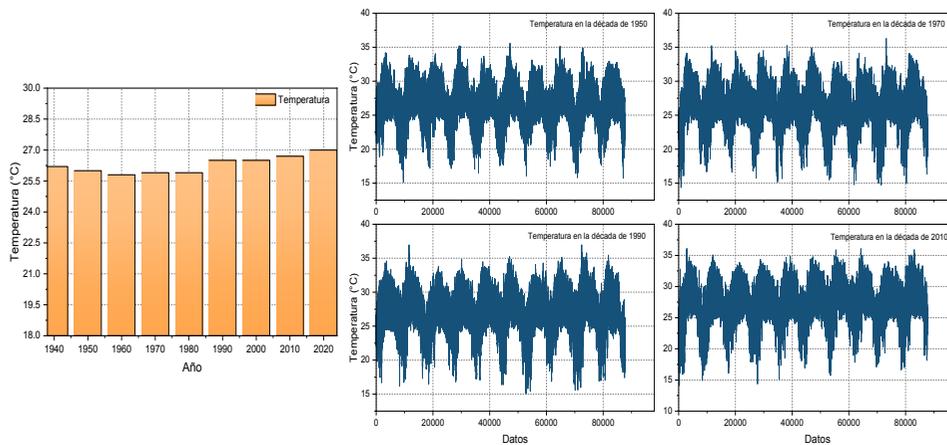


Figura 7. Comportamiento de la temperatura en SFC en las diferentes décadas de estudio. Fuente: Elaboración de los autores.

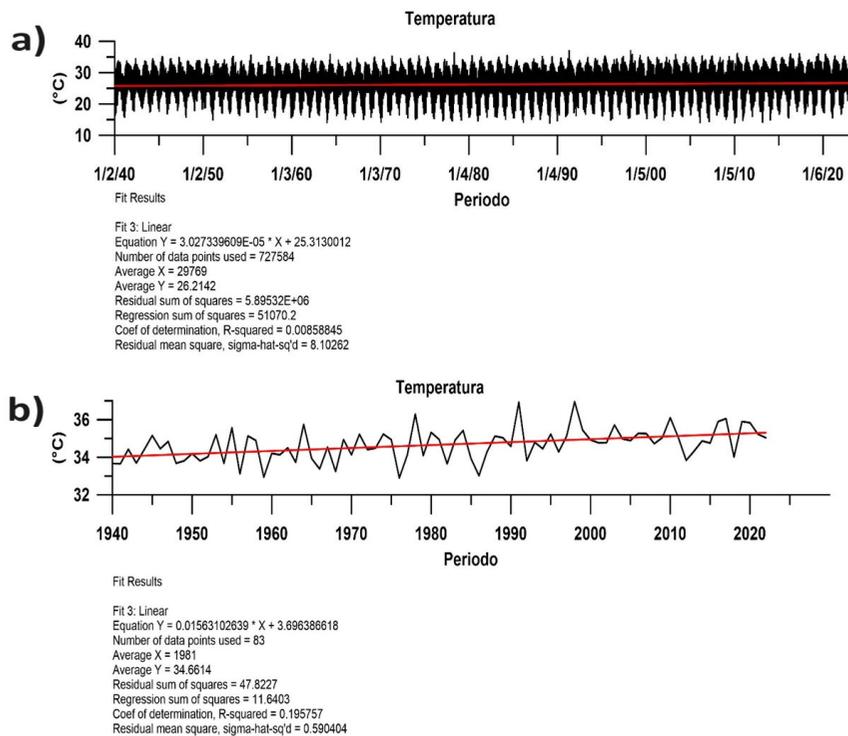


Figura 8. Serie de datos horarios de temperatura en el periodo: enero 1940 - diciembre 2022. b) Serie de valores máximos anuales de temperatura entre 1940 a 2022. Fuente: Elaboración de los autores.

