

Multitemporal analysis of the relationship between urban green infrastructure and the urban heat island in Lince, Lima–Peru (2015–2025)

Paraguay Curo Jhon Edison¹, Gutiérrez Ovalle Miguel Angel² and Anita Arrascue Lino³

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima

u20211c375@upc.edu.pe¹, u20201c078@upc.edu.pe², anita.arrascue@upc.edu.pe³

Abstract– This study analyzes the relationship between green infrastructure and the mitigation of the Surface Urban Heat Island (SUHI) effect in the Lince district (Lima), through a multi-temporal analysis spanning the 2015-2025 period. The research is based on Landsat 8 and 9 satellite imagery, selected annually according to seasonality and radiometric quality criteria, excluding years without the availability of suitable images. Despite the limited availability of green spaces in the district (3.04 m² per inhabitant) a value lower than commonly cited international recommendations, the vegetation associated with urban green infrastructure presents a consistent thermal regulating effect. The processing of bands 4, 5, and 10 allowed for the estimation of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST), and SUHI for 5,601 urban units. The NDVI ranged between -0.01 (2021, 2023, and 2024) and 0.36 (2018 and 2023), indicating low overall vegetative cover with specific localized increases. The LST ranged from 15.41 °C to 45.40 °C. Furthermore, critical SUHI events of +5.48 °C were identified, whereas areas with a higher presence of vegetation cover recorded negative thermal anomalies of up to -5.00 °C, demonstrating the mitigating effect of urban green infrastructure on surface heat accumulation. Throughout the evaluated years, the NDVI-LST and NDVI-SUHI relationships showed negative and statistically significant correlations (r between -0.595 and -0.480; $p < 0.001$), evidencing that even small areas of urban green infrastructure are associated with lower surface heat accumulation in a densely urbanized district like Lince.

Keywords– Green infrastructure, Surface Urban Heat Island, Climate regulation, Land surface temperature.

Análisis multitemporal de la relación entre infraestructura verde urbana y la isla de calor en Lince, Lima-Perú (2015–2025)

Paraguay Curo Jhon Edison¹, Gutiérrez Ovalle Miguel Angel² and Anita Arrascue Lino³

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima

u20211c375@upc.edu.pe¹, u20201c078@upc.edu.pe², anita.arrascue@upc.edu.pe³

Resumen— Este estudio analiza la relación entre la infraestructura verde y la moderación del efecto de las islas de calor superficial urbana (SUHI) en el distrito de Lince (Lima), mediante un análisis multitemporal durante el periodo 2015 - 2025 basado en imágenes satelitales Landsat 8 y 9 seleccionadas anualmente según criterios de estacionalidad y calidad radiométrica, excluyéndose aquellos años sin disponibilidad de imágenes adecuadas. A pesar de la limitada disponibilidad de áreas verdes en el distrito (3.04 m² por habitante), valor inferior a recomendaciones internacionales comúnmente citadas, la vegetación asociada a la infraestructura verde urbana presenta un efecto regulador térmico consistente. El procesamiento de las bandas 4, 5 y 10 permitió estimar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), LST (temperatura superficial terrestre) y SUHI para 5601 unidades urbanas. El NDVI osciló entre -0,01 (2021, 2023 y 2024) y 0,36 (2018 y 2023), evidenciando baja cobertura vegetal con incrementos puntuales de vegetación. La LST presentó un rango entre 15,41 °C y 45,40 °C. Asimismo, se identificaron eventos críticos de SUHI de +5,48, mientras que las áreas con mayor presencia de cobertura vegetal registraron anomalías térmicas negativas de hasta -5,00, evidenciando el efecto mitigador de la infraestructura verde urbana sobre la acumulación de calor superficial. En los años evaluados, las relaciones NDVI-LST y NDVI-SUHI registraron correlaciones negativas y estadísticamente significativas (r entre -0.595 y -0.480; $p < 0.001$), lo que evidencia que incluso superficies reducidas de infraestructura verde urbana se asocian con una menor acumulación de calor superficial en un distrito densamente urbanizado como Lince.

Palabras clave—infraestructura verde, isla de calor superficial urbana, regulación climática, temperatura superficial terrestre.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el acelerado crecimiento urbano de Lima Metropolitana ha generado profundas transformaciones en su estructura territorial, alterando los patrones micro climáticos y acentuando el fenómeno conocido como isla de calor superficial urbana (SUHI) [2]. Este efecto, caracterizado por el incremento de la temperatura superficial en áreas densamente edificadas en comparación con zonas periféricas o con mayor cobertura vegetal, se ha consolidado como uno de los principales desafíos ambientales de las ciudades latinoamericanas contemporáneas [3], [4].

