

ANÁLISIS PARAMÉTRICO VALIDADO MEDIANTE MEDICIONES EN TERRENO DEL CONFORT TÉRMICO EXTERIOR EN ESTACIONAMIENTOS EN TIRUCHIRAPPALLI, INDIA

Recibido 13/02/2026
Aceptado 27/05/2026

FIELD-VALIDATED PARAMETRIC ANALYSIS OF OUTDOOR THERMAL COMFORT IN PARKING ENVIRONMENTS IN TIRUCHIRAPPALLI, INDIA

ANÁLISE PARAMÉTRICA VALIDADA EM CAMPO DO CONFORTO TÉRMICO EXTERNO EM AMBIENTES DE ESTACIONAMENTO EM TIRUCHIRAPPALLI, ÍNDIA

Amalan-Sigmund Kaushik-S (Autor de Correspondencia)

Master's in Architecture
 Assistant Professor, Department of Architecture
 National Institute of Technology Tiruchirappalli
 Tiruchirappalli, India
<https://orcid.org/0000-0003-3260-4485>
kaushik@nitt.edu

Gopalakrishnan Padmanaban

Ph.D. in Architecture
 Assistant Professor, Department of Architecture
 National Institute of Technology Tiruchirappalli
 Tiruchirappalli, India
<https://orcid.org/0000-0002-4762-4430>
gopal@nitt.edu

Subbaiyan Gnanasambandam

Ph.D. in Architecture
 Professor, Department of Architecture
 National Institute of Technology Tiruchirappalli
 Tiruchirappalli, India
<https://orcid.org/0000-0003-4406-034X>
subbaiah@nitt.edu



RESUMEN

La rápida urbanización en ciudades de clima cálido-húmedo ha intensificado el estrés térmico en los estacionamientos con superficies impermeables. Este estudio evalúa la influencia combinada del albedo superficial, del Índice de Reflectancia Solar (SRI, por su sigla en inglés) de la cubierta, de la cobertura vegetal y de la orientación sobre el confort térmico exterior en Tiruchirappalli, India, mediante mediciones en terreno y simulaciones microclimáticas. Este tipo de mediciones, realizadas en tres tipologías de estacionamiento, se utilizaron para validar simulaciones con ENVI-met ($R^2 = 0.931$ para MRT). Una matriz paramétrica generó treinta y dos iteraciones de diseño en cuatro orientaciones. Los resultados indican que la temperatura radiante media es el principal factor del desconfort térmico. El aumento del albedo superficial y del SRI de la cubierta no redujo de forma consistente el UTCI debido a los efectos de la radiación reflejada. En contraste, una cobertura vegetal del 60 % redujo significativamente el estrés térmico máximo en todas las orientaciones. La orientación este-oeste intensificó la acumulación de calor por la tarde, mientras que la orientación noroeste-sudeste moderó el estrés térmico máximo. La configuración óptima del albedo de 0,2, SRI de 30 y vegetación al 60% en la orientación noroeste-sureste produjo el UTCI medio más bajo (32,49 °C).

Palabras clave

confort térmico exterior, índice universal de clima térmico (UTCI), albedo superficial

ABSTRACT

Rapid urbanization in warm-humid cities has intensified thermal stress in impervious parking environments. This study evaluates the combined influence of surface albedo, roof Solar Reflectance Index (SRI), vegetation cover, and orientation on outdoor thermal comfort in Tiruchirappalli, India, using field measurements and microclimate simulations. Field measurements from three parking typologies were used to validate ENVI-met simulations ($R^2 = 0.931$ for MRT). A parametric matrix generated thirty-two design iterations across four orientations. Results indicate that mean radiant temperature is the dominant driver of thermal discomfort. Increasing surface albedo and roof SRI alone did not consistently reduce UTCI due to reflected radiation effects. In contrast, 60% vegetation cover significantly reduced peak thermal stress across all orientations. East-West alignment intensified afternoon heat accumulation, whereas Northwest-Southeast orientation moderated peak stress. The optimal configuration of albedo 0.2, SRI 30, and 60% vegetation under NW-SE orientation produced the lowest mean UTCI (32.49 °C).

Keywords

outdoor thermal comfort, universal thermal climate index (UTCI), surface albedo

RESUMO

A rápida urbanização em cidades de clima quente e úmido tem intensificado o estresse térmico em ambientes de estacionamento impermeáveis. Este estudo avalia a influência combinada do albedo de superfície, do Índice de Refletância Solar (SRI, do inglês Solar Reflectance Index) da cobertura, da cobertura vegetal e da orientação sobre o conforto térmico externo em Tiruchirappalli, Índia, por meio de medições em campo e simulações microclimáticas. Medições de campo em três tipologias de estacionamento foram utilizadas para validar as simulações no ENVI-met ($R^2 = 0,931$ para a TRM). Uma matriz paramétrica gerou trinta e duas iterações de projeto distribuídas em quatro orientações. Os resultados indicam que a temperatura radiante média é o principal fator determinante do desconforto térmico. O aumento isolado do albedo de superfície e do SRI da cobertura não reduziu de forma consistente o UTCI, devido aos efeitos da radiação refletida. Em contrapartida, uma cobertura vegetal de 60% reduziu significativamente o pico de estresse térmico em todas as orientações. O alinhamento leste-oeste intensificou o acúmulo de calor no período da tarde, ao passo que a orientação noroeste-sudeste atenuou o pico de estresse. A configuração ideal de albedo de 0,2, SRI de 30 e 60% de cobertura vegetal, com orientação noroeste-sudeste, resultou no menor UTCI médio (32,49 °C).

Palavras-chave

conforto térmico externo, índice climático térmico universal (UTCI), albedo de superfície

INTRODUCCIÓN

La rápida urbanización ha intensificado el efecto de isla de calor urbana (ICU) al reemplazar la tierra con vegetación por materiales impermeables, elevando las temperaturas de la superficie terrestre (TST) en ciudades de rápido crecimiento como Tiruchirappalli (Calhoun et al., 2024; Deepthi et al., 2024). La magnitud de la ICU está fuertemente determinada por la morfología urbana y las características de la superficie, incluidas la reflectividad, la densidad y la distribución de la vegetación (Huang et al., 2025). Entre las tipologías impermeables horizontales, los estacionamientos constituyen una infraestructura térmicamente crítica, pero poco examinada (Sen, Fernández y Roesler, 2020). La expansión de la propiedad de vehículos privados en contextos residenciales e institucionales ha aumentado sustancialmente la extensión de las áreas de estacionamiento pavimentadas, exacerbando la acumulación localizada de calor y la incomodidad al aire libre (Lin, Song y Qin, 2021; Patel y Kaushik, 2023).

Los climas cálidos y húmedos plantean distintos desafíos térmicos. La humedad elevada restringe el enfriamiento por evaporación, lo que agrava el estrés fisiológico incluso con una variación moderada de la temperatura del aire (T_a). En tales entornos, la temperatura radiante media (TRM) suele dominar la percepción térmica exterior. Las superficies abiertas de asfalto, concreto y adoquines absorben y almacenan la radiación solar, lo que aumenta la temperatura de la superficie y la reradiación de onda larga (Sen et al., 2020). Los materiales de bajo albedo intensifican la acumulación de calor (Ghenai et al., 2023), mientras que la sombra limitada expone a los peatones a una radiación solar directa sostenida. En consecuencia, las áreas de estacionamiento a menudo superan los umbrales de confort térmico durante las horas pico del verano.

Las estrategias de mitigación basadas en materiales, en particular la mejora del albedo de la superficie y los techos reflectantes, han sido ampliamente investigadas. El aumento del albedo del pavimento reduce la absorción solar (Ghenai et al., 2023) y se han propuesto estacionamientos reflectantes como estrategias de mitigación de la ICU a microescala (Sen et al., 2020). Sin embargo, un albedo más alto puede aumentar la radiación de onda corta reflejada a nivel peatonal, elevando la TRM y compensando las posibles ganancias de confort (Taleghani, 2018; Ghoniem, Fahmy y Kamel, 2025). De manera similar, los sistemas de techado con valores altos del Índice de Reflectancia Solar (IRS) reducen el calentamiento de la superficie y contribuyen a una mitigación más amplia de la ICU (Nutakki et al., 2023; Jandaghian, Lacasse y Guar, 2025). Sin embargo, en tipologías de estacionamientos semicubiertos, la radiación reflejada puede redistribuir la carga térmica en lugar de eliminarla, particularmente en espacios que carecen de vegetación y de un flujo de aire efectivo.

La vegetación demuestra consistentemente un potencial de enfriamiento superior al de los materiales reflectantes. Convertir áreas de estacionamiento pavimentadas en espacios cubiertos por árboles reduce significativamente el estrés térmico (Parison et al., 2023). Los árboles reducen la TRM mediante la sombra

y la evapotranspiración, mientras moderan la T_a (Rodríguez et al., 2025; Wei, Cheng y Lin, 2025). Estrategias más amplias de ecologización urbana han demostrado un enfriamiento nocturno y una mayor estabilidad térmica (Calhoun et al., 2024) y la infraestructura verde mejora el confort térmico en contextos climáticos (Gidey y Mhangara, 2025; Silva Nascimento et al., 2025). La estructura de la vegetación, incluida la densidad y la configuración de la copa de los árboles, influye aún más en los resultados de comodidad de los peatones (He y Reith, 2023; Pattnaik, Rahman y Pauleit, 2025). De hecho, los análisis comparativos indican que la plantación de árboles puede superar a los pavimentos de bajo albedo en la optimización del confort estival (Zhang et al., 2025).

La orientación espacial introduce un parámetro adicional, aunque menos integrado. La alineación urbana influye en la interceptación solar, la dinámica de las sombras y la distribución del flujo de aire (Abdelwahab, Fekry y Hamed, 2025; Huang et al., 2025). Ciertas orientaciones prolongan la exposición de la tarde e intensifican la acumulación radiante, mientras que las configuraciones oblicuas pueden moderar el estrés máximo (Rachidi et al., 2026). Estudios en contextos indios confirman que la orientación afecta significativamente la ganancia de calor solar y el rendimiento microclimático (Kaushik S. y Amraotkar, 2026; Peter y Kaushik, 2024; Pachauri y Kaushik S., 2025). Sin embargo, los efectos combinados de la orientación, la reflectividad de la superficie y la densidad de la vegetación en las tipologías de estacionamiento aún no se han cuantificado lo suficiente.