Cuando la vegetación afecta la distribución de la LST, un enfoque razonable para determinar los cambios espaciotemporales consiste en identificar las relaciones entre el LST y el NDVI. La Figura 6 ilustra la relación negativa entre los valores de NDVI y LST. Entre los años 1990 y 1995 los valores del LST no sobrepasaron los 35°C, mientras que el NDVI se distribuía en

promedio entre 0.8 y -0.1. Esto da como resultados pendientes de regresión negativas y muy inclinadas, lo que sugiere que la vegetación amortiguaba el efecto térmico. Es a partir del año 2000 que las correlaciones tienden a ser más horizontales, propiciado por un incremento en los valores de la temperatura, que alcanzan los 40°C y una disminución en la vegetación

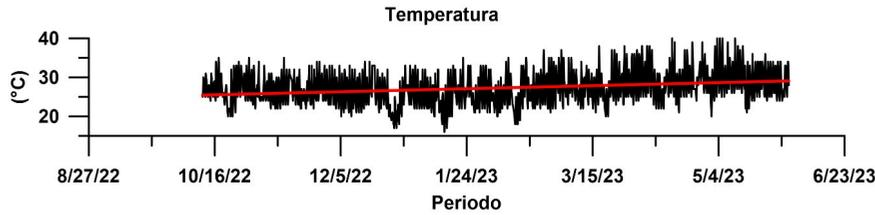


Figura 9. Registro de datos de la estación climatológica; el formato de la fecha es mes/día/año Fuente: Elaboración por los autores.

perceptible que adquiere máximos promedios de NDVI entre 0.4 y mínimos de hasta -0.4. A partir de los años 2015 y 2020 los valores de NDVI se agrupan en los intervalos de 0 y 0.4, presentando algunos valores mínimos que alcanzan -0.2 o 0.5, mientras que la temperatura se mantiene cerca de los 40°C e incluso en el año 2020 se acerca a los 50°C. Para el año 2022, se mantiene la tendencia de los valores del NDVI y se aprecia una reducción en los valores de la temperatura (superficial) alcanzando valores cercanos a los 35°C. Esta reducción del NDVI es indicativo de la deforestación por expansión de la mancha urbana; y los incrementos en la temperatura, de la presencia de UHI en la ciudad.

Serie temporal de temperatura superficial

Los datos de temperatura se adquirieron en una locación de la zona costera ubicada a 15km de distancia de la ciudad derivado de la resolución del mallado del modelo ERAS correspondiente a 0.25°C, en intervalos de 28km. La Figura 7 muestra el comportamiento de la temperatura desde la perspectiva anual y el análisis en cuatro décadas específicas (1950, 1970, 1990 y 2010). Se observa el incremento gradual de la temperatura desde 1970, el aumento de temperaturas máximas en décadas recientes y decremento de las temperaturas mínimas, producto del calentamiento térmico en la región.

En la Figura 8, arriba, se presenta la serie de temperatura con valor promedio de 26.21°C, mínima de 14.01°C y valor máximo de 36.95 °C, el que fue alcanzado durante el 2020. De acuerdo con el gráfico de abajo, en 1940 el valor máximo registrado fue 33.66°C, mientras que en 2020 de 35.83°C. Así mismo la línea de tendencia de la serie, indica que la temperatura ha aumentado 1.30°C, y ha alcanzado máximas de 34.66°C.

La Figura 9 presenta los datos para octubre de 2022 a 31 de mayo del 2023 registrando una temperatura mínima de 16°C, máxima de 40°C y un valor promedio de 27.3°C. Se observa una tendencia a incremento que inicia en el mes de abril y se extiende hasta mediados del mes de mayo, se observa que los valores alcanzan los 40°C.