En el contexto peruano, la intensidad de la SUHI se ve agravada por la limitada disponibilidad de infraestructura verde urbana y la elevada densidad poblacional que caracteriza a

diversos distritos de Lima Metropolitana. La progresiva sustitución áreas verdes por superficies impermeables, como el asfalto, concreto y techumbres metálicas, sumada al crecimiento del parque automotor y a la escasa incorporación de criterios de planificación térmica en el ordenamiento urbano, ha convertido a distritos como Lince en zonas críticas de calentamiento urbano.

Esta tendencia contraviene los lineamientos de la política ambiental y climática nacional, orientados a fortalecer la resiliencia urbana, en los que la infraestructura verde es reconocida como un elemento estratégico para la reducción de riesgos climáticos y la adaptación de las ciudades frente al calentamiento urbano [5], [6].

Desde una perspectiva científica, diversos estudios han demostrado que la temperatura superficial del suelo (LST) presenta una relación inversa con la cobertura vegetal, comúnmente expresada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), evidenciando que la pérdida de vegetación disminuye la capacidad de regulación térmica del entorno urbano [7], [8]. No obstante, la mayoría de estas investigaciones se han concentrado en áreas metropolitanas extensas, relegando la escala distrital, a pesar de que es en este nivel donde las decisiones de gestión urbana y arborización generan efectos inmediatos y medibles sobre el confort térmico local.

El distrito de Lince, con una superficie aproximada de 3.03 km² y una de las mayores densidades poblacionales de Lima Metropolitana, constituye un caso emblemático de este problema. Su marcado desarrollo urbano vertical, la escasez de espacios verdes y la intensa movilidad vehicular lo posicionan como un foco emergente de estrés térmico urbano [9]. Pese a ello, los estudios específicos sobre su dinámica térmica continúan siendo limitados, lo que restringe la formulación de políticas municipales sustentadas en evidencia científica.

Observaciones de campo realizadas en el distrito evidencian que los espacios verdes urbanos, en particular el parque Ramón Castilla, presentan temperaturas perceptiblemente más bajas en comparación con avenidas y calles con escasa cobertura vegetal. En concordancia, estudios recientes señalan que los espacios arbolados pueden reducir la temperatura superficial entre 4,7 °C y 5,4 °C durante la temporada de verano, confirmando el valor regulador de la infraestructura verde urbana [10], [11].

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento térmico de la SUHI y su distribución espacial en el distrito de Lince durante el periodo 2015 - 2025, mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8 y 9. El enfoque multitemporal permite la variabilidad interanual del fenómeno de las SUHI y evaluar patrones espaciales persistentes asociados a la cobertura vegetal.

Los sensores Landsat proporcionan información de temperatura superficial y cobertura vegetal con una resolución espacial adecuada para el análisis a escala distrital. En este estudio se procesan los indicadores de SUHI, LST y NDVI con el fin de identificar zonas de mayor acumulación térmica y evaluar cuantitativamente la relación entre la infraestructura verde urbana y la temperatura superficial. El aporte científico de esta investigación radica en la generación de evidencia empírica multitemporal a escala distrital sobre el vínculo entre la dinámica térmica urbana y la distribución y extensión de la cobertura vegetal asociada a la infraestructura verde urbana.

Asimismo, se analiza el potencial de la infraestructura verde urbana como una estrategia sostenible para mitigar los efectos del calentamiento urbano y fortalecer la adaptación climática en distritos densamente urbanizados. Finalmente, los resultados del estudio ofrecen una base técnica para la gestión de la arborización urbana y diseño de espacios públicos, sustentadas en criterios científicos y climáticos que pueden orientar la planificación urbana local.

II. MÉTODO

Área de estudio

La investigación adopta un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo-correlacional y un diseño no experimental, multitemporal, basado en la selección anual de imágenes satelitales representativas correspondientes al periodo 2015–2025. El área de estudio comprende la totalidad de los predios urbanos del distrito de Lince (Lima, Perú), abarcando un total de 5.601 unidades urbanas. El distrito presenta una configuración altamente urbanizada, con una población de 60.647 habitantes, una elevada densidad poblacional de 20.216 hab./km² y un déficit de áreas verdes de 3,04 m²/hab. para el año 2021 [12].

Desde una perspectiva urbano-climático, Lince se sitúa en la zona central de Lima Metropolitana, caracterizada por un clima árido subtropical, baja precipitación anual y una limitada variabilidad térmica estacional, condiciones que favorecen la acumulación de calor en superficies impermeables y la intensificación del fenómeno de isla de calor superficial urbana dentro del distrito [13], [14].

El análisis se centró en el verano austral (diciembre a marzo), estación caracterizada por el mayor estrés térmico urbano y una mayor actividad fotosintética de la vegetación. Este criterio permitió la identificación de patrones de SUHI y el análisis de la relación entre la cobertura vegetal asociada a la infraestructura verde urbana y la temperatura superficial del distrito a lo largo del periodo evaluado (2015–2025).

