

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EXTERIOR EN KAMPUNGS URBANOS DE ALTA DENSIDAD EN TAMANSARI, BANDUNG: UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN DEL MICROCLIMA

Recibido 03/03/2025
Aceptado 29/05/2025

ASSESSING OUTDOOR THERMAL COMFORT IN HIGH-DENSITY URBAN KAMPUNGS IN TAMANSARI, BANDUNG: A MICROCLIMATE SIMULATION STUDY

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO AO AR LIVRE EM KAMPUNGS URBANOS DE ALTA DENSIDADE EM TAMANSARI, BANDUNG: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO DO MICROCLIMA

Reinaldi Primanizar
Master of Architecture
Lecturer Architecture
President University, Bekasi, Indonesia
<https://orcid.org/0009-0008-4802-2686>
reinaldi.primanizar@president.ac.id

Suhendri Suhendri
Doctor of Philosophy
Lecturer, School of Architecture, Planning, and Policy Development
Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
<https://orcid.org/0000-0001-6042-2051>
suhendri91@itb.ac.id

Dibya Kusyala
PhD in Building Technology
Lecturer, Housing and Settlement Design and Research Group
Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
dibja@itb.ac.id



ABSTRACT

Urban kampungs, characterized by dense, organically developed settlements, present unique challenges in outdoor thermal comfort. This study investigates how key physical variables—building arrangement, surface materials, and vegetation—impact the microclimate of outdoor spaces in Tamansari, Bandung, using ENVI-met 4 simulations. The findings reveal that material reflectivity significantly influences air temperature, with lower-albedo paving proving more effective in reducing heat accumulation. Compact building arrangements with a high height-to-width ratio provide essential shading, mitigating heat stress, while strategically placed vegetation enhances shading and wind flow, contributing to improved thermal comfort. These insights offer valuable guidelines for architects and urban planners designing climate-responsive, high-density urban environments. The study underscores the importance of integrating passive cooling strategies to improve outdoor livability in urban kampungs, especially in tropical climates.

Keywords

urban kampung, outdoor thermal comfort, performance simulation, ENVI-met, high-density settlement

RESUMEN

Los asentamientos urbanos, caracterizados por asentamientos densos y desarrollados orgánicamente, presentan desafíos únicos para lograr el confort térmico al aire libre. Este estudio investiga cómo las variables físicas clave (disposición de los edificios, materiales de la superficie y vegetación) afectan el microclima de los espacios al aire libre en Tamansari, Bandung, utilizando simulaciones ENVI-met 4. Los hallazgos revelan que la reflectividad del material influye significativamente en la temperatura del aire, y que los pavimentos con un albedo más bajo resultan más efectivos para reducir la acumulación de calor. Las disposiciones de edificios compactos con una alta relación altura-ancho brindan un sombreado esencial, mitigando el estrés térmico, mientras que la vegetación ubicada estratégicamente mejora tanto el sombreado como el flujo del viento, lo que contribuye a mejorar el confort térmico. Estos conocimientos ofrecen pautas valiosas para los arquitectos y planificadores urbanos que buscan diseñar entornos urbanos de alta densidad que respondan al clima. El estudio resalta la importancia de integrar estrategias de refrigeración pasiva para mejorar la habitabilidad al aire libre en los kampungs urbanos, particularmente en climas tropicales.

Palabras clave

asentamiento urbano, confort térmico al aire libre, simulación de rendimiento, ENVI-met, asentamiento de alta densidad

RESUMO

Os assentamentos urbanos, caracterizados por assentamentos densos e desenvolvidos organicamente, apresentam desafios únicos em termos de conforto térmico ao ar livre. Este estudo investiga como variáveis físicas importantes — disposição dos edifícios, materiais de superfície e vegetação — afetam o microclima dos espaços ao ar livre em Tamansari, Bandung, utilizando simulações ENVI-met 4. Os resultados revelam que a refletividade dos materiais influencia significativamente a temperatura do ar, com pavimentos de baixo albedo se mostrando mais eficazes na redução do acúmulo de calor. O arranjo compacto dos edifícios, com uma alta relação altura/largura, proporciona sombreamento essencial, mitigando o estresse térmico, enquanto a vegetação estrategicamente posicionada aumenta o sombreamento e o fluxo de vento, contribuindo para melhorar o conforto térmico. Essas informações oferecem diretrizes valiosas para arquitetos e urbanistas que projetam ambientes urbanos de alta densidade e que respondem às mudanças climáticas. O estudo ressalta a importância de integrar estratégias de resfriamento passivo para melhorar a habitabilidade ao ar livre em kampungs urbanos, especialmente em climas tropicais.