La evaluación del confort térmico en exteriores se basa en índices que integran parámetros meteorológicos y radiativos. El Índice Universal de Clima Térmico (UTCI, en inglés), la Temperatura Fisiológica Equivalente (TE) y el Índice de Calor (IC) se emplean ampliamente para evaluar el estrés térmico en los peatones (Silva Nascimento et al., 2025; Peter y Kaushik, 2024). Los índices de confort térmico en exteriores, como UTCI y TE, incorporan la TRM y, por lo tanto, son particularmente adecuados para evaluar las condiciones térmicas de los peatones en entornos exteriores altamente radiativos. Por el contrario, el IC considera principalmente la temperatura del aire y la humedad relativa y no tiene en cuenta explícitamente el intercambio radiativo ni los efectos del viento. El UTCI fue seleccionado en este estudio debido a su amplia aplicación en la investigación del clima urbano al aire libre y a su idoneidad para evaluar las condiciones térmicas dinámicas en exteriores de ambientes cálidos y húmedos (Wang et al., 2020; Kafy, Alsulamy y Alsaleh, 2026). Dado que el estudio se realizó en un clima tropical cálido-húmedo, los valores de UTCI se interpretaron utilizando la escala calibrada de clima cálido-húmedo propuesta en la literatura reciente, en la que 21,8–30,9 °C corresponde a la ausencia de estrés térmico y 30,9–39,0 °C a estrés térmico moderado (Chen, Fang y Hwang, 2025). Estudios recientes en climas tropicales también han combinado la validación ENVI-met con mediciones de campo y evaluaciones del confort térmico de los peatones para evaluar la efectividad de las estrategias integradas de mitigación bioclimática en ambientes al aire libre (Austin, Solano y Chen Austin, 2025).

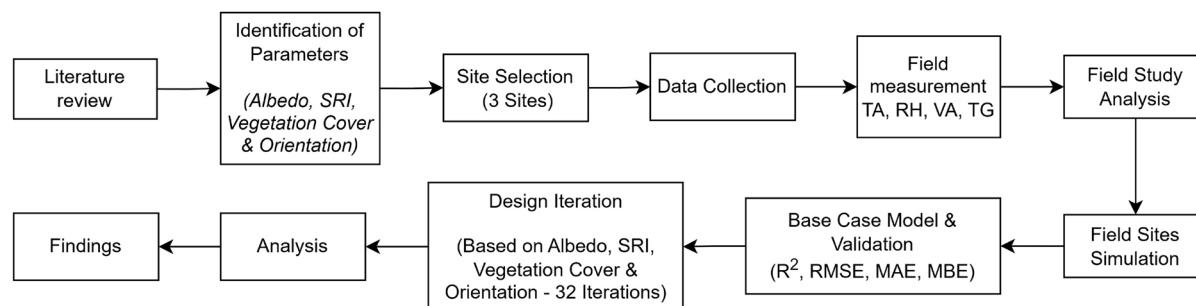


Figura 1. Metodología. Fuente: Preparado por los autores.

A pesar de la extensa investigación independiente sobre albedo, techos fríos, vegetación y orientación, los análisis integrados y validados en terreno que combinan estos parámetros en entornos de estacionamiento cálidos y húmedos siguen siendo limitados. La mayoría de los estudios se centran en intervenciones aisladas o en climas cálidos, áridos y templados, donde los equilibrios evaporativos y radiativos difieren sustancialmente. Esta brecha restringe el desarrollo de pautas de diseño que respondan al clima y puede conducir a soluciones muy simplistas basadas en la reflectividad, que aumentan inadvertidamente la exposición radiante de los peatones.

Este estudio aborda esta deficiencia mediante una investigación combinada basada en mediciones de campo y en simulación en Tiruchirappalli, India. Se instrumentaron tres tipologías representativas de estacionamiento en condiciones pico de verano y se utilizaron los datos para validar simulaciones en ENVI-met (R^2 de hasta 0,931 para MRT). Posteriormente, una matriz paramétrica estructurada evaluó treinta y dos iteraciones de diseño en cuatro orientaciones, variando sistemáticamente el albedo de la superficie, el IRS del techo y la cobertura vegetal. Al integrar el manejo radiativo, la densidad de la copa de los árboles y la alineación solar dentro de un marco cálido-húmedo validado, esta investigación avanza en la comprensión de la dinámica térmica a nivel peatonal en entornos de estacionamiento y propone una estrategia de optimización sensible a la orientación para un diseño tropical sensible al clima.

Aunque estudios previos han examinado la vegetación, los pavimentos reflectantes, los techos fríos y la orientación de forma independiente, pocas investigaciones han cuantificado su interacción combinada en entornos de estacionamiento, en condiciones climáticas cálidas y húmedas, mediante simulaciones validadas en terreno. La literatura existente generalmente evalúa estas medidas de mitigación de forma aislada, lo que limita el desarrollo de una guía de diseño práctica para entornos urbanos reales donde la vegetación puede verse limitada por el espacio, el mantenimiento o la disponibilidad de agua. Este estudio aborda esta brecha al identificar cómo la orientación modifica el rendimiento térmico de la reflectividad de la superficie y de la cubierta de la copa de los árboles, y al establecer una jerarquía de estrategias de mitigación para los microclimas de estacionamiento.

En consecuencia, este estudio tiene como objetivo no solo cuantificar la influencia individual y combinada del albedo de la superficie, el IRS del techo, la cubierta vegetal y la orientación espacial en el confort térmico exterior a nivel peatonal en entornos de estacionamiento, sino también identificar la efectividad relativa y la jerarquía de interacción de estas variables de diseño en condiciones climáticas cálidas y húmedas. Otro objetivo es traducir los resultados de la simulación en un marco práctico de apoyo a la toma de decisiones para contextos en los que la vegetación es limitada o inviable.

Sobre la base de estudios previos de confort térmico urbano, la investigación plantea la hipótesis de que: (1) la cubierta vegetal ejerce una influencia más fuerte en el confort térmico de los peatones que las propiedades de los materiales reflectantes; (2) el aumento del albedo de la superficie y el IRS del techo puede no mejorar proporcionalmente el UTCI debido a la mayor radiación reflejada de onda corta y la TRM elevada; (3) las orientaciones diagonales, como noroeste-sureste, reducen el estrés térmico máximo de manera más efectiva que la alineación este-oeste en condiciones solares tropicales y; (4) la efectividad térmica de las estrategias de mitigación reflectante depende de la orientación y el contexto de la vegetación, lo que indica que el albedo y el IRS del techo no pueden evaluarse independientemente de la geometría solar y las condiciones de la copa de los árboles.

METODOLOGÍA

Este estudio adoptó un marco computacional empírico integrado para evaluar el confort térmico al aire libre en entornos de estacionamiento urbano en condiciones climáticas cálidas y húmedas. El enfoque metodológico combinó mediciones microclimáticas de campo, simulaciones numéricas tridimensionales con ENVI-met v5.7.2, validación estadística de los resultados simulados y evaluación paramétrica sistemática de las variables de diseño. El flujo de trabajo secuencial, desde la caracterización del sitio hasta el análisis de optimización, se ilustra en la Figura 1.

Sitio	Orientación	Superficie del suelo (albedo)	Condición del techo (SRI)	Vegetación-en el sitio	Vegetación-contexto (N/S/E/O)
S01	330°–150° (N–S)	Camino de entrada: adoquines (0,25) Estacionamiento: adoquines (0,25)	Camino de entrada: descubierto. Estacionamiento: lámina GI azul (SRI 24)	3 árboles; altura del tronco 4-5 m; copa escasa	N: 4-5 neem (diámetro 1,5-2,5 m) S: 3 neem (diámetro 2-3 m) + arbustos + pasto E: 1 tronco grande y grueso (diámetro 2 m) + 1 árbol corto y denso (diámetro 4-5 m) O: 2 árboles de tronco mediano (diámetro 3-4 m; densidad media)
S02	0°–180° (N–S)	Camino de entrada: adoquines (0,25) Estacionamiento: PCC (0,30)	Camino de entrada: descubierto Estacionamiento: lámina de metal revestida de verde (SRI 31)	Nulo	N: 1 densidad media (diámetro 4-5 m) + 4 densidad baja pequeña (diámetro ~1 m) S: sin vegetación E: sin vegetación O: 3 árboles de tronco mediano (diámetro 2-3 m; densidad media)
S03	0°–180° (N–S)	Camino de entrada: adoquines (0,25) Estacionamiento: adoquines (0,25)	Camino de entrada: parcialmente sombreado por árboles Estacionamiento: completamente bajo la sombra de los árboles	7 Árboles neem; densidad baja-media; tronco largo; sin arbustos; LAD: 3,5; LAI: 0,4 m ² /m ³	N: 2 neem (diámetro 4-5 m; densidad media; tronco largo) + edificio de 1 piso S: 2 neem (diámetro 4-5 m; densidad media) E: 2 neem (diámetro 4-5 m; densidad media) + banco (1 piso) O: 2 neem (diámetro 4-5 m; densidad media) Nota: los ángulos del tronco varían; ramificación escasa

Tabla 1. Características del Sitio 01 (S01), Sitio 02 (S02) y Sitio 03 (S03). Fuente: Preparado por los autores.

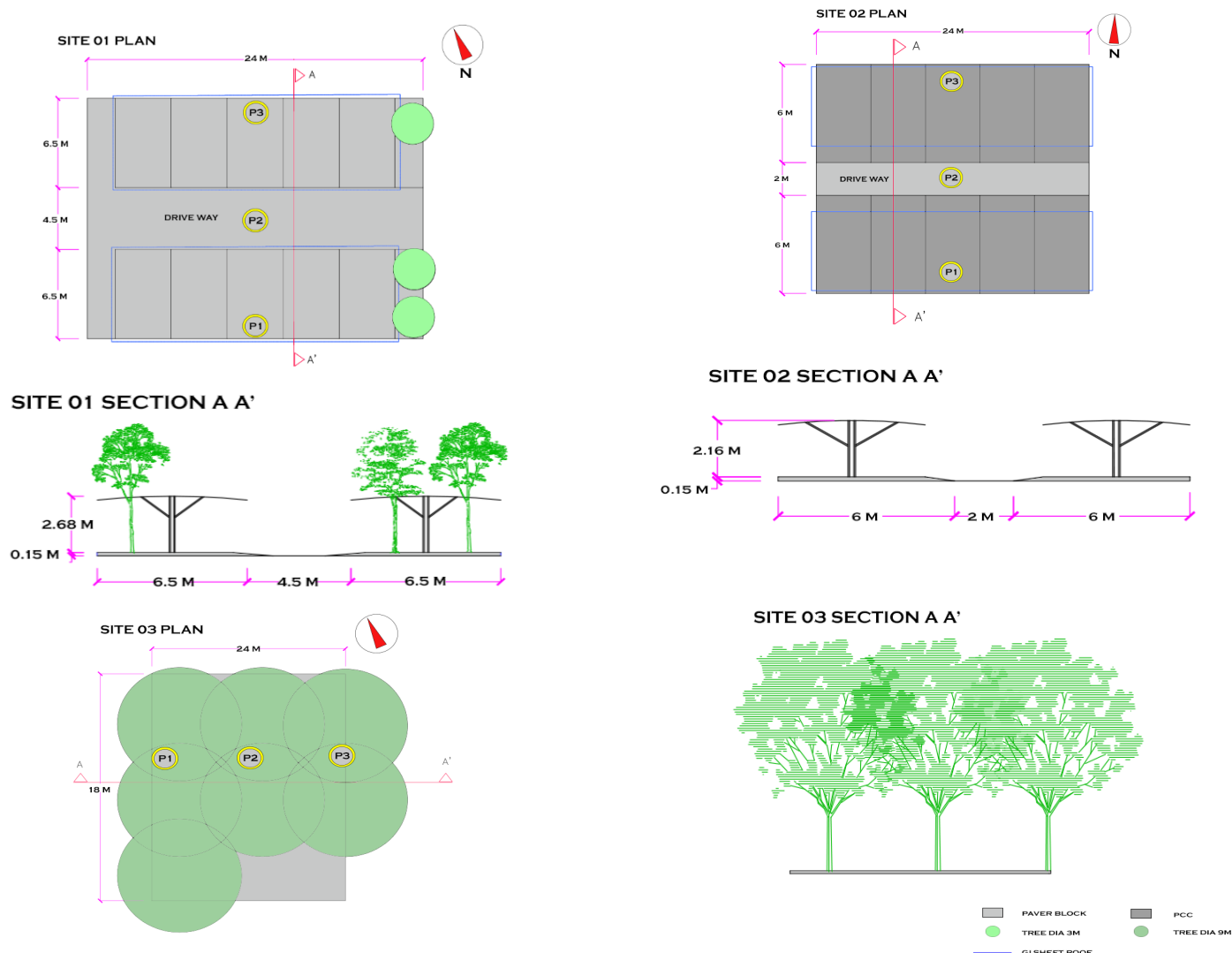


Figura 2. Ilustración de los Sitios 01, 02 y 03. Fuente: Preparado por los autores.