Para cada año se seleccionó una imagen satelital representativa correspondiente al periodo de verano que comprende los meses de diciembre a marzo, para el procesamiento de la LST, la SUHI y el NDVI; para el análisis de correlación se utilizó únicamente un mes por año, considerando criterios de calidad geométrica, disponibilidad de imágenes completas del área de estudio y un porcentaje de nubosidad inferior al 10%. Asimismo, se aplicaron criterios de control de calidad para minimizar la influencia de nubes, sombras y otras interferencias atmosféricas, con el objetivo de reducir sesgos y mejorar la comparabilidad temporal de los resultados. Este procedimiento permitió evaluar de manera consistente la dinámica térmica y vegetal a lo largo del periodo analizado.

Fuentes de información y procesamiento de imágenes satelitales

Se utilizaron los sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS), obtenidos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes correspondieron a productos L1TP (Level 1 Terrain Precision), los cuales garantizan una alta precisión geométrica y ortorrectificación. Los datos fueron reproyectados al sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), zona 18 S, utilizando el datum y el elipsoide WGS84. Las imágenes presentan una resolución espacial de 30 metros, mientras que la información térmica fue derivada de la banda 10 del sensor TIRS. La selección de las escenas consideró un porcentaje de nubosidad inferior al 10 %. Las bandas espectrales utilizadas incluyeron la banda 4 (rojo) y la banda 5 (infrarrojo cercano, NIR) para el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), además de la banda 10 (infrarrojo térmico) para la estimación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST). El procesamiento y análisis de la información se realizaron mediante el software ArcMap, versión 10.8.

A partir de las imágenes satelitales seleccionadas se estimaron la LST, SUHI y NDVI, analizándose su comportamiento espacial y multitemporal mediante productos ráster, siguiendo metodologías ampliamente documentadas en la literatura científica [15], [16], [17], [18], [19]. Sobre la base del ráster de LST se calculó el SUHI identificándose patrones de sobrecalentamiento y contrastes térmicos dentro del área de estudio. A continuación, se especifica de manera detallada cada una de las etapas del proceso.

Cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) y la Isla de Calor Superficial Urbana (SUHI)

La estimación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) se realizó a partir de imágenes Landsat 8 y 9, utilizando la banda térmica 10 del sensor Thermal Infrared Sensor (TIRS), siguiendo metodologías ampliamente validadas en la literatura científica. El valor digital predominante en las capas QA_PIXEL de las imágenes Landsat analizadas durante el periodo 2015–2025 fue 21 824, es decir, que no están cubiertos por nubes, sombra ni agua despejada con mínimos establecidos

[[20]. En primer lugar, se calculó la radiancia espectral en el tope de la atmósfera (TOA), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$L\lambda = ML \times Qcal + AL - Oi. \quad (1)$$

Donde:

$L\lambda$: Radiancia espectral TOA

ML: Número de bandas multiplicativa de radiancia

AL: Banda de adición de resplandor

(RADIANCE_ADD_BAND_10 del archivo de MTL)

Qcal: Valores de pixeles del producto estándar cuantificable y calibrado (DN)

Oi: Valor de corrección para las bandas 10 (0,29)¹

Posteriormente, la temperatura de brillo (Brightness Temperature, BT) utilizando las constantes de calibración térmica K_1 y K_2 se obtuvo mediante²:

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

Donde:

BT: Temperatura de brillo

$L\lambda$: Radiancia espectral TOA (Watts/m² × sr × μm)

K_1 : Banda constante

K_2 : Banda constante

El Índice de vegetación diferenciada y normalizada (NDVI) se calculó como a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo visible (RED), con el fin de estimar el grado de “verdor” de la superficie. Los valores del NDVI superiores a 0,1 y hasta aproximadamente 0,6 permitieron identificar la presencia de cobertura vegetal con distintos niveles de densidad y vigor [21].

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

La emisividad superficial terrestre (ϵ) parámetro para la estimación precisa de la Temperatura Superficial Terrestre (LST), ya que la radiación térmica registrada por el sensor depende directamente de este parámetro [22]. Se calculó a partir del NDVI mediante el método de fracción de vegetación. En primer lugar, se estimó la proporción de vegetación (Pv) como:

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right) \quad (4)$$

$$\epsilon = 0.004 \times Pv + 0.986 \quad (5)$$

Pv : proporción de la vegetación

ϵ : emisividad de la superficie terrestre

donde $NDVI_{min}$ y $NDVI_{max}$ corresponden a los valores mínimo y máximo de NDVI determinados para cada escena dentro del área de estudio, una vez aplicadas las máscaras de calidad. Posteriormente, la emisividad (ϵ) se calculó mediante:

La temperatura de la superficie terrestre (LST) se obtuvo corrigiendo la temperatura de brillo por el efecto de la emisividad superficial, de acuerdo con la siguiente expresión; donde λ representa la longitud de onda efectiva de la banda térmica y c_2 segunda constante de radiación³.