VI. DISCUSIONES

Los resultados para el caso de estudio exhiben una interrelación entre la falta de diseño y planificación urbana que en conjunto con las UHI derivan en una gran retención térmica de la radiación solar impactando edificios, pavimentos, materiales y superficies, situación muy similar a lo reportado por (Tian et al., (2021). Lo anterior coincide también con lo reportado por Han et al. (2022), que encuentran que las ciudades costeras son las que presentan más cambios debido a que son urbes emergentes que experimentan crecimiento sin políticas ni planificación, ocasionando expansiones rápidamente en proporción, densidad y regularidad. Esto es contrario a las ciudades con desarrollo planificado, en las que se construyen más áreas naturales como superficies verdes y parques urbanos, para mejorar el ambiente y disminuir estrés térmico; esto permite apoyar la hipótesis, que el análisis del crecimiento poblacional contribuye a identificar las UHI.

En el caso de estudio, el efecto de las UHI se incrementa debido a la humedad relativa propia de las ciudades costeras puede variar del 60% al 100% a lo largo del día. Para el caso de Singapore, Chew et al. (2021) relacionan la humedad relativa con los incrementos de temperatura durante el día y la noche, encontrando una variación diaria de hasta 3°C, empleando datos medidos en campo con estaciones”

El uso de imágenes aplicado para identificar las UHI se encuentra generalizado, por ejemplo, en la ciudad de Tesalónica, (Grecia) fueron usadas para identificar las islas de calor urbano, además se emplearon datos de temperatura medidos en estaciones (Giannaros y Melas, 2012). Sin embargo, en el análisis se incorporó la velocidad del viento y el confort térmico, encontrando variaciones de hasta 4°C.

Por otra parte, la aplicación de imágenes Landsat en el estudio realizado en Estambul por Dihkan et al. (2015) resalta ya que se analizan el periodo 1984 – 2011 para

encontrar el LST, identificando los usos/cobertura de suelo (LULC) y sus cambios temporales y espaciales, encontrando una relación entre LST y LULC, que originan las SUHI con temperaturas cercanas a los 50°C. En la ciudad de Muscate (Omán) los autores Charabi y Bakhit (2011) emplean observaciones meteorológicas para inferir los cambios espacio – temporales, analizados durante un año. Los estudios anteriores permiten apoyar la hipótesis del éxito del uso de imágenes de satélite para cuantificar cambios históricos de temperatura superficial y cambios de cobertura vegetal.

El fenómeno de UHI tiene efectos adversos en el ecosistema social-urbano como el aumento en el consumo de energía eléctrica en edificios, reducción del confort térmico, disminución en la calidad del aire, afectación de la salud de los residentes y mayor mortalidad. Un estudio reciente en la ciudad metropolitana de Bangkok (Tailandia) sobre factores físicos que impulsan la isla de calor urbana, encontró que la temperatura promedio anual de una ciudad con más de un millón de habitantes es entre 1K y 3K más alta que, la de las áreas rurales circundantes (Khamchiangta y Dhakal, 2019).

Cuando la intensificación de la UHI ocurre, se registra un aumento en la mortalidad de niños y adultos mayores, así como en enfermedades respiratorias y cardiovasculares, e incluso cáncer (Hidalgo García y Arco Díaz, 2021; Hidalgo-García y Arco-Díaz, 2023; Yao et al., 2022). Los cambios en los patrones de uso del suelo, combinados con el crecimiento demográfico y el calor generado por la actividad humana, alteran drásticamente el clima, como ha sido evidenciado por Ullah et al. (2019). Esta situación es análoga a la observada en SFC, donde las transformaciones en el uso del suelo, junto con el crecimiento poblacional y urbano, han generado un cambio en la temperatura de la ciudad.