Parámetros	Unidades	Instrumento	Precisión	Imagen
Ta	oC	DeltaOHM_ HD32,3	1/3 DIN	
HR	%		±1,5% (0...90%RH) / ±2% (90...100%RH) @T=15...35°C (lectura de 1,5 + 1,5%) % @ T = rango restante	
Tg	oC		Clase 1/3 DIN	
Va	m/s		± 0,2 m/s (0,1÷1 m/s) ± 0,3 m/s (1÷5 m/s)	

Tabla 2. Parámetros e instrumentos utilizados en mediciones de campo. Fuente: Preparado por los autores.

El estudio se llevó a cabo en Tiruchirappalli (10,79°N), Tamil Nadu, India, una ciudad de nivel 2 de rápida urbanización caracterizada por una alta intensidad de radiación solar, humedad elevada y estrés térmico persistente en verano (Kaushik S. y Amraotkar, 2026; Pachauri y Kaushik S., 2025). Se seleccionaron tres tipologías representativas de estacionamiento para capturar la variación en los materiales de la superficie, las condiciones del techo, la presencia de vegetación y la orientación espacial. El sitio 01 (S01) comprende una configuración semicubierta con techo de metal galvanizado azul (SRI 24) y piso de adoquines (albedo 0.25). El sitio 02 (S02) incorpora techos de metal con revestimiento verde (SRI 31) y superficies mixtas de adoquines y PCC (albedo 0.25–0.30). El sitio 03 (S03) representa una tipología abierta, sombreada predominantemente por árboles maduros de neem (*Azadirachta indica*), sin techo artificial. Los diseños espaciales y las características seccionales se ilustran en la Figura 2, mientras que los atributos físicos detallados se presentan en la Tabla 1.

Las mediciones en terreno se realizaron el 28 de mayo de 2025, día que se identificó como el más caluroso de la región según los datos meteorológicos decenales. El día seleccionado se caracterizó por una alta intensidad de radiación solar, condiciones de cielo despejado predominantes y temperaturas ambientales elevadas, propias de la exposición extrema al calor del verano en Tiruchirappalli. Por lo tanto, la campaña de medición tenía como objetivo evaluar el estrés térmico a nivel de peatones en condiciones climáticas cálidas y húmedas máximas. Si bien el enfoque seleccionado de días extremos permite evaluar las condiciones de estrés térmico máximo relevantes para el diseño de estacionamientos sensibles al clima, investigaciones adicionales sobre varios días y varias estaciones mejorarían aún más la generalización a climas más amplios. Los datos se registraron durante tres períodos representativos de exposición peatonal: mañana (MAÑ), 9:45-10:45; tarde (TAR), 12:45-13:45; y noche (NOC), 16:45-17:45. En cada sitio, se establecieron tres puntos de medición para representar las zonas expuestas y sombreadas/cubiertas. Todas las mediciones se tomaron a 1,5 m sobre el nivel del suelo para reflejar la exposición térmica de los peatones. La TRM se calculó a partir de

las mediciones de temperatura global (Tg), siguiendo los procedimientos de la ISO 7726 para entornos térmicos al aire libre. Las mediciones se obtuvieron con un termómetro de globo negro estándar, con emisividad de 0,95 y un diámetro de 150 mm. El cálculo de MRT incorporó Tg, la temperatura del aire (Ta) y la velocidad del viento (Va) para considerar los efectos de la transferencia de calor por convección en condiciones exteriores (Ecuación 1). Los valores estimados de TRM están sujetos a incertidumbre asociada a la variabilidad en la medición de la temperatura global, la temperatura del aire y la velocidad del viento en condiciones de campo al aire libre. Todos los instrumentos se verificaron en terreno antes de las mediciones para garantizar la consistencia operativa en condiciones de verano al aire libre y cumplieran con la norma ISO 7726. Las especificaciones de medición, las unidades y los rangos de precisión se resumen en la Tabla 2.

$$MRT = \left((T_g + 273.15)^4 + \left(\frac{1.10 \times 10^8 \times V^{0.6}}{\epsilon \times D^{0.4}} \right) \times (T_g - T_a) \right)^{0.25} - 273.15$$

(Ecuación 1)

Donde:

Tg es la temperatura del globo (°C)

Ta es la temperatura del aire (°C)

Va es la velocidad del viento (m/s)

E es la emisividad del globo

D es el diámetro del globo (m).

Las simulaciones microclimáticas se realizaron utilizando ENVI-met v5.7.2, un modelo tridimensional no hidrostático capaz de resolver la transferencia radiativa, la dinámica del flujo de aire, los procesos de vegetación y las interacciones superficie-atmósfera a resolución microescala. El dominio computacional replicó la tipología de estacionamiento con una extensión horizontal de 24 m × 22 m. Se aplicó una resolución de cuadrícula de 2 m × 2 m en las direcciones horizontales, con una resolución vertical básica de 0,1 m para capturar gradientes cercanos al suelo relevantes para la comodidad de los peatones. Las simulaciones se realizaron en los mismos intervalos de tiempo que las observaciones de campo. Las variables de salida se extrajeron mediante la herramienta de posprocesamiento Leonardo.

Parámetro	Especificación
Software	ENVI-met v5.7.2
Fecha de simulación	28 de mayo de 2025
Resolución de cuadrícula	2 m (X), 2 m (Y), 0,1 m (Z)
Tamaño del dominio	24 m × 22 m
Métricas de evaluación	Ta; HR; Va; TRM; UTCI
Modelo de vegetación	Neem (Azadirachta indica); Altura: 9 m; Diámetro de la copa: 9 m; IAF: 3,5
Variables de diseño	Albedo: 0,2, 0,4, 0,6 SRI: 30, 60, 90 Cubierta vegetal: 0%, 20%, 40%, 60%
Períodos de simulación	Mañana (09:00-10:00); Tarde (13:00-14:00); Noche (16:00-17:00)
Iteraciones	32 escenarios de simulación

Tabla 3. Entradas y supuestos del modelo. Fuente: Preparado por los autores.

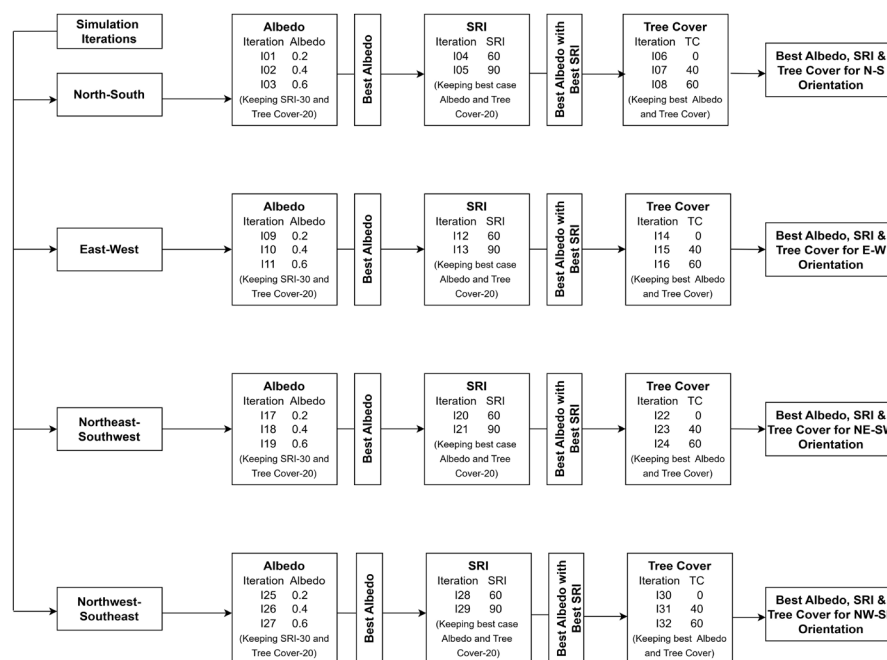


Figura 3. Iteraciones de diseño paramétrico. Fuente: Preparado por los autores.

Las simulaciones ENVI-met se iniciaron con las condiciones meteorológicas correspondientes al período de medición en terreno. La temperatura atmosférica inicial, la humedad relativa y las condiciones del viento se tomaron de observaciones de campo y de datos meteorológicos regionales del 28 de mayo de 2025. Las simulaciones se realizaron de forma continua durante 24 horas, desde las 22:00 del 27 de mayo de 2025 hasta las 22:00 del 28 de mayo de 2025, para estabilizar los procesos de intercambio de energía superficie-atmósfera antes del análisis diurno. La velocidad del viento a una altura de 10 m sobre el suelo se especificó en función de las condiciones medidas en el sitio, con una dirección predominante del viento de sur-suroeste. Se adoptaron condiciones de contorno de cielo despejado para representar el evento de calor extremo de verano

investigado en este estudio. Las entradas y suposiciones del modelo se resumen en la Tabla 3. ENVI-met resuelve el intercambio radiativo directo, difuso y reflejado mediante algoritmos integrados de transferencia radiativa. Este estudio se centró principalmente en las respuestas de TRM y UTCI, en lugar de en la descomposición de los componentes individuales del flujo radiativo. El dominio computacional se desarrolló para representar el microclima de estacionamiento inmediato y los elementos contextuales circundantes que influyen en las condiciones térmicas a nivel peatonal. Si bien el tamaño del dominio seleccionado permitió un análisis detallado a microescala con una demanda computacional manejable, los posibles efectos de borde asociados a los dominios de simulación localizados se reconocen como una limitación del estudio.