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\lambda \times \frac{BT}{c_2} \right) \ln \epsilon} \quad (6)$$

λ : 10.8 μm longitud de onda efectiva del canal térmico

c_2 : segunda constante de radiación 14388 μm K

$\ln \epsilon$: logaritmo natural de la emisividad de la superficie terrestre.

BT: Temperatura de brillo

La intensidad de la isla de calor superficial urbana se estimó mediante la estandarización de la LST, obteniéndose un índice que representa anomalías térmicas relativas dentro del distrito, conforme a la expresión:

$$SUHI = \frac{LST - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Donde:

μ : Media del LST.

σ : Desviación estándar del LST.

Se extrajeron los valores de LSTm, SUHI y NDVI a partir de centroides generados desde el shapefile con lotes del catastro de Lince, el cual comprende un total de 5.601 unidades, incluidos los parques y excluidas las vías. Para ello se utilizó la herramienta Feature to, Point (opción *Inside*), garantizando que cada centroide se ubicara dentro del polígono correspondiente. Posteriormente, se empleó la herramienta *Extract Values to Points* para asignar los valores ráster a cada unidad urbana generándose una base de datos integrada con valores representativos de LST, SUHI y NDVI para cada unidad de análisis. Adicionalmente, se calculó la intensidad absoluta de SUHI como la diferencia entre la temperatura media urbana y la temperatura media de referencia, definida a partir de áreas con mayor cobertura vegetal dentro del distrito, según:

¹ El valor de 0,29 W/m² · sr · μm corresponde a la corrección aplicada a la Banda 10 del sensor TIRS para eliminar el error radiométrico promedio ocasionado por radiación parásita fuera del campo de visión del sensor [29].

² K_1 y K_2 son constantes de calibración térmica para la Banda 10 de Landsat 8 y 9 (774.8853 y 1321.0789), extraídas de los metadatos del archivo MTL proporcionado por el USGS.

³ Definida como $c_2 = h \cdot \frac{c}{\sigma}$, cuyo valor aproximado es 14 380 μm K. En esta expresión, σ representa la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), h corresponde a la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J × s) y c es la velocidad de la luz en el vacío ($2,998 \times 10^8$ m/s).

$$SUHI = Temperatura_{Urbano} - Temperatura_{Referencial} \quad (8)$$

$$Temperatura_{Urbano} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (9)$$

Donde:

T: Temperatura

n: Numero predios

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó de manera independiente de un mes para cada año. Los cálculos se efectuaron mediante el software Minitab, versión 19. Previamente, se evaluó la distribución de las variables LST, SUHI y NDVI mediante la prueba de normalidad de Kolmogórov–Smirnov⁴, considerando el tamaño muestral grande (n = 5.601 unidades urbanas por año). Los resultados indicaron el no cumplimiento del supuesto de normalidad (p < 0,05), lo cual es esperable dada la naturaleza espacial de los datos no sigue una distribución normal.

En consecuencia, se optó por el uso de métodos estadísticos no paramétricos, empleándose el coeficiente de correlación de Spearman, para analizar la relación entre las variables LST, SUHI y NDVI. El análisis se aplicó de forma consistente a imágenes satelitales correspondientes a los meses de verano correspondientes a los meses de enero de los años 2015, 2016 y 2017; febrero de 2018; marzo de 2019; enero de 2021; diciembre de 2022; y enero para los años 2023, 2024 y 2025., seleccionadas en función de la disponibilidad de imágenes cobertura de nubosidad superior al 10 %. El mes de enero fue el más recurrente dentro del conjunto de datos debido a su mayor disponibilidad y calidad de imágenes satelitales de 2015 a 2025.

Los resultados de la correlación permitieron evaluar la intensidad y el sentido de la asociación entre la cobertura vegetal y las variables térmicas a escala distrital, empleándose un nivel de confianza del 95 % (α = 0,05).

III. RESULTADOS

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El valor mínimo de NDVI fue de -0,01, registrado de manera recurrente en marzo de 2021, marzo de 2023 y febrero de 2024, reflejando el predominio de superficies impermeables y una cobertura vegetal prácticamente inexistente en sectores específicos del distrito. En contraste, el valor máximo alcanzó 0,36, observado en febrero de 2018 y febrero de 2023, lo que indica episodios puntuales de mayor densidad y vigor de la vegetación (Figura1).

Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) e Isla de Calor Superficial Urbana (SUHI)

La temperatura superficial terrestre (LST) registrada en el distrito de Lince presentó una marcada variabilidad temporal y

espacial a lo largo del periodo evaluado. El valor mínimo de LST fue de 15,41 °C observado en el mes de enero de 2017, correspondiente a condiciones térmicas relativamente moderadas dentro del periodo estival analizado. En contraste, el valor máximo fue de 45,40 °C, registrado en marzo de 2021, lo que evidencia la ocurrencia de episodios de elevada acumulación térmica superficial en sectores específicos del distrito, particularmente en áreas dominadas por superficies impermeables y alta densidad constructiva (Figura1).