Los estudios examinados acerca de las UHI coinciden en que el proceso de urbanización provoca cambios en las características físicas del paisaje natural y el uso del suelo urbano, provocando desaparición de grandes extensiones de vegetación y modificando el clima local (W. Zhao et al., 2018). En el caso de estudio de San Francisco de Campeche, el NDVI permitió visualizar las áreas más cambiantes, encontrándose una relación entre el LST y la cobertura de vegetación, similar a lo realizado por Hidalgo García y Arco Díaz (2021) y Hu et al. (2020) que asociaron el NDVI al LST, encontrando una correlación negativa; es decir, se presenta una reducción en los valores del NDVI, con un aumento en los valores del LST. Así se confirma la hipótesis que sostiene que los cambios en la cobertura vegetal facilitarían la identificación de las UHI

En SFC, se observa que la reducción en los valores del NDVI se debe a la construcción de unidades habitacionales. Esto se puede comparar con lo documentado por Ciacci et al.

(2022) de que en las ciudades los cambios generados por el sector de la construcción representan el 27% de las emisiones de los gases de efecto invernadero globales. Por ello, se han propuesto diversas estrategias de mitigación que se han aplicado en las ciudades, con la finalidad de reducir el riesgo de las UHI destacando: espacios verdes urbanos, techos verdes, reverdecimiento vertical o muros verdes, cuerpos de agua, materiales fríos y cambios en la geometría urbana (Ciacci et al., 2022) La planificación y el diseño en la modificación de las características del entorno circundante podrían reducir las UHI ya que, al reemplazar árboles y vegetación por superficies materiales menos permeables, se minimizan los efectos naturales de enfriamiento de sombra y evaporación del agua del suelo y la evapotranspiración de las hojas por lo que, el proceso inverso los maximizaría.

Para las estrategias de maximizar los efectos naturales de enfriamiento de sombra se han desarrollado estudios centrados en las medidas de mitigación de UHI y el efecto en el consumo de energía de edificios y el confort térmico exterior (Tian et al., 2021). Se ha propuesto el desarrollo de infraestructura urbana sostenible, manejo sostenible de la lluvia y reducción del calor antrópico; así como la implementación de medidas de mitigación en la construcción, como la protección de la radiación solar, minimización de la infiltración de calor, mantenimiento del confort térmico y la planeación de áreas urbanas junto a las medidas de desarrollo urbano como reforestación, infraestructura verde y reducción de calor antrópico (Leal Filho et al., 2017). Además, se puede incidir en políticas públicas, certificaciones y regulaciones que permitan, al igual que la metodología aplicada en Europa de rentabilidad óptima (Parlamento Europeo, 2010), delinear las medidas más rentables para reconstruir los edificios, centrado en aspectos económicos o intervenciones para lograr un NZEB (Nearly zero – energy buildings) estándar, o certificaciones energéticas y medioambientales en el ámbito urbano, Un ejemplo de ellos es la normativa Italiana, que regula el desarrollo del entorno urbano para cumplir con los Protocolos de Kioto, destacando el papel de los árboles (Ciacci et al., 2022), sin embargo, carece de estrategias, metodologías, regulaciones y políticas públicas que reduzcan los efectos de las UHI.

Durante las últimas tres décadas, San Francisco de Campeche ha experimentado un aumento en su temperatura, lo que ha resultado en un incremento del 40% en el consumo eléctrico, según lo informado por SENER (2023), coincidiendo con lo señalado por Tian et al. (2021), quienes indican que, en países con climas cálido, cada aumento de 1°C conlleva un incremento del 1.66% en el consumo de electricidad. La ejecución de alguna de las estrategias anteriormente mencionadas en el caso de estudio, podrían tener un impacto sustancial en el entorno



Figura 10. Propuestas de intervención. a) antes, b) reforestación, c) antes, d) colocación de muro verde. Fuente: Elaboración por los autores.

térmico-urbano, si se utilizan principalmente en la etapa de diseño del proyecto.