Palavras-chave:

assentamentos urbano, conforto térmico ao ar livre, simulação de desempenho, ENVI-met, assentamento de alta densidade

INTRODUCCIÓN

Los arquitectos y urbanistas, para hacer frente a las preocupaciones de la población con respecto al medio ambiente y el cambio climático, ahora están considerando el microclima urbano en sus limitaciones de planificación, especialmente la intervención de espacios al aire libre. En las áreas urbanas, particularmente en los kampungs urbanos, los espacios al aire libre son esenciales para mantener los hábitats porque albergan peatones, ciclistas y diversas actividades al aire libre para contribuir a la habitabilidad urbana (Johansson y Emmanuel, 2006). Los estudios han demostrado que la morfología urbana, incluidas la orientación de las calles y la configuración de los edificios, impacta directamente en el confort térmico al aire libre al regular la exposición a la radiación solar y la circulación del viento (Taleghani et al., 2014).

Los kampungs urbanos son asentamientos que existieron mucho antes de que surgiera la planificación urbana formal. Desarrollados de manera informal, destacan por tener características tradicionales y estructuras irregulares, mientras que la cobertura de edificios pequeños, la disposición densa de masas, los callejones estrechos y el desarrollo orgánico son características de las casas urbanas del kampung. El concepto de kampungs surgió debido al crecimiento familiar en un área con tierras limitadas y problemas económicos (Asriana et al., 2024; Hamidah et al., 2017; Rochmania y Sukmawati, 2024). Son comunes en la mayoría de las ciudades desarrolladas del sudeste asiático, como Yakarta, Bandung, Bangkok y Manila. Observaciones iniciales en el caso estudiado aquí, el kampung urbano de Tamansari, Bandung, muestra muchas actividades sociales dentro de casas muy poco espaciadas, con niños jugando en la calle y pequeñas plazas alrededor de las casas. En un entorno de espacios reducidos, tipología al aire libre, calles estrechas y plazas pequeñas, se intensifica la actividad íntima al aire libre entre los habitantes. Este sentido de comunidad es un aspecto social valioso de los asentamientos urbanos de kampung, que contribuye a la resiliencia social en la ciudad. Por ende, mejorar los espacios comunitarios al aire libre apoyaría la cohesión social y elevaría la habitabilidad general del kampung urbano.

El tiempo que los habitantes pasan en espacios al aire libre a menudo refleja su satisfacción subjetiva con el nivel de confort térmico. La percepción de comodidad de las personas no está impulsada solamente por mediciones físicas como la temperatura y la humedad, sino también por factores fisiológicos y culturales (Nikolopoulou y Steemers, 2003). Por ejemplo, en los asentamientos urbanos de kampung, la aceptación de diferentes condiciones térmicas puede ser mayor debido a la aceptación social de la vida al aire libre. Por lo tanto, este estudio explora cómo las áreas sombreadas, la ventilación natural y los elementos verdes pueden mejorar significativamente el confort térmico percibido por los habitantes y fomentar una mayor actividad al aire libre, incluso en climas cálidos.

La gente espera diferentes experiencias de confort térmico en espacios interiores y exteriores. Sus expectativas varían según las circunstancias de exposición, como las variantes de sol y sombra, la velocidad y dirección del viento, los cambios en la tasa de humedad, la radiación directa e indirecta, etc. (Givoni et al., 2003; Wang y Su, 2025). El entorno externo afecta significativamente la forma en que vive la gente, y está determinado por las condiciones

naturales, los factores antropogénicos, la densidad de la construcción urbana, el tamaño de las áreas de vegetación, etc. (Klemm, 2007). Mejorar el confort térmico al aire libre también puede afectar la salud y el bienestar, promover la actividad física y aumentar las interacciones sociales (ABAA, 2020; van den Bosch y Ode Sang, 2017).

Los investigadores han estudiado ampliamente las condiciones de confort térmico en entornos urbanos. Liu descubrió que en los últimos 23 años, ha habido 632 artículos en Web of Science y Scopus que usan una palabra clave similar (Liu et al., 2023; Mandić et al., 2024). Sin embargo, se ha prestado poca atención a los asentamientos informales de alta densidad caracterizados por kampungs urbanos. Este estudio busca abordar esta brecha simulando el confort térmico al aire libre en kampungs urbanos y definiendo el papel de sus condiciones físicas únicas. Al modelar el sitio con una comprensión de los arreglos de construcción existentes, el material de la superficie y la vegetación, este estudio tiene como objetivo proporcionar información sobre la optimización de los espacios al aire libre en asentamientos de alta densidad. Los hallazgos podrían ofrecer pautas valiosas para que los urbanistas creen un mejor confort térmico y bienestar en los kampungs urbanos.