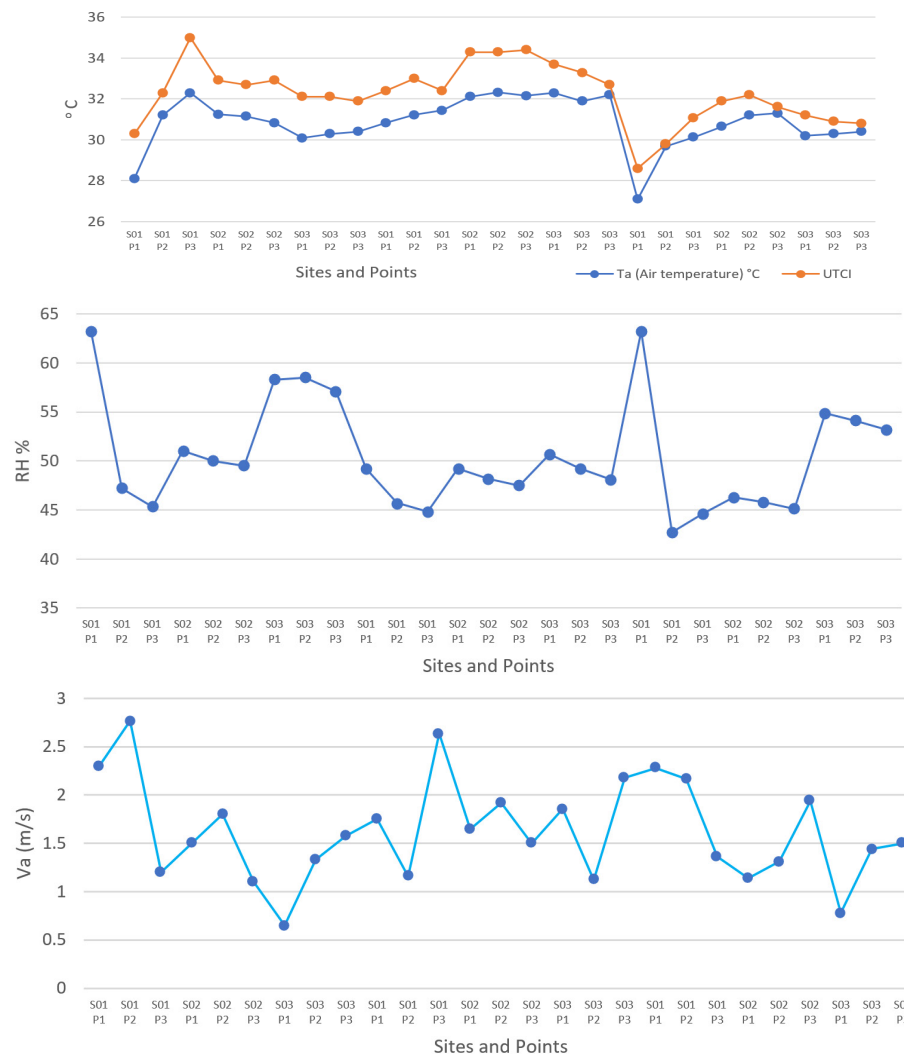


Figura 4. Datos de medición de campo de las series temporales de Ta, UTCL, HR y Va para S01, S02 y S03. Fuente: Preparado por los autores.

La validación del modelo se realizó comparando directamente los valores simulados y los medidos en idénticas condiciones espaciales y temporales. La confiabilidad predictiva se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE, en inglés), error absoluto medio (MAE, en inglés) y error de sesgo medio (MBE, en inglés). Estos indicadores cuantifican la fuerza explicativa, la precisión de la dispersión y la desviación sistemática. Las estadísticas de validación se presentan en la Tabla 4. El fuerte acuerdo entre la Ta medida y la simulada y la TRM confirmó la idoneidad del modelo ENVI-met para la evaluación paramétrica posterior.

Luego de la validación, se desarrolló una matriz paramétrica estructurada para evaluar la influencia combinada del albedo de la superficie, el IRS del techo, la cobertura vegetal y la orientación espacial. Los valores de albedo superficial de 0,2, 0,4 y 0,6 representaron pavimentos de baja, media y alta reflectividad. Los valores del IRS del techo de 30, 60 y 90 simulaban niveles variables de rendimiento reflectante. Los

escenarios de vegetación modelaron Azadirachta indica con una altura de 9 m, un diámetro de copa de 9 m y un índice de área foliar (IAF) de 3,5 para representar las condiciones maduras de la copa de los árboles. La cobertura vegetal varió entre 0%, 20%, 40% y 60% a lo largo del perímetro del sitio para evaluar los efectos del sombreado y de la evapotranspiración.

La evaluación paramétrica siguió un enfoque matricial escalonado. Para cada orientación, norte-sur, este-oeste, noreste-suroeste y noroeste-sureste, se modeló primero una configuración de base que reflejaba la práctica local prevalente (albedo 0,2, SRI 30, 20% de vegetación). Posteriormente, se varió el albedo, manteniendo constantes el IRS y la vegetación, para determinar la reflectividad superficial óptima. Utilizando el valor de albedo identificado, se varió el IRS del techo y, posteriormente, se realizaron modificaciones sistemáticas en la cubierta vegetal. Este enfoque estructurado resultó en ocho iteraciones por orientación, produciendo un total de treinta y dos escenarios de simulación (I01-I32). Este diseño

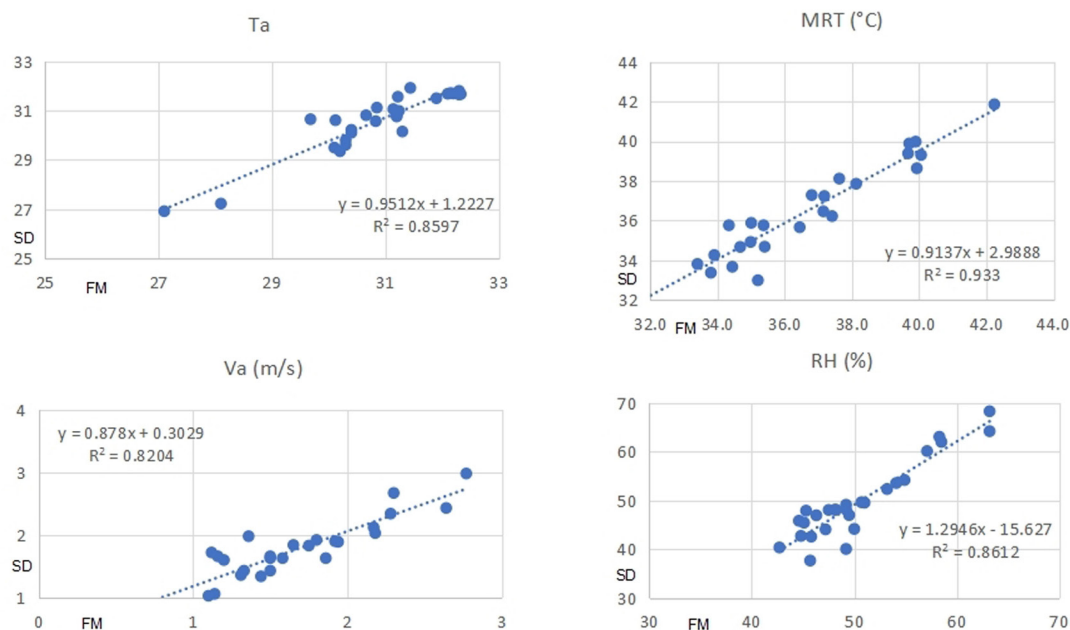


Figura 5. Validación de los datos de medición de campo (FM) y de simulación (SD). Fuente: Preparado por los autores.

Variable	R^2	RMSE	MAE	MBE
T_a	0,795	0,55 $^{\circ}\text{C}$	0,48 $^{\circ}\text{C}$	-0,28 $^{\circ}\text{C}$
HR	0,624	3,37 %	2,42 %	-0,76 %
V_a	0,776	0,25 m/s	0,18 m/s	+0,10 m/s
MRT	0,931	0,77 $^{\circ}\text{C}$	0,59 $^{\circ}\text{C}$	-0,13 $^{\circ}\text{C}$

Tabla 4. Estadísticas de validación que comparan variables medidas en terreno y de simulación. Fuente: Preparado por los autores.

basado en matrices permitió evaluar tanto los efectos de los parámetros individuales como sus interacciones bajo diferentes alineaciones solares (Figura 3). El rendimiento térmico en todos los escenarios se evaluó principalmente mediante el UTCI, con apoyo de los análisis de T_a y de TRM. El marco comparativo permitió identificar configuraciones optimizadas para reducir el estrés térmico de los peatones en entornos de estacionamiento tropicales.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

ANÁLISIS DE MEDICIÓN DE CAMPO

Las mediciones en terreno evidenciaron una variación diurna pronunciada en las tres tipologías de estacionamiento (Figura 4). Todos los sitios registraron una escalada térmica progresiva de la mañana a la tarde, con un pico de estrés entre las 12:45 y las 13:45, seguido de una recuperación parcial por la noche. Sin embargo, la magnitud y la persistencia del

estrés térmico variaron sistemáticamente en función de las características de la superficie, la configuración del techo y la presencia de vegetación.

Los sitios S01 y S02, ambos con techos de láminas metálicas con IRS de 24 y 31, de bajo a moderado, registraron TRM y UTCI elevados durante las horas pico. A pesar de la sombra parcial, los valores de UTCI de la tarde superaron los 33-34 $^{\circ}\text{C}$ en áreas semicubiertas y fueron más altos en las zonas expuestas del camino de entrada. El efecto combinado del pavimento de bajo albedo y la radiación de los techos metálicos calentados intensificó la carga radiante. Las velocidades del viento bajo los cobertizos se redujeron, lo que limitó la disipación convectiva y amplificó aún más la acumulación térmica.

Por el contrario, el sitio S03, completamente sombreado por una copa de neem maduro y sin techo artificial, mostró una TRM consistentemente más baja durante las horas pico, a pesar de una temperatura del aire comparable. Por otro lado, el Sitio S03, completamente sombreado por una copa de neem maduro y sin techo artificial, mostró una TRM

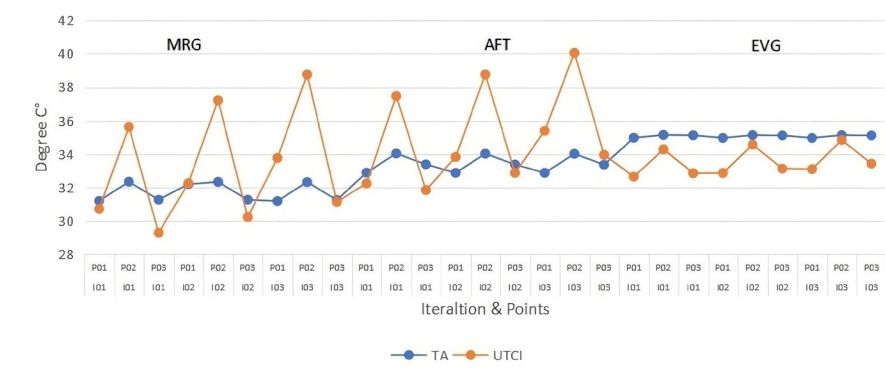


Figura 6. Datos de series temporales de Ta y UTCI para I01, I02, I03. Fuente: Preparado por los autores.