Aunque en esta investigación no se aplica ninguna estrategia para la reducción de las UHI, sí se proponen algunas que han sido ejecutadas en otras regiones y que por las características de SFC podrían ser efectivas y replicables, un ejemplo de ello es que la ecologización urbana puede purificar el aire, regular la temperatura y mejorar el ecosistema urbano. Por otro lado, el espacio verde urbano disminuye la temperatura del aire, mitiga la contaminación y reduce la energía usada para refrigeración. El uso de techos verdes, pueden influir en el entorno urbano, dado que representan entre el 20% y 25% de la superficie de una ciudad (Besir y Cuze, 2018) ya que, pueden reducir las temperaturas interiores en el último piso hasta 3.4°C (Tam et al., 2016).

En Hong Kong, un estudio sobre estrategias de mitigación de la UHI, demostró que con 60% de cobertura verde, se puede reducir la temperatura del aire entre 0.65°C-1.45°C y el ahorro de energía anual se estimó en 3.4x10⁷kWh y 7.6x10⁷kWh, respectivamente (Peng y Jim, 2015). Del mismo modo, los muros verdes son de menor tamaño, alto valor estético y con capacidad de mitigar las UHI, reduciendo la temperatura de la pared para ahorrar energía, aislamiento térmico proporcionado por la vegetación, enfriamiento por evapotranspiración y pantalla contra el viento. Pan y Chu (2016) demostraron que, un muro verde puede ahorrar el 16% del consumo de energía de un edificio.

La Figura 10 muestra un antes y después de la propuesta de reforestación de un sector urbano y de la propuesta de la colocación de un muro verde en una vivienda. El sector pertenece a la calle 59, ubicada en el centro histórico, que conecta la Puerta de Mar con la Puerta de Tierra de la ciudad amurallada; convirtiéndose en el punto de encuentro más popular y concurrido de la ciudad, siendo denominada como “corazón del Centro Histórico de Campeche”. La vivienda de la Figura representa las construcciones modernas en la ciudad de San Francisco de Campeche.

Finalmente, el clima urbano puede ser mejorado mediante la planificación urbana para satisfacer las necesidades de los residentes (Zhao et al., 2011) que junto con el diseño urbano tienen un significado ambiental realista para mitigar el efecto de UHI en ciertas áreas urbanas, optimizando la morfología urbana (Q. Hu et al., 2016). El tamaño, la forma geométrica y la cobertura vegetal son los factores de morfología urbana que impactan al estrés térmico de la ciudad (Liang et al., 2021). Dado esto, se define que SFC requiere una planificación urbana que le permita desarrollarse y disminuir las UHI. Los resultados de este estudio propician un parteaguas que permita profundizar en el estudio de las UHI, desde su origen hasta las estrategias de reducción, siendo de utilidad para los planificadores urbanos (ingenieros, arquitectos, entre otros), funcionarios de la salud pública y actores gubernamentales.

VII. CONCLUSIONES

El análisis de las UHI se ha consolidado como un componente indispensable en la comprensión del clima urbano actual. Esta investigación revela la importancia del complementar los estudios tradicionales del clima y del tiempo, tales como el calendario agrícola, periodos de lluvia, entre otros, con análisis históricos de temperatura e imágenes de satélite ya que proporcionan una perspectiva crucial para abordar los diferentes desafíos que derivan del crecimiento urbano no planificado. La integración de datos sobre UHI con observaciones sobre planificación y diseño urbano se presenta como un enfoque integral para mitigar los efectos adversos del desarrollo urbano desorganizado.

Las UHI identificadas en la ciudad de SFC, se centran en áreas con alta densidad de infraestructura urbana, donde la presencia de edificios es predominante y la vegetación es escasa. Esta concentración urbana ha sido asociada con un aumento significativo en la temperatura superficial, con un incremento de 6°C registrados desde el año 1990 hasta el año 2022. Paralelamente, se ha observado la disminución marcada en la cobertura vegetal, cuadruplicando los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la clase 0 – 0.25 durante el mismo período. Estos hallazgos, reflejan una tendencia creciente en la temperatura, especialmente evidenciada por la serie de valores máximos anuales del periodo.