La Figura 2 expone la distribución espacial de la Isla de Calor Superficial Urbana (SUHI) durante periodos de anomalías térmicas en rango de los años estipulados. El análisis cronológico toma como línea base el histórico evento El Niño de diciembre de 2016, para luego contrastarlo con el nivel de mayor estrés térmico registrado en la serie (marzo de 2021, con máximas de 45.40 °C). Asimismo, se evidencian picos significativos de acumulación de calor urbano hacia el final de La Niña en diciembre de 2022 SUHI máximo de 4.35 y un extremo por el inicio de El Niño Costero en marzo de 2023, donde la SUHI alcanzó su valor máximo de 5.48. Estos escenarios de calentamiento se contraponen con la alta variabilidad espacial de febrero de 2024 y con el máximo efecto de enfriamiento superficial de diciembre de 2024; este último, un periodo de transición que registró la "isla de frío" más pronunciada del estudio (SUHI de -5.00).

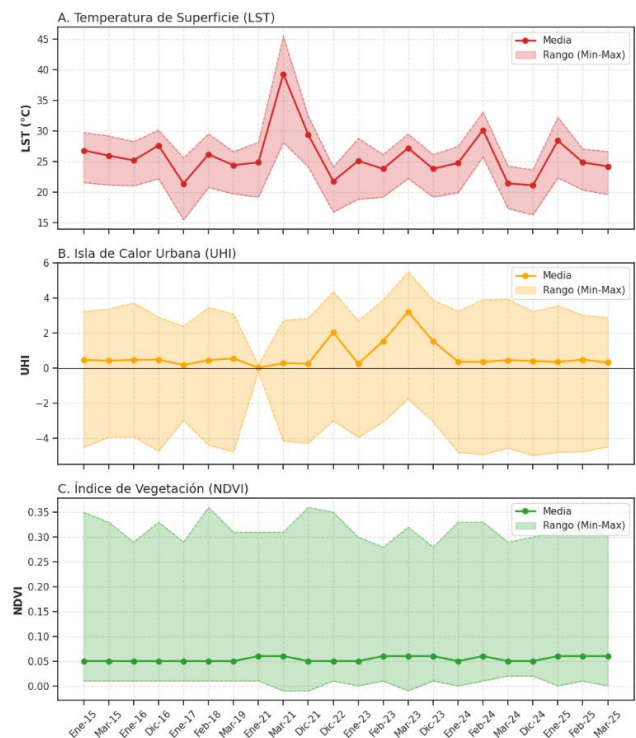


Fig. 1 Media, máximo y mínimo de LST, NDVI y SUHI (2015–2025).

⁴ La prueba de Kolmogórov–Smirnov se emplea comúnmente para evaluar cuantitativamente la normalidad en conjuntos de datos con tamaños

muestrales grandes, constituyendo un procedimiento estándar en las etapas iniciales del análisis estadístico [30].

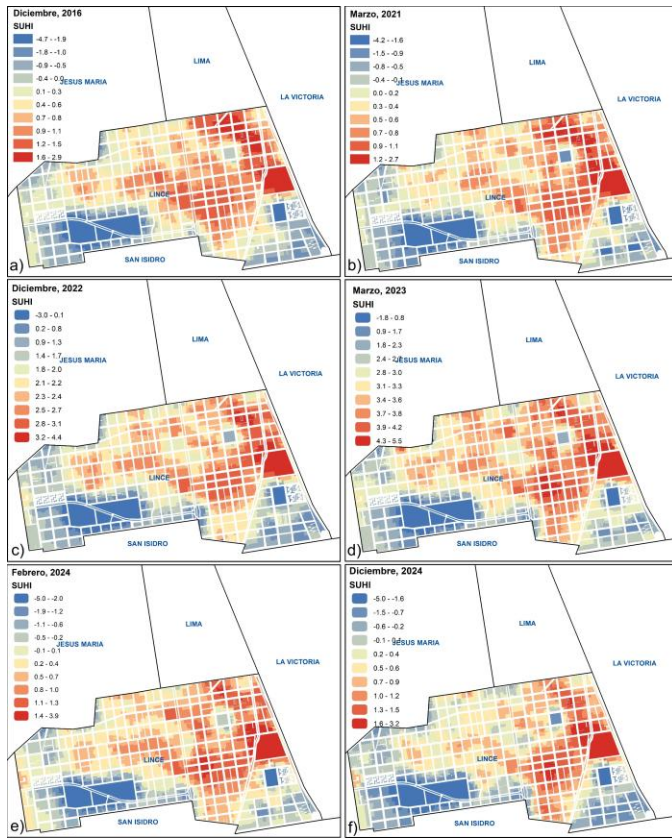


Fig. 2 Distribución espacial de la Isla de Calor Superficial Urbana (SUHI) durante periodos de anomalías térmicas significativas.