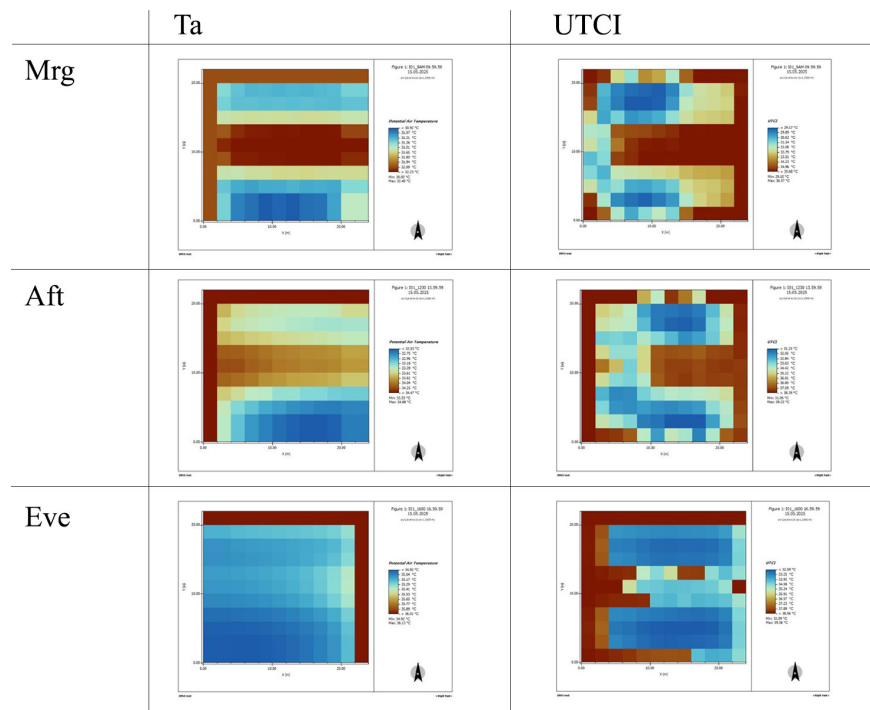


Figura 7. Mapa Ta y UTCI de I01. Fuente: Preparado por los autores utilizando Envi-met v5.7. 2.

consistentemente más baja durante las horas pico, a pesar de una temperatura del aire comparable. Además, el S03 mostró una recuperación nocturna más rápida, lo que indica un menor almacenamiento térmico y una estabilización microclimática mejorada por la evapotranspiración. Estas observaciones en terreno establecen la TRM como el diferenciador dominante entre las tipologías y proporcionan una base empírica para el análisis posterior basado en simulaciones.

ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

El análisis de correlación de Pearson confirma el papel dominante de la exposición radiativa. La Ta ($r = 0.894$, $p < 0.001$) y la TRM ($r = 0.668$, $p < 0.001$) mostraron fuertes asociaciones positivas con el UTCI, mientras que la velocidad del viento mostró una correlación débil y no estadísticamente significativa. Los hallazgos refuerzan la conclusión de que

en entornos de estacionamiento cálidos y húmedos, el intercambio de calor radiante ejerce una mayor influencia sobre el estrés de los peatones que los mecanismos convectivos.

VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo se realizó comparando los parámetros simulados con los medidos en campo y con ENVI-met, en condiciones temporales y espaciales idénticas (Figura 5). Los resultados de la validación demuestran una concordancia aceptable ($R^2 = 0,931$; $RMSE = 0,77$ °C) entre los parámetros térmicos medidos y simulados en las condiciones climáticas investigadas, lo que indica que el modelo ENVI-met es adecuado para la evaluación paramétrica comparativa de los microclimas de estacionamiento (Tabla 4). La Ta también

mostró un rendimiento robusto ($R^2 = 0,795$; $RMSE = 0,55\text{ }^{\circ}\text{C}$). La velocidad del viento logró correlación satisfactoria ($R^2 = 0,776$), mientras que la humedad relativa presentó concordancia moderada, pero aceptable ($R^2 = 0,624$). Los valores medios de error de sesgo para T_a y TRM se mantuvieron dentro de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que indica una desviación sistemática mínima. En general, las estadísticas de validación confirman que el marco ENVI-met captura de manera confiable la dinámica microclimática y resulta adecuado para la evaluación paramétrica del confort térmico al aire libre en tipologías de estacionamiento.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN PARAMÉTRICA

Orientación norte-sur

Bajo la alineación norte-sur, las simulaciones revelan una sensibilidad distinta a la densidad de la vegetación, con respuestas comparativamente limitadas a las variaciones en el albedo y IRS (Figura 6). A lo largo de las iteraciones, el UTCI alcanzó su punto máximo en el punto del camino de entrada expuesto (P2), confirmando la exposición solar directa como el principal impulsor del estrés. La recuperación vespertina permaneció incompleta en escenarios de vegetación baja (Figura 7).

El aumento del albedo superficial de 0,2 a 0,6 no se tradujo en reducciones proporcionales del UTCI. En las zonas expuestas, el albedo más alto incrementó marginalmente el pico de UTCI, lo que indica una mayor reflexión de onda corta y una TRM elevada. De manera similar, aumentar el IRS del techo de 30 a 90 produjo una mejora insignificante a nivel de los peatones, lo que sugiere que las ganancias reflectantes se compensaron con la redistribución radiativa.

Por el contrario, la vegetación ejerció una mitigación sustancial. Como se muestra en la Figura 8, aumentar la cobertura de la

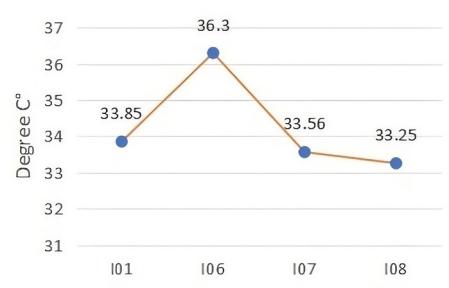


Figura 8. Promedio de UTCI a lo largo del tiempo para I01, I06, I07 y I08. Fuente: Preparado por los autores.

copa del 0% al 60% redujo de forma consistente el UTCI promedio en todos los períodos de tiempo, con la mayor reducción durante el pico de la tarde. El sombreado redujo significativamente la TRM y limitó la acumulación de calor. Bajo esta orientación, la vegetación dominó claramente sobre la reflectividad del material como principal determinante del confort térmico.

Orientación este-oeste

La configuración este-oeste registró los valores máximos de UTCI entre las orientaciones (Figura 9). La escalada de la tarde fue más pronunciada que en la alineación norte-sur, lo que refleja una exposición solar prolongada a lo largo del eje del estacionamiento. Los ajustes de albedo e IRS produjeron una mitigación mínima en esta configuración. La orientación intensificó tanto la radiación directa como la reflejada, lo que redujo la efectividad de las estrategias basadas en la reflectividad. Aunque la vegetación contribuyó a un enfriamiento medible, su impacto fue moderado por la incidencia solar sostenida durante las horas pico. La alineación este-oeste, por lo tanto, mostró la mayor susceptibilidad a la acumulación térmica del mediodía, en particular en las zonas expuestas.

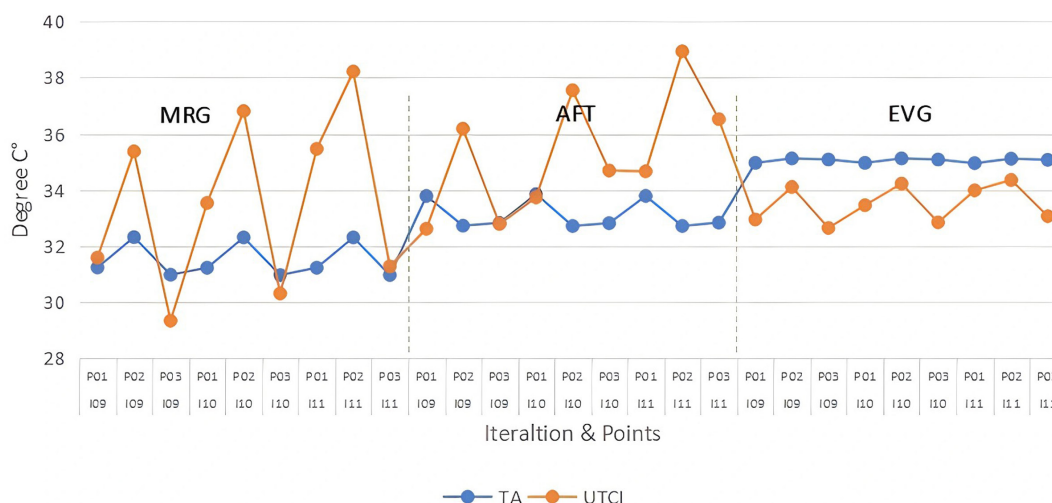


Figura 9. Datos de series temporales para T_a y UTCI para I09, I10 e I11. Fuente: Preparado por los autores.

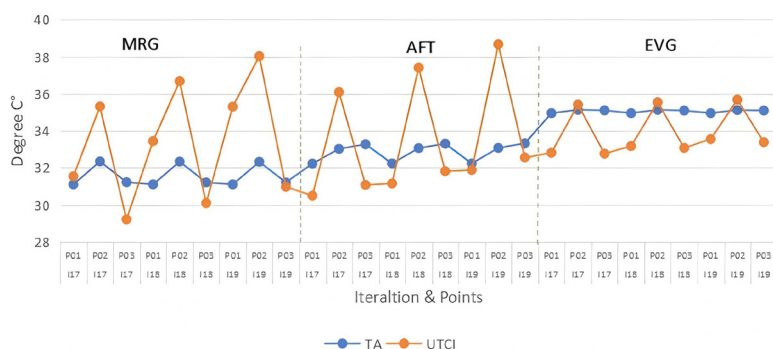


Figura 10. Datos de series temporales para Ta y UTCI para I17, I18 e I19. Fuente: Preparado por los autores.

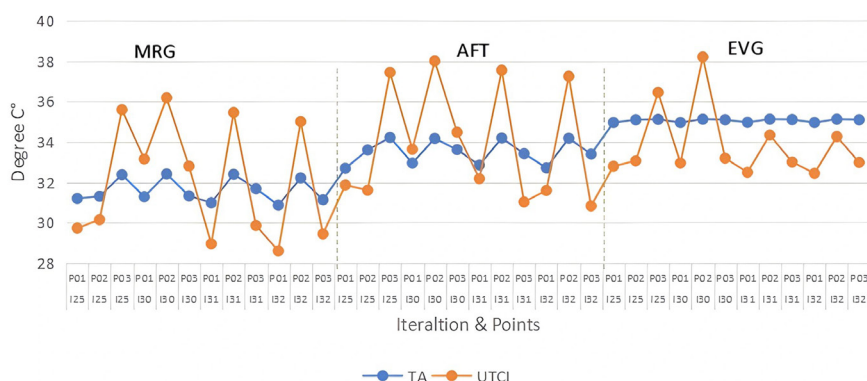


Figura 11. Datos de series temporales para Ta y UTCI para I25, I30, I31 e I32. Fuente: Preparado por los autores.