Las UHI en SFC se deben a la degradación ambiental que actualmente, perturba la comodidad de la población, principalmente en el mes de abril. Este aumento en la temperatura origina un incremento del consumo eléctrico para mantener el confort térmico, además de generar efectos adversos en la salud pública.

Se sugiere la inclusión de variables adicionales que puedan influir en la formación y la intensidad de las UHI. La humedad relativa y la velocidad del viento son factores importantes que pueden modular los efectos de las UHI y deben ser considerados en futuros estudios. Además, un análisis detallado del confort térmico proporciona una comprensión más completa de cómo las condiciones climáticas afectan la percepción subjetiva de la temperatura y el bienestar humano. Identificar los períodos de mayor incomodidad y comparar estos parámetros durante el día y la noche genera una evaluación más precisa de los riesgos asociados con las UHI, además de orientar las estrategias de adaptación y mitigación.

En última instancia, para abordar eficazmente los desafíos originados por las UHI y mejorar la calidad del hábitat urbano, es necesario implementar diversas estrategias políticas que inferan en la modificación de políticas públicas, basado en resultados de planificación urbana, que considere acciones a corto plazo como la revegetación con vegetación local y la conformación de espacios verdes, además de la incorporación

de intervenciones innovadoras como el desarrollo de infraestructuras y muros verdes. Al promover la vegetación urbana y mejorar la cobertura vegetal, no sólo se puede reducir la temperatura del aire y mitigar los efectos de las UHI, sino que también se pueden generar entornos provechosos y sostenibles para los habitantes urbanos. Estas intervenciones contribuyen a la reducción del consumo de energía, la mejora de la biodiversidad urbana y la creación de espacios públicos recreativos y funcionales.

De esta manera, el análisis de las UHI, emerge como un área de investigación crucial para abordar los diferentes desafíos del crecimiento urbano desorganizado. Al integrar datos sobre UHI Urbano con consideraciones de planificación y diseño urbano, se demuestra que existe el avance hacia ciudades sostenibles, resilientes y habitables capaces de mitigar los impactos adversos del desarrollo urbano sin control para las generaciones presentes y futuras.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Besir, A. B., y Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Charabi, Y., y Bakht, A. (2011). Assessment of the canopy urban heat island of a coastal arid tropical city: The case of Muscat, Oman. *Atmospheric Research*, 101(1), 215–227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.02.010>
- Chew, L. W., Liu, X., Li, X.-X., y Norford, L. K. (2021). Interaction between heat wave and urban heat island: A case study in a tropical coastal city, Singapore. *Atmospheric Research*, 247, 105134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105134>
- Ciaci, C., Banti, N., Di Naso, V., Montechiaro, R., y Bazzocchi, F. (2022). Experimentation of Mitigation Strategies to Contrast the Urban Heat Island Effect: A Case Study of an Industrial District in Italy to Implement Environmental Codes. *Atmosphere*, 13(11), 1808. <https://doi.org/10.3390/atmos13111808>
- Degirmenci, K., Desouza, K. C., Fieuw, W., Watson, R. T., y Yigitcanlar, T. (2021). Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102873. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102873>
- Dihkan, M., Karsli, F., Guneroglu, A., y Guneroglu, N. (2015). Evaluation of surface urban heat island (SUHI) effect on coastal zone: The case of Istanbul Megacity. *Ocean y Coastal Management*, 118, 309–316. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.008>
- Firozjaei, M. K., Sedighi, A., Mijani, N., Kazemi, Y., y Amiraslani, F. (2023). Seasonal and daily effects of the sea on the surface urban heat island intensity: A case study of cities in the Caspian Sea Plain. *Urban Climate*, 51, 101603. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101603>
- Giannaros, T. M., y Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, 118, 103–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.006>
- Han, W., Tao, Z., Li, Z., Cheng, M., Fan, H., Cribb, M., y Wang, Q. (2022). Effect of Urban Built-Up Area Expansion on the Urban Heat Islands in Different Seasons in 34 Metropolitan Regions across China. *Remote Sensing*, 15(1), 248. <https://doi.org/10.3390/rs15010248>