Correlación

En la tabla 1, se hace un análisis de correlación de Spearman donde se evidenció una relación negativa y estadísticamente significativa entre el NDVI y SUHI en todos los años evaluados ($p < 0,001$), indicando que mayores niveles de cobertura vegetal se asocian con menores anomalías térmicas dentro del distrito. Los valores de p oscilaron entre $-0,595$ y $-0,480$, lo que refleja una correlación moderada a moderadamente alta. Las correlaciones de mayor magnitud se registraron en 2015, 2016, 2022 y 2024, mientras que en 2019 y 2025 se observaron valores ligeramente menores, aunque consistentes y estadísticamente significativas. El año 2020 fue excluido debido a la ausencia de imágenes radiométrica adecuada y nubosidad $\leq 10\%$, con el fin de preservar la consistencia del análisis.

Tabla 1 Correlación de las variables de NDVI y SUHI

Periodo	Variable 1	Variable 2	ρ (Spearman)	IC 95%	Valor p	n (Lotes)	Interpretación principal
2015	NDVI	SUHI	-0.595	(-0.613, -0.577)	< 0.001	5601	Relación negativa robusta; mayor vegetación reduce significativamente la UHI
2016	NDVI	SUHI	-0.583	(-0.602, -0.564)	< 0.001	5601	Relación negativa robusta; mayor vegetación reduce significativamente la SUHI
2017	NDVI	SUHI	-0.566	(-0.585, -0.547)	< 0.001	5601	Correlación negativa estable; mayor NDVI implica menor intensidad de SUHI.
2018	NDVI	SUHI	-0.565	(-0.584, -0.545)	< 0.001	5601	Correlación negativa estable; mayor NDVI implica menor intensidad de SUHI.
2019	NDVI	SUHI	-0.514	(-0.534, -0.493)	< 0.001	5601	Relación negativa moderada; la vegetación mantiene su efecto mitigador sobre la SUHI.
2020	NDVI	SUHI	Excluido por criterios de selección de imágenes				
2021	NDVI	SUHI	-0.522	(-0.542, -0.502)	< 0.001	5601	Relación negativa moderada; la vegetación mantiene su efecto mitigador sobre la SUHI.
2022	NDVI	SUHI	-0.594	(-0.612, -0.575)	< 0.001	5601	Relación negativa robusta; mayor vegetación reduce significativamente la SUHI
2023	NDVI	SUHI	-0.544	(-0.563, -0.524)	< 0.001	5601	Correlación negativa estable; mayor NDVI implica menor intensidad de SUHI.
2024	NDVI	SUHI	-0.578	(-0.597, -0.559)	< 0.001	5601	Relación negativa robusta; mayor vegetación reduce significativamente la SUHI
2025	NDVI	SUHI	-0.480	(-0.501, -0.459)	< 0.001	5601	Relación negativa moderada; la vegetación mantiene su efecto mitigador sobre la SUHI.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian la persistencia de la isla de calor superficial urbana (SUHI) en el distrito de Lince, con contrastes térmicos de hasta $[+5,48; -5,00]$ entre las zonas cálidas y frías. Estos gradientes reflejan la influencia de la urbanización intensiva y progresiva pérdida de cobertura vegetal, factores que han contribuido a intensificar el fenómeno y a generar impactos socioambientales relevantes, tales como el aumento de enfermedades asociadas al estrés térmico y un mayor consumo energético destinado a sistemas de refrigeración [23]. En este contexto, el presente estudio aporta evidencia a escala distrital sobre dicha problemática desde un enfoque dual: el análisis térmico satelital y la estimación de servicios ecosistémicos. Este último componente permite cuantificar la pérdida de beneficios ambientales esenciales,

como el enfriamiento y la regulación del microclima, progresivamente desplazados por la infraestructura gris.

Los resultados sugieren un cambio significativo a partir de 2023, cuando el valor medio de la isla de calor superficial urbana pasó de aproximadamente 0,5 a valores superiores a 3,0, lo cual se asocia a una mayor presencia de infraestructura gris. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se mantiene estancado en valores comprendidos entre 0,05 y 0,06, lo que evidencia un déficit estructural de áreas verdes en el distrito de Lince, insuficiente para mitigar el incremento de las temperaturas. En cuanto a la temperatura superficial terrestre, el pico de 45,40 °C registrado en enero de 2021 resalta la vulnerabilidad del área frente a eventos térmicos extremos. No obstante, la presencia de edificaciones genera zonas de sombra que explican la ocurrencia de valores mínimos negativos de SUHI. Estos patrones son consistentes con hallazgos previos que vinculan la intensificación del SUHI. Estos patrones son consistentes con hallazgos previos que vinculan la intensificación del fenómeno con la pérdida de cobertura vegetal y el predominio de materiales urbanos de baja reflectancia.