Orientación noreste-suroeste

La orientación noreste-suroeste (NE-SO) mostró una variación diurna moderada respecto de la alineación este-oeste (Figura 10). El pico de UTCI en P2 permaneció más bajo que bajo la configuración ortogonal este-oeste, lo que indica una menor duración de la incidencia solar directa.

Como en otras orientaciones, los ajustes de albedo e IRS produjeron cambios limitados en el UTCI a nivel peatonal. Sin embargo, la vegetación redujo de manera constante los valores máximos, especialmente en las zonas semiexpuestas. La alineación solar oblicua redujo la acumulación de radiación y, al combinarse con la sombra de la copa, produjo condiciones de la tarde más equilibradas. Esta orientación presentó un estrés máximo moderado y una recuperación nocturna comparable.

Orientación noroeste-sureste

La orientación noroeste-sureste (NO-SE) presentó el pico de UTCI más bajo entre las alineaciones probadas (Figura 11). La trayectoria solar angular redujo la exposición directa prolongada en P2, limitando el aumento de la TRM durante las horas pico. Las modificaciones materiales nuevamente produjeron diferencias marginales. Sin embargo, la integración de la vegetación se tradujo en una reducción sustancial del UTCI promedio (Figura 12). El escenario de la copa del 60% exhibió la tensión máxima más baja en todas

las orientaciones. El sombreado redujo la carga radiativa y mejoró la estabilidad microclimática tanto en las zonas cubiertas como en las semiexpuestas. Esta orientación, cuando se combinó con una alta densidad de vegetación, exhibió el desempeño térmico más favorable.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ORIENTACIÓN CRUZADA

El análisis comparativo revela diferencias sistemáticas en la respuesta térmica máxima (Figura 13). Aunque las diferentes configuraciones de estacionamiento produjeron reducciones medibles en el UTCI, la mayoría de los escenarios permanecieron dentro de la categoría calibrada de estrés térmico moderado. En consecuencia, los resultados se interpretan en términos de mejora térmica relativa en lugar de una transición térmica categórica. La alineación este-oeste produjo el UTCI de la tarde más alto, mientras que la alineación NO-SE alcanzó consistentemente los valores máximos más bajos en condiciones de vegetación equivalentes. Las orientaciones norte-sur y NE-SO mostraron un desempeño intermedio.

Las condiciones matutinas fueron similares en todas las orientaciones, lo que indica que la alineación influye principalmente en la acumulación radiativa del mediodía en lugar del estado térmico inicial. Las diferencias se intensificaron durante la intensidad solar máxima, cuando la orientación geométrica gobernaba directamente la

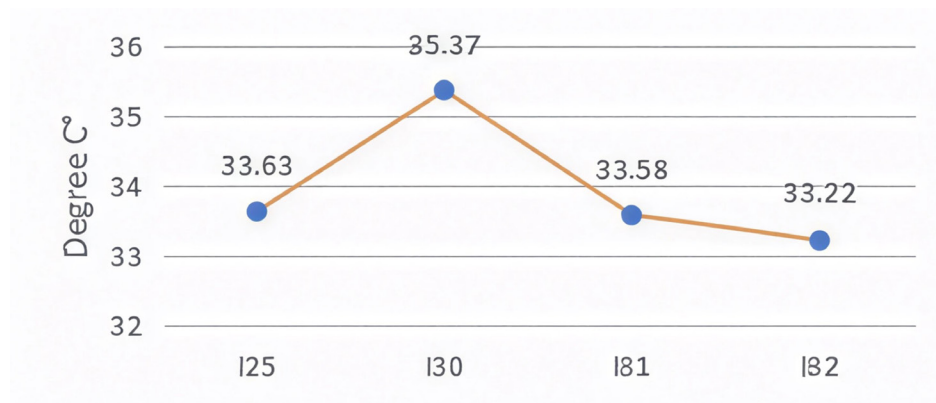


Figura 12. Promedio de UTCI para I25, I30, I31 e I32. Fuente: Preparado por los autores.

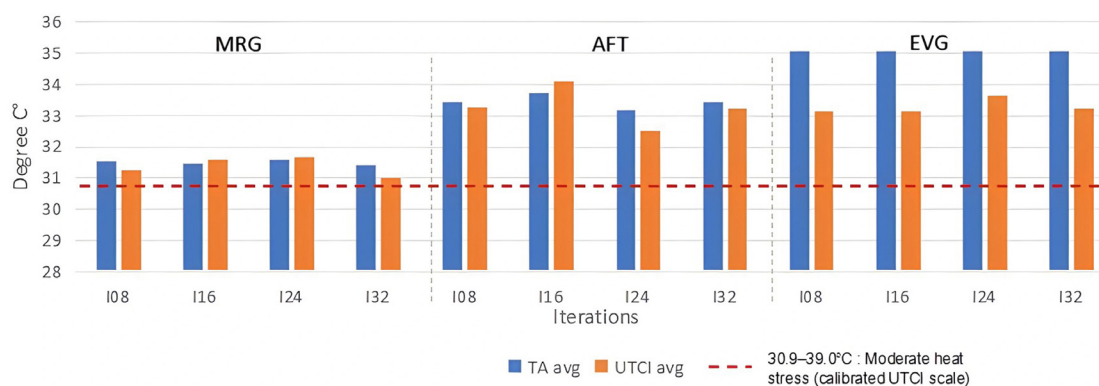


Figura 13. Comparación de series temporales de Ta y UTCI para las iteraciones de mejor rendimiento (I08, I16, I24, I32) . Fuente: Preparado por los autores.

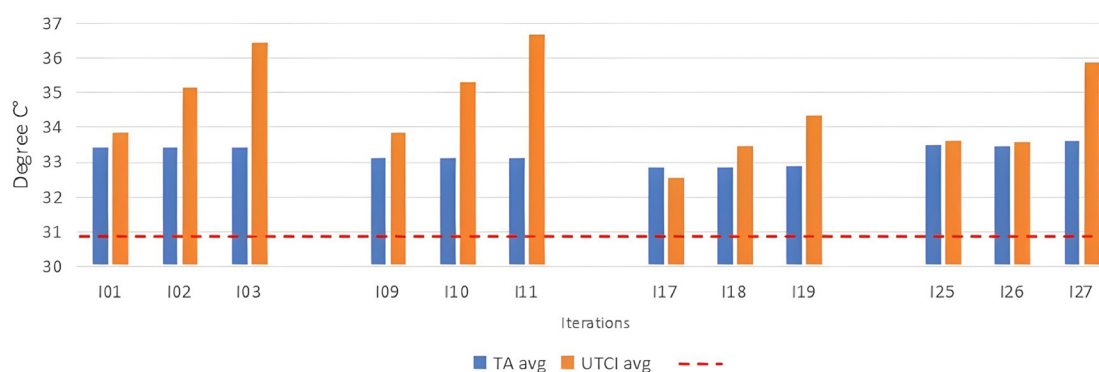


Figura 14. Comparación por la tarde de Ta y UTCI a través de iteraciones con valores variables de albedo superficial. Fuente: Preparado por los autores.

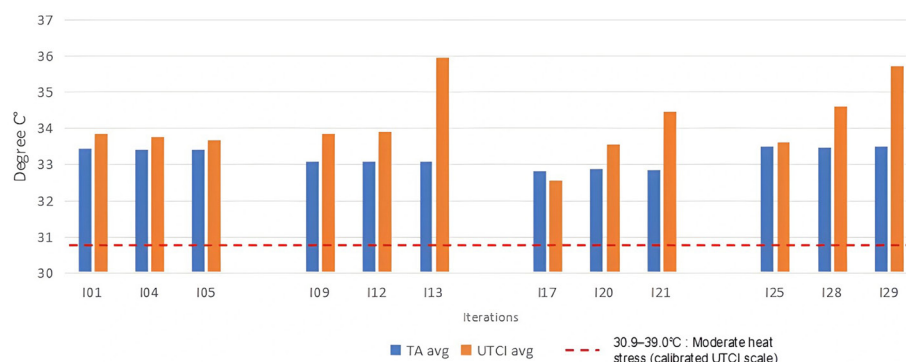


Figura 15. Comparación por la tarde de Ta y UTCI en iteraciones con valores variables de IRS de techo. Fuente: Preparado por los autores.

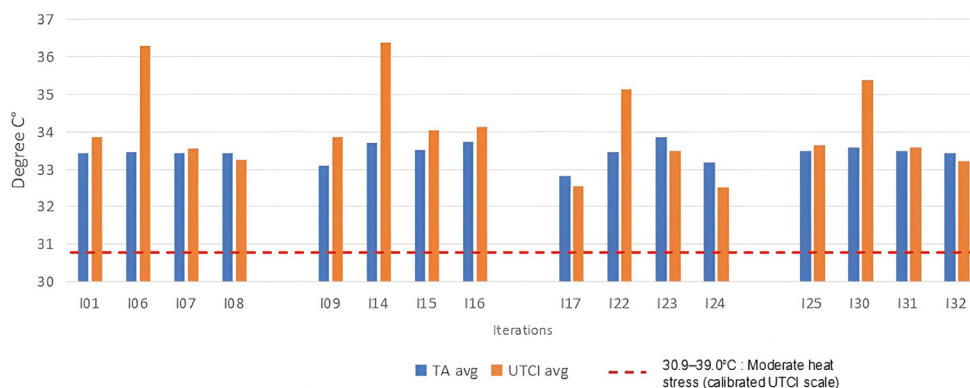


Figura 16. Comparación por la tarde de Ta y UTCI a través de iteraciones con cobertura arbórea variable. Fuente: Preparado por los autores.

duración y el ángulo de la radiación incidente en las superficies expuestas.

Las alineaciones diagonales, particularmente NO-SE, redujeron la acumulación de picos de manera más efectiva que las configuraciones ortogonales este-oeste, lo que demuestra la interacción entre la geometría solar y la exposición de la superficie.

EFFECTOS ESPECÍFICOS DE PARÁMETROS

Albedo de superficie

La comparación de la tarde indica que aumentar el albedo de 0,2 a 0,6 no redujo consistentemente el UTCI (Figura 14). En las zonas expuestas, la mayor reflectividad elevó marginalmente el UTCI debido al aumento de la reflexión de onda corta y de TRM. Los efectos se amplificaron en orientaciones ortogonales con incidencia solar sostenida.

Índice de reflectancia solar del techo (SRI)

El aumento de IRS de 30 a 90 produjo un enfriamiento limitado a nivel peatonal (Figura 15). Aunque las superficies del techo experimentaron un calentamiento reducido, la radiación

reflejada bajo las áreas semicubiertas redistribuyó la energía radiante hacia los ocupantes, limitando el beneficio general.

Cubierta vegetal

La vegetación demostró el efecto de mitigación más fuerte (Figura 16). El aumento de la copa del 0% al 60% redujo consistentemente el UTCI en todas las orientaciones, con reducciones máximas durante el estrés de la tarde. El sombreado disminuyó significativamente la TRM y suprimió la acumulación radiante, lo que establece la vegetación como el parámetro dominante que influye en el confort térmico.