- Hidalgo-García, D., y Arco Díaz, J. (2021). Modeling of the Urban Heat Island on local climatic zones of a city using Sentinel 3 images: Urban determining factors. *Urban Climate*, 37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100840>
- Hidalgo-García, D., y Arco-Díaz, J. (2023). Spatiotemporal analysis of the surface urban heat island (SUHI), air pollution and disease pattern: an applied study on the city of Granada (Spain). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(20), 57617–57637. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26564-7>
- Hu, Q., Zhang, R., y Zhou, Y. (2016). Transfer learning for short-term wind speed prediction with deep neural networks. *Renewable Energy*, 85, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.034>
- Hu, Y., Dai, Z., y Guldman, J. M. (2020). Modeling the impact of 2D/3D urban indicators on the urban heat island over different seasons: A boosted regression tree approach. *Journal of Environmental Management*, 266, 110424. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110424>
- INEGI. (2020). Panorama sociodemográfico de México 2020: Campeche.
- INEGI. (2022). Aspectos Geográficos: Campeche 2021.
- Kassomenos, P., Kissas, G., Petrou, I., Begou, P., Khan, H. S., y Santamouris, M. (2022). The influence of daily weather types on the development and intensity of the urban heat island in two Mediterranean coastal metropolises. *Science of The Total Environment*, 819, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153071>
- Khamchiangta, D., y Dhakal, S. (2019). Physical and non-physical factors driving urban heat island: Case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109285>
- Khare, V. R., Vajpai, A., y Gupta, D. (2021). A big picture of urban heat island mitigation strategies and recommendation for India. *Urban Climate*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100845>
- Kim, S. W., y Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Leal Filho, W., Echevarria Icaza, L., Emanche, V., y Quasem Al-Amin, A. (2017). An Evidence-Based Review of Impacts, Strategies and Tools to Mitigate Urban Heat Islands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1600. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121600>
- Li, H., Meier, F., Lee, X., Chakraborty, T., Liu, J., Schaap, M., y Sodoudi, S. (2018). Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin. *Science of The Total Environment*, 636, 818–828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.254>
- Li, X., Li, W., Middel, A., Harlan, S. L., Brazel, A. J., y Turner, B. L. (2016). Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition and configuration and cadastral–demographic–economic factors. *Remote Sensing of Environment*, 174, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.022>
- Liang, Z., Huang, J., Wang, Y., Wei, F., Wu, S., Jiang, H., Zhang, X., y Li, S. (2021). The mediating effect of air pollution in the impacts of urban form on nighttime urban heat island intensity. *Sustainable Cities and Society*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102985>
- Luo, Y., y He, J. (2021). Evaluating the heat island effect in a planned residential area using planning indicators. *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102473>
- Ma, Y., Lauwaet, D., Kouti, A., y Verbeke, S. (2023). A toolchain to evaluate the impact of urban heat island and climate change on summer overheating at district level. *Urban Climate*, 51, 2. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101602>
- Ortiz Porangaba, G. F., Teixeira, D. C. F., Amorim, M. C. de C. T., Silva, M. H. S. y Dubreuil, V. (2021). Modeling the urban heat island at a winter event in Três Lagoas, Brazil. *Urban Climate*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100853>
- Pan, L., y Chu, L. M. (2016). Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study. *Building and Environment*, 96, 293–300. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.033>
- Parlamento Europeo. (2010). European Parliament and Council of the European Union - Directive 2010/31/EU. Unión Europea.
- Peng, L. L. H., y Jim, C. Y. (2015). Economic evaluation of green-roof environmental benefits in the context of climate change: The case of Hong Kong. *Urban Forestry y Urban Greening*, 14(3), 554–561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.05.006>
- Qiu, J., Li, X., y Qian, W. (2023). Optimizing the spatial pattern of the cold island to mitigate the urban heat island effect. *Ecological Indicators*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110550>
- SEDATU. (2020). Programa municipal para el desarrollo urbano: Campeche 2020-2040. Secretaría de Desarrollo Agrario, Rural y Urbano.
- SENER. (2023). Sistema de Información Energética. Secretaría de Energía. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadrosubAction=applyOptions>
- Singh, N., Singh, S., y Mall, R. K. (2020). Urban ecology and human health: implications of urban heat island, air pollution and climate change nexus. In *Urban Ecology* (pp. 317–334). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820730-7.00017-3>
- Tam, V. W. Y., Wang, J., y Le, K. N. (2016). Thermal insulation and cost effectiveness of green-roof systems: An empirical study in Hong Kong. *Building and Environment*, 110, 46–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.032>
- Tan, J. K. N., Belcher, R. N., Tan, H. T. W., Menz, S., y Schroepfer, T. (2021). The urban heat island mitigation potential of vegetation depends on local surface type and shade. *Urban Forestry y Urban Greening*, 62, 127128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127128>
- Tian, L., Li, Y., Lu, J., y Wang, J. (2021). Review on Urban Heat Island in China: Methods, Its Impact on Buildings Energy Demand and Mitigation Strategies. *Sustainability*, 13(2), 762. <https://doi.org/10.3390/su13020762>
- Ullah, S., You, Q., Ullah, W., Hagan, D. F. T., Ali, A., Ali, G., Zhang, Y., Jan, M. A., Bhatti, A. S., y Xie, W. (2019). Daytime and nighttime heat wave characteristics based on multiple indices over the China–Pakistan economic corridor. *Climate Dynamics*, 53(9), 6329–6349. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04934-7>
- United States Geological Survey. (s.f). <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vasenev, V., Varentsov, M., Konstantinov, P., Romzaykina, O., Kanareykina, I., Dvornikov, Y., y Manukyan, V. (2021). Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis. *Science of The Total Environment*, 786. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147457>
- Wang, R., Hou, H., Murayama, Y., y Dourdori, A. (2020). Spatiotemporal Analysis of Land Use/Cover Patterns and Their Relationship with Land Surface Temperature in Nanjing, China. *Remote Sensing*, 12(3), 440. <https://doi.org/10.3390/rs12030440>
- Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., y Awed, A. (2021a). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>