De manera complementaria, la presencia de cobertura arbórea contribuye a la generación de zonas de sombra más frías, lo que también explica la ocurrencia de valores negativos de SUHI. Estos resultados refuerzan la evidencia de que la vegetación urbana desempeña un rol clave en la modulación térmica del entorno, en concordancia con estudios previos [22], [23].

Los resultados son consistentes con investigaciones realizadas en otras ciudades latinoamericanas, como Ciudad de México o Santiago de Chile, donde la vegetación urbana ha demostrado un efecto mitigador significativo del SUHI [24], [25]. Asimismo, concuerdan con evaluaciones a escala regional en América Latina que destacan el papel de la infraestructura verde en la regulación térmica urbana [26].

No obstante, es importante considerar la incertidumbre asociada a la resolución espacial de 30 m de las imágenes Landsat. Dado que el tamaño de los lotes urbanos en Lince es menor que un píxel satelital, se presenta el efecto de píxel mixto, en el cual una celda integra múltiples coberturas (vegetación, concreto, asfalto y edificaciones). Esto puede generar sobreestimaciones o subestimaciones de la temperatura superficial en unidades urbanas individuales. En consecuencia, los valores de LST y SUHI deben interpretarse como aproximaciones a escala distrital, constituyendo una limitación inherente al uso de sensores de resolución media en entornos urbanos complejos [27], [28].

En este contexto, el estudio resalta y amplía la evidencia al demostrar el valor económico y ambiental de la infraestructura verde urbana como estrategia de adaptación climática. En este sentido, el aporte principal del presente estudio radica en evidenciar que incluso en distritos altamente densificados y con un severo déficit de áreas verdes, pequeñas superficies vegetadas pueden generar efectos térmicos reguladores significativos.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a los asesores del curso de investigación (PIA) de la carrera de Ingeniería Ambiental en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por su orientación técnica, acompañamiento constante y valiosos aportes metodológicos durante el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] "Manuscript Templates for Conference Proceedings | IEEE." Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.ieee.org/conferences/publishing/templates>
- [2] V. S. Soberón Forsberg and E. Obregón Párraga, "IDENTIFICACIÓN DE ISLAS DE CALOR EN LA CIUDAD DE LIMA METROPOLITANA UTILIZANDO IMÁGENES DEL SATÉLITE LANDSAT 5TM," *Anales Científicos*, vol. 77, no. 1, p. 34, Jun. 2016, doi: 10.21704/ac.v77i1.475.
- [3] M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, and L. Bounoua, "Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA," *Remote Sens. Environ.*, vol. 114, no. 3, pp. 504–513, Mar. 2010, doi: 10.1016/J.RSE.2009.10.008.
- [4] S. W. Myint, E. A. Wentz, A. J. Brazel, and D. A. Quattrochi, "The impact of distinct anthropogenic and vegetation features on urban warming," *Landsc. Ecol.*, vol. 28, no. 5, 2013, doi: 10.1007/s10980-013-9868-y.
- [5] Ministerio del Ambiente, "Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional del Perú. Reporte de actualización periodo 2021–2030," Lima, Dec. 2020. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: <https://nuestrodesafioclimatico.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2024/02/Actualizacion-de-las-NDC-del-Peru-al-2030.pdf>
- [6] Ministerio del Ambiente, *Decreto Supremo N.º 012-2009-MINAM que aprueba la Política Nacional del Ambiente*. 2009. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_012-2009-minam.pdf
- [7] M. A. Sresto, S. Siddika, Md. A. Fattah, S. R. Morshed, and Md. M. Morshed, "A GIS and remote sensing approach for measuring summer-winter variation of land use and land cover indices and surface temperature in Dhaka district, Bangladesh," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10309, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e10309.
- [8] X. Li, Y. Zhou, G. R. Asrar, M. Imhoff, and X. Li, "The surface urban heat island response to urban expansion: A panel analysis for the conterminous United States," *Science of The Total Environment*, vol. 605–606, pp. 426–435, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.229.
- [9] Municipalidad Distrital de Lince, "Parques y plazas del distrito de Lince," Gob.pe. Accessed: Oct. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/14182-municipalidad-distrital-de-lince-parques-y-plazas-del-distrito-de-lince?utm>
- [10] J. Ain, "Measuring the efficiency and intensity of the cooling impact of urban parks in Riyadh, Saudi Arabia: Seasonal analysis and proposed approach to the parks cooling direction index," *Applied Geography*, vol. 179, p. 103619, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.APGEOG.2025.103619.
- [11] V. H. Guerrero-Palomino, D. Malca-Rodríguez, and H. Aponte, "Reservas de carbono en un ecosistema del desierto sudamericano: El caso de las Lomas de Amancaes (Lima, Perú)," *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Fis. Nat.*, vol. 46, no. 181, pp. 971–984, Dec. 2022, doi: 10.18257/raccefyn.1760.
- [12] P. Q. M. Alata Ninapaytán, "¿Cómo vamos en Lima y Callao? Reporte urbano de indicadores de calidad de vida 2021," Lima, 2022. Accessed: Jan. 26, 2026. [Online]. Available: www.limacomovamos.org