EFFECTOS DE INTERACCIÓN ENTRE ORIENTACIÓN, VEGETACIÓN Y MATERIALES REFLECTANTES

Los resultados muestran que la respuesta térmica del albedo superficial y del IRS del techo no es uniforme en todo el dominio de estudio, pero está fuertemente moderada por la orientación y la densidad de la vegetación. En condiciones de baja vegetación, los aumentos del albedo produjeron respuestas UTCI limitadas o adversas, ya que la radiación de onda corta reflejada aumentó la carga radiante a nivel de los peatones. Por el contrario, cuando

Condición urbana	Prioridad de diseño principal	Implicación térmica esperada
Vegetación factible	60% cubierta de copa + orientación NO-SE	Estrés térmico peatonal más bajo
Vegetación parcialmente factible	Copa moderada + albedo bajo + SRI moderado	Mitigación equilibrada con TRM reducida
Vegetación no factible	Optimización de la orientación + reflectividad controlada	La orientación se convierte en la estrategia pasiva dominante
Contexto de modernización	Sombreado primero, reflectividad en segundo lugar	Evitar depender únicamente de materiales reflectantes
Contexto limitado por el presupuesto	Orientación y sombreado selectivo	Mayor beneficio que las actualizaciones solo de material

Tabla 5. Jerarquía de diseño para entornos de estacionamiento bajo diferentes restricciones urbanas. Fuente: Preparado por los autores.

aumentó la cobertura vegetal, el impacto negativo de la radiación reflejada se redujo debido a la sombra y a una TRM menor. La orientación también modificó la magnitud de estas respuestas: la alineación este-oeste amplificó la acumulación radiativa de la tarde, mientras que la alineación NO-SE moderó la exposición máxima. Estos hallazgos indican que el rendimiento térmico del estacionamiento se debe a la interacción entre los materiales radiativos, la configuración de la copa y la geometría solar, en lugar de una sola variable de diseño aislada.

La Tabla 5 representa una contribución clave de este estudio al traducir el análisis paramétrico validado en terreno en una jerarquía de diseño operacional para entornos de estacionamiento en climas cálidos y húmedos. El marco demuestra que la efectividad térmica de las estrategias de mitigación no es universal, sino que depende en gran medida de la interacción de la disponibilidad de vegetación, la orientación y las propiedades reflectantes de la superficie. Si bien la vegetación mostró de manera consistente la mayor reducción de la exposición al calor de los peatones, los resultados revelan que la orientación se convierte en el determinante pasivo dominante del diseño cuando la integración de la copa está restringida. Además, los beneficios limitados y dependientes del contexto de los pavimentos de alto albedo y los techos reflectantes sugieren que las intervenciones basadas en materiales deben implementarse junto con estrategias de diseño espacial y paisajístico, en lugar de sustituirlas. En consecuencia, el marco propuesto va más allá de la evaluación aislada de parámetros y proporciona una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que vincula el desempeño microclimático con restricciones realistas de diseño urbano, facilitando así decisiones de planificación y modernización más efectivas que respondan al clima.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un análisis estadístico sobre el conjunto de datos completo ($n = 288$) para cuantificar la relación entre los parámetros ambientales y el confort térmico exterior. El análisis de correlación de Pearson reveló una fuerte asociación positiva entre TRM y UTCI ($r = 0,653$, $p < 0,001$), lo que confirma el papel dominante del intercambio de calor

radiativo en la influencia del estrés térmico peatonal. La Ta demostró una correlación positiva moderada ($r = 0,358$, $p < 0,001$), mientras que la humedad relativa mostró una correlación negativa ($r = -0,432$, $p < 0,001$), lo que indica una moderación parcial del UTCI en condiciones simuladas. La velocidad del viento mostró una correlación débil y estadísticamente insignificante, lo que sugiere una influencia convectiva limitada en la configuración de estacionamiento.

Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para predecir el UTCI en función de la temperatura del aire, la TRM, la humedad relativa y la velocidad del viento. El modelo de regresión demostró una fuerte capacidad explicativa dentro del conjunto de datos investigado ($R^2 = 0,87$, $p < 0,001$) y se utilizó para evaluar la influencia relativa de las variables ambientales en UTCI bajo las condiciones climáticas investigadas. La relación predictiva derivada (Ecuación 2) se expresa como:

$$\text{UTCI} = -2,658 + 0,841(T_a) + 0,229(\text{TRM}) - 0,003(\text{HR}) - 0,614(\text{Viento})$$

(Ecuación 2)

Los coeficientes de regresión estandarizados indican que la TRM ejerce la mayor influencia sobre el UTCI entre las variables ambientales evaluadas, lo que confirma la exposición radiativa como el principal contribuyente al estrés térmico peatonal. Los resultados indican, además, que la cubierta vegetal y la orientación influyen principalmente en el confort al aire libre al modular la TRM y la exposición solar. El factor de inflación de varianza ($\text{VIF} < 5$) indica la ausencia de multicolinealidad. Estos resultados refuerzan la carga radiativa como el mecanismo gobernante del estrés térmico.

RÁNKING DE OPTIMIZACIÓN

La evaluación de las treinta y dos iteraciones evidencia una clara estratificación del desempeño (Figura 17). La alta densidad de vegetación se asoció de manera consistente con un UTCI medio más bajo en todas las orientaciones. La iteración I32 (NO-SE; albedo 0,2; IRS 30; 60% de vegetación) logró el UTCI medio más bajo ($32,49^\circ\text{C}$), lo que refleja la interacción sinérgica entre el sombreado de la copa y la alineación solar favorable. Por el contrario, la

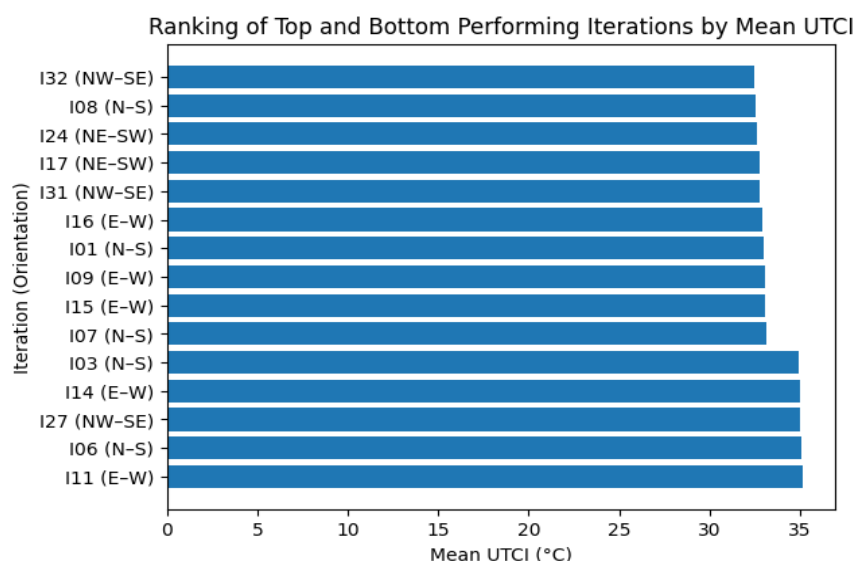


Figura 17. Iteraciones de realización superior e inferior basadas en UTCI medio. Fuente: Preparado por los autores.

vegetación mínima bajo la alineación este-oeste (I11) registró el UTCI medio más alto (35,16 °C). El patrón de clasificación identifica inequívocamente la integración y la orientación de la vegetación como determinantes dominantes del rendimiento térmico, mientras que los ajustes de reflectividad, por sí solos, produjeron una mejora limitada.

DISCUSIÓN

Los hallazgos confirman que la TRM es el principal impulsor del confort térmico al aire libre en entornos de estacionamiento, de acuerdo con estudios que enfatizan la primacía del intercambio radiativo en el estrés térmico de los peatones (Taleghani, 2018). El aumento del albedo de la superficie no mejoró de manera consistente el confort, ya que una mayor reflectividad aumentó la exposición radiante de los peatones, un fenómeno previamente reportado en el que un aumento del albedo de 0,2 a 0,6 elevó los índices de TRM y el estrés térmico (Ghoniem et al., 2025). Aunque los pavimentos reflectantes reducen las temperaturas superficiales, su efectividad depende del sombreado y el contexto espacial (Taleghani, 2018).

De manera similar, los valores más altos de IRS en el techo produjeron un enfriamiento limitado a escala peatonal. Si bien los materiales fríos pueden reducir las temperaturas superficiales y mitigar la ICU (Jandaghian et al., 2025), su impacto en el confort depende de la geometría circundante y de las condiciones de exposición. En tipologías de estacionamientos semicubiertos, la radiación reflejada puede redistribuir la carga térmica en lugar de eliminarla.

La vegetación demostró el efecto de enfriamiento más sustancial, corroborando la evidencia de que la sombra de

los árboles reduce el estrés térmico de manera más efectiva que la modificación del albedo (Zhang et al., 2025). Las reducciones observadas con una mayor cobertura de la copa se alinean con el enfriamiento documentado mediante el sombreado y la evapotranspiración (He y Reith, 2023). La influencia de la densidad y estructura de la vegetación en el confort de los peatones respalda aún más estos hallazgos (Pattnaik et al., 2025).

La orientación dio forma a la magnitud y al momento del estrés térmico, con una alineación este-oeste que intensifica la exposición en la tarde, de acuerdo con la investigación que vincula la morfología urbana y la penetración solar con el confort de los peatones (Rachidi et al., 2026). Por lo tanto, las estrategias integradas que combinan vegetación, materiales reflectantes y una planificación sensible a la orientación constituyen la vía más efectiva para mejorar el confort térmico en entornos de estacionamiento cálidos y húmedos.

Al usar la escala UTCI calibrada, los entornos de estacionamiento investigados presentaron predominantemente condiciones de estrés térmico moderado. Dentro de este rango, el aumento de la cobertura vegetal y la orientación favorable redujeron la exposición térmica de los peatones de manera más efectiva que las modificaciones a los materiales reflectantes solos, al limitar la exposición solar directa y reducir la TRM. El análisis de regresión y las comparaciones paramétricas indican, además, que la influencia térmica del albedo, la reflectividad del techo, la vegetación y la orientación están fuertemente interconectadas a través de su impacto conjunto sobre las condiciones radiativas de los peatones.

Más allá de reafirmar los beneficios refrescantes de la vegetación, este estudio revela que la efectividad térmica de los materiales reflectantes depende en gran medida de

la orientación y el contexto de la copa. Si bien un mayor albedo y un IRS en el techo redujeron la absorción de calor en la superficie, no mejoraron consistentemente el confort térmico de los peatones debido al aumento de la exposición radiativa. En condiciones de vegetación restringida, la orientación surgió como un determinante más influyente del confort térmico que la reflectividad del material. Estos hallazgos subrayan la necesidad de estrategias integradas de mitigación y establecen una jerarquía de intervenciones de diseño para entornos de estacionamiento en climas cálidos y húmedos.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO E INVESTIGACIONES FUTURAS

Este estudio fue diseñado para evaluar el desempeño térmico del estacionamiento en condiciones representativas de verano pico en un clima cálido-húmedo. En consecuencia, la validación del modelo se centró en un día extremo de verano, por lo que es posible que no capture completamente la variabilidad estacional. Además, se estimó la TRM utilizando la formulación de temperatura global ISO 7726, y se evaluó el confort térmico utilizando UTCI como índice de evaluación primario. Si bien estas opciones metodológicas no afectan la evaluación comparativa de los escenarios de diseño investigados, los estudios futuros deberían incorporar observaciones multiestacionales, análisis de la incertidumbre de los parámetros térmicos derivados, índices de confort alternativos y encuestas de percepción térmica basadas en los ocupantes para mejorar aún más la generalización de los hallazgos.