Xu, L., Wang, J., Xiao, F., El-Badawy, S., y Awed, A. (2021b). Potential strategies to mitigate the heat island impacts of highway pavement on megacities with considerations of energy uses. *Applied Energy*, 281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116077>

Xu, X., Pei, H., Wang, C., Xu, Q., Xie, H., Jin, Y., Feng, Y., Tong, X., y Xiao, C. (2023). Long-term analysis of the urban heat island effect using multisource Landsat images considering inter-class differences in land surface temperature products. *Science of The Total Environment*, 858. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159777>

Yao, L., Sun, S., Song, C., Wang, Y., y Xu, Y. (2022). Recognizing surface urban heat 'island' effect and its urbanization association in terms of intensity, footprint, and capacity: A case study with multi-dimensional analysis in Northern China. *Journal of Cleaner Production*, 372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133720>

Yun, G. Y., Ngarambe, J., Duhirwe, P. N., Ulpiani, G., Paolini, R., Haddad, S., Vasilakopoulou, K., y Santamouris, M. (2020). Predicting the magnitude and the characteristics of the urban heat island in coastal cities in the proximity of desert landforms. The case of Sydney. *Science of The Total Environment*, 709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136068>

Zhao, C., Fu, G., Liu, X., y Fu, F. (2011). Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Building and Environment*, 46(5), 1174–1183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.009>