- [13] D. Cano, C. Cacciuttolo, A. Haller, C. Rosario, J. C. Guerra, and G. G. de Oliveira, "Spatio-temporal tendencies of urban land surface temperature on the Andean piedmont under climate change: A case study of Metropolitan Lima, Peru (1986–2024)," *Remote Sens. Appl.*, vol. 36, p. 101378, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.RSASE.2024.101378.
- [14] L. Giraldez, Y. Silva, J. L. Flores-Rojas, and G. Trasmonte, "Diagnosis of the Extreme Climate Events of Temperature and Precipitation in Metropolitan Lima during 1965–2013," *Climate 2022, Vol. 10, Page 112*, vol. 10, no. 8, p. 112, Jul. 2022, doi: 10.3390/CLI10080112.
- [15] N. A. S. Kasniza Jumari *et al.*, "Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City," *Heliyon*, vol. 9, no. 8, p. e18424, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.HELIYON.2023.E18424.
- [16] S. Kimothi *et al.*, "Spatio-temporal fluctuations analysis of land surface temperature (LST) using Remote Sensing data (LANDSAT TM5/8) and multifractal technique to characterize the urban heat Islands (UHIs)," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, p. 102956, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102956.
- [17] Y. Hu, J. Sun, and J. Zheng, "Spatiotemporal Analysis of Urban Carbon Metabolism and Its Response to Land Use Change: A Case Study of Beijing, China," *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 8, 2023, doi: 10.3390/atmos14081305.
- [18] K. V. Wong and S. Chaudhry, "Use of satellite images for observational and quantitative analysis of urban heat islands around the world," *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, vol. 134, no. 4, 2012, doi: 10.1115/1.4007486.
- [19] M. Maharjan, A. Aryal, B. Man Shakya, R. Talchabhadel, B. R. Thapa, and S. Kumar, "Evaluation of Urban Heat Island (UHI) Using Satellite Images in Densely Populated Cities of South Asia," *Earth 2021, Vol. 2, Pages 86–110*, vol. 2, no. 1, pp. 86–110, Feb. 2021, doi: 10.3390/EARTH2010006.
- [20] USGS, "Collection 2 Landsat 8-9 Pixel Quality Assessment (QA_PIXEL) Value Interpretations | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 30, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/media/images/collection-2-landsat-8-9-pixel-quality-assessment-qapixel-value-interpretations>
- [21] D. Dutta, A. Kundu, N. R. Patel, S. K. Saha, and A. R. Siddiqui, "Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI)," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 18, no. 1, pp. 53–63, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.ejrs.2015.03.006.
- [22] A. Sekertekin and S. Bonafoni, "Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation," *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 294*, vol. 12, no. 2, p. 294, Jan. 2020, doi: 10.3390/RS12020294.
- [23] W. Leal Filho, L. Echevarria Icaza, A. Neht, M. Klavins, and E. A. Morgan, "Coping with the impacts of urban heat islands. A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context," *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 1140–1149, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.086.
- [24] R. Moreno, A. Nery, R. Zamora, Á. Lora, and C. Galán, "Contribution of urban trees to carbon sequestration and reduction of air pollutants in Lima, Peru," *Ecosyst. Serv.*, vol. 67, p. 101618, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.ECOSER.2024.101618.
- [25] X. Li, Y. Jiang, Y. Liu, Y. Sun, and C. Li, "The impact of landscape spatial morphology on green carbon sink in the urban riverfront area," *Cities*, vol. 148, 2024, doi: 10.1016/j.cities.2024.104919.
- [26] F. J. Escobedo, T. Kroeger, and J. E. Wagner, "Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices," *Environmental Pollution*, vol. 159, no. 8–9, pp. 2078–2087, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2011.01.010.
- [27] S. Chen *et al.*, "Global 30 m seamless data cube (2000–2022) of land surface reflectance generated from Landsat 5, 7, 8, and 9 and MODIS Terra constellations," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 16, no. 11, pp. 5449–5475, Nov. 2024, doi: 10.5194/essd-16-5449-2024.
- [28] A. Hurdud, S. L. Ermida, and C. C. DaCamara, "On the Suitability of Different Satellite Land Surface Temperature Products to Study Surface Urban Heat Islands," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 16, no. 20, p. 3765, Oct. 2024, doi: 10.3390/rs16203765.
- [29] A. Gerace and M. Montanaro, "Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8," *Remote Sens. Environ.*, vol. 191, pp. 246–257, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.RSE.2017.01.029.
- [30] F. Habibzadeh, "Data Distribution: Normal or Abnormal?," *J. Korean Med. Sci.*, vol. 39, no. 3, Dec. 2023, doi: 10.3346/JKMS.2024.39.E35.