CONCLUSIÓN

Este estudio investigó la influencia combinada del albedo de la superficie, el IRS del techo, la cubierta vegetal y la orientación sobre el confort térmico a nivel peatonal en entornos de estacionamiento cálidos y húmedos. A través de mediciones en terreno y simulaciones validadas en ENVI-met, los resultados demuestran que la TRM es el determinante dominante del estrés térmico exterior, superando las modificaciones aisladas de la temperatura del aire.

Las estrategias basadas en la reflectividad, por sí solas, resultaron insuficientes. El aumento del albedo de la superficie y el IRS del techo redujeron la absorción de calor del material, pero no redujeron consistentemente el UTCI debido a la radiación reflejada y los efectos de redistribución radiativa. En contraste, la vegetación surgió como la estrategia de mitigación más efectiva. El aumento de la cobertura de la copa al 60% redujo consistentemente el estrés térmico máximo en todas las orientaciones al reducir la TRM a través del sombreado y la evapotranspiración.

La orientación mediaba aun más la acumulación térmica: la alineación este-oeste intensificaba la exposición por la

tarde, mientras que la configuración NO-SE moderaba el estrés máximo. El desempeño óptimo se logró mediante la integración combinada de albedo bajo (0,2), SRI moderado (30), cobertura vegetal del 60% y alineación diagonal. Estos hallazgos subrayan que el diseño de estacionamientos que responda al clima de las ciudades tropicales debe priorizar el manejo radiativo mediante la integración de la copa y una planificación sensible a la orientación, en lugar de depender únicamente de materiales reflectantes. Si bien los hallazgos brindan información importante sobre el confort térmico en las condiciones pico de verano, estudios futuros que incorporen períodos de monitoreo prolongados y evaluaciones de la percepción térmica basadas en los ocupantes fortalecerían aún más la generalización a condiciones climáticas más amplias.

Más allá de confirmar los beneficios térmicos de la vegetación, este estudio establece una jerarquía validada en el campo de estrategias de mitigación para entornos de estacionamiento en climas cálidos y húmedos. Los resultados demuestran que la efectividad térmica de los materiales reflectantes no es universal, sino que depende de la orientación y el contexto de la vegetación. Esto proporciona un marco de apoyo para la toma de decisiones en el diseño de estacionamientos sensibles al clima, particularmente en entornos urbanos donde no es posible introducir vegetación extensa.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRedit

Conceptualización: A.S.K.S., P.G.; Curación de Datos: A.S.K.S.; Análisis Formal: A.S.K.S., P.G.; Adquisición de Financiación: P.G., G.S.; Investigación: A.S.K.S.; Metodología: A.S.K.S., P.G.; Administración del Proyecto: P.G., G.S.; Recursos: P.G., G.S.; Software: A.S.K.S.; Supervisión: P.G., G.S.; Validación: A.S.K.S., P.G., G.S.; Visualización: A.S.K.S.; Escritura – Borrador Original: A.S.K.S.; Escritura – Revisión y Edición: P.G., G.S.; Escritura – Revisión y Edición: ASKS, P.G., G.S.

AGRADECIMIENTOS

Los autores declaran que no se recibió financiamiento para esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelwahab, R. A., Fekry, A. A., & Hamed, R.E.-D. (2025). The effective landscape design parameters with high reflective hardscapes: guidelines for optimizing human thermal comfort in outdoor spaces by design -a case on hot arid climate weather. *Computational Urban Science*, 5,28. <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00186-w>

Austin, D., Solano, T., & Chen Austin, M. (2025). Synergistic Effects of Bioclimatic Strategies on Microclimate Improvement: A Numerical–

- Experimental Study at University Campus Scale. *Sustainability*, 17(19), 8867. <https://doi.org/10.3390/su17198867>
- Calhoun, Z.D., Willard, F., Ge, C., Rodriguez, C., Bergin, M., & Carlson, D. (2024). Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Scientific Reports*, 14, 540. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w>
- Chen, W.-A., Fang, P.-L., & Hwang, R.-L. (2025). Calibrating the UTCI scale for hot and humid climates through comprehensive year-round field surveys to improve the adaptability. *Urban Climate*, 59, 102267. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102267>
- Deepthi, S., Sudalaimani, K., Radhakrishnan, S. P., & Radhakrishnan, S. (2024). Evaluating urban heat island to achieve sustainable development goals: A case study of Tiruchirappalli city, India. *Sustainable Cities and Society*, 116, 105865. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105865>
- Ghenai, C., Rejeb, O., Sinclair, T., Almarzouqi, N., Alhanaee, N., & Rossi, F. (2023). Evaluation and thermal performance of cool pavement under desert weather conditions: Surface albedo enhancement and carbon emissions offset. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01940. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01940>
- Ghoniem, M., Fahmy, A., & Kamel, T. M. (2025). Evaluating urban surface materials: Albedo optimization and shading for pedestrian thermal comfort in hot-arid environments. *Civil Engineering and Architecture*, 13(6), 4331–4352. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130616>
- Gidey, E., & Mhangara, P. (2025). Improving spatial modeling framework to assess the impact of vegetation cover, water content, and surface temperature on urban heat island effects in Johannesburg, South Africa. *Discover Environment*, 3(1), 74. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00264-0>
- He, Q., & Reith, A. (2023). A study on the impact of green infrastructure on microclimate and thermal comfort. *Pollack Periodica*, 18(1), 42–48. <https://doi.org/10.1556/606.2022.00668>
- Huang, C., Liu, K., Ma, T., Xue, H., Wang, P., & Li, L. (2025). Analysis of the impact mechanisms and driving factors of urban spatial morphology on urban heat islands. *Scientific Reports*, 15, 18589. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04025-0>
- Jandaghian, Z., Lacasse, M., & Gaur, A. (2025). Solar Reflectance Index of Building Envelope Materials: A Comparative Review of North American and European Standards and Long-Term Performance. *Buildings*, 15(6), 888. <https://doi.org/10.3390/buildings15060888>
- Kafy, A. A., Alsulamy, S., & Alsaleh, A. M. (2026). Escalating heat hazard risk in arid urban environments: A two-decade assessment of thermal stress patterns and health risks using UTCI and WBGT indices in Riyadh, Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 122, 156. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07930-9>
- Kaushik S., A. S., & Amraotkar, S. (2026). Analyzing the effects of orientation, window size and position on solar heat gain for four Indian cities. *Science, Engineering and Health Studies*, 20, 26040001. <https://doi.org/10.69598/sehs.20.26040001>
- Lin, P., Song, D., & Qin, H. (2021). Impact of parking and greening design strategies on summertime outdoor thermal condition in old mid-rise residential estates. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63, 127200. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127200>
- Nutakki, T.U.K., Kazim, W.U., Alamara, K., Salameh, T., & Abdelkareem, M.A. (2023). Experimental Investigation on Aging and Energy Savings Evaluation of High Solar Reflective Index (SRI) Paints: A Case Study on Residential Households in the GCC Region. *Buildings*, 13(2), 419. <https://doi.org/10.3390/buildings13020419>
- Pachauri, R., & Kaushik S., A. S. (2025). A comparative evaluation of the effectiveness of glazed and open balconies in low-rise residences in moderate climates via field measurements and simulations. *Science, Engineering and Health Studies*, 19, 25040004. <https://doi.org/10.69598/sehs.19.25040004>
- Parison, S., Chaumont, M., Kounkou-Arnaud, R., Long, F., Bernik, A., Da Silva, M., & Hendel M. (2023). The effects of greening a parking lot as a heat mitigation strategy on outdoor thermal stress using fixed and mobile measurements: case-study project “tertiary forest.” *Sustainable Cities and Society*, 98, 104818. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104818>
- Patel, P., & Kaushik, A. S. (2023). The impact of microclimate on energy performance of office buildings within urban contexts located in a composite climate, the city of Indore. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1210, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012007>
- Pattnaik, N., Rahman, M. A., & Pauleit, S. (2025). Urban vegetation structure and composition influence pedestrian thermal comfort in public spaces: A case study in Munich. *Urban Forestry & Urban Greening*, 114, 129162. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129162>
- Peter, A., & Kaushik, S. A. S. (2024). A study on the impact of courtyard vegetation on its thermal comfort performance in an educational building of warm and humid climates. *Science, Engineering and Health Studies*, 18, 24040011. <https://doi.org/10.69598/sehs.18.24040011>
- Rachidi, A., Mounir, S. H., Sghir, S., & Lebaut, S. (2026). Urban albedo interventions reshape thermal comfort: A multiscale analysis of heat island, comfort, and energy effects in semi-arid Marrakesh. *Sustainable Cities and Society*, 136, 107090. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107090>
- Rodriguez, A., Wood, S., Carmeliet, J., Kubilay, A., & Derome, D. (2025). Local impact of trees on thermal comfort of pedestrians in streets. *Urban Climate*, 61, 102417. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102417>
- Sen, S., Fernandez, J.P.R.M.-R., & Roesler, J. (2020). Reflective Parking Lots for Microscale Urban Heat Island Mitigation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(8), 663–71. <https://doi.org/10.1177/0361198120919401>
- Silva Nascimento, A. D., Silva, L.V.A.D., Lisboa, M.A.N., Oliveira Silva, A.D., Rodrigues Ferreira, M.F., Silva, S.C.F.D., Melo, M.J.V.D., Silva, A.C.V.D., & Júnior, J. T. C. (2025). How do visitors perceive the urban greenery microclimate in the city's only green space? A case study in Brazilian semi-arid. *Environmental Development*, 56, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101244>
- Taleghani, M. (2018). The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. *Urban Climate*, 24, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.001>
- Wei, Y.-Y., Cheng, C.Y., & Lin, T.-P. (2025). The influence of trees shade level on human thermal comfort and the development of applied assessment tools. *Landscape and Urban Planning*, 263, 105436. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105436>
- Wang, C., Zhan, W., Liu, Z., Li, J., Li, L., Fu, P., Huang, F., Lai, J., Chen, J., Hong, F., & Jiang, S. (2020). Satellite-based mapping of the Universal Thermal Climate Index over the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123830. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123830>
- Zhang, T., Fu, X., Qi, F., Shen, Y., Xu, P., Tao, Y., Liu, T., & Song, Y. (2025). Optimizing pedestrian thermal comfort in urban street canyons for summer and winter: Tree planting or low-albedo pavements? *Sustainable Cities and Society*, 120, 106143. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106143>