MICROCLIMA DE CONFORT TÉRMICO

Esta sección describe el enfoque para mejorar las condiciones de confort térmico al aire libre en entornos urbanos. Los parámetros físicos incluyen factores ambientales como la temperatura radiante media (MRT, en inglés), la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa. Estudios recientes enfatizan que, en asentamientos urbanos de alta densidad, la MRT juega un papel fundamental en la determinación de la sensación térmica, en comparación con la temperatura del aire por sí sola. En entornos compactos como los kampungs urbanos, las calles estrechas, las densas masas de edificios y la vegetación limitada amplifican la radiación solar, aumentando la MRT y provocando un mayor estrés térmico incluso con temperaturas moderadas del aire. Además, la investigación de Gallardo et al. (2016) destaca que incluso pequeños aumentos en la ventilación natural pueden mejorar significativamente el confort térmico percibido en climas cálidos y húmedos. Las velocidades del viento de solo 0,3-1,0 m/s también mejoran la percepción del confort cuando se combinan con estrategias de sombreado o enfriamiento de la superficie. La investigación ha demostrado que la intervención física afecta los microclimas urbanos y que estos cambios en el entorno urbano dan como resultado el confort térmico. Para mejorar el confort térmico, los habitantes pueden ajustar factores físicos como la disposición de las construcciones, los materiales, la vegetación y las características del agua (Cheng et al., 2022; Liao et al., 2024; Pamungkas et al., 2024; Rodríguez et al., 2025; Uno et al., 2018; Zhang et al., 2025). En la siguiente sección se explica cómo este factor disminuye el estrés térmico de los habitantes en los microclimas.

DISPOSICIÓN DE LAS CONSTRUCCIONES

En bloques de edificios, las superficies de los callejones reciben radiación solar, lo que influye en las atmósferas térmicas exteriores y afecta la sensibilidad térmica de un callejón. Sin embargo, hay diferencias significativas entre

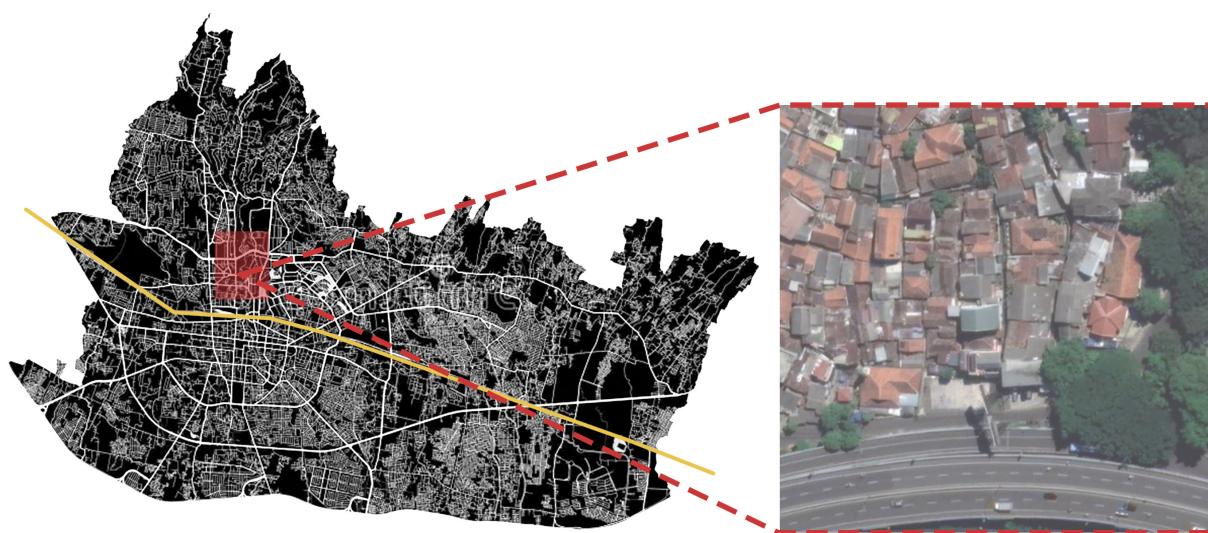


Figura 1. Ubicación de la evaluación, Kampung Tamansari, Bandung. Fuentes: Google Earth, modificado por los autores.

los valores de sensación de confort térmico humano en zonas soleadas y sombreadas debido a la radiación solar (Aleksandrowicz y Cortador de Perlas, 2023; Kim et al., 2024; Murakami, 2006).

Shashua-Bar y Hoffman (2000) introdujeron la “relación de espaciamiento” (distancia de los edificios paralela a la calle/ longitud del edificio paralela a la orientación de la calle) para cuantificar la forma separada. Esto sigue el patrón básico de forma de la calle y los indicadores morfológicos. Los estudios han abordado el índice de acceso solar de los cañones de las calles, como en el espacio negativo de la kampung urbana, utilizando relaciones H/W en valores variables con orientación de la calle E-O y N-S (Arnfield, 1990). Estos indicadores fundamentales se utilizaron para configurar el estudio de caso con orientaciones H/W de 0.5, 1, 2, 4 y E-O, N-S, NE-SO y NO-SE (Ali-Toudert y Mayer, 2006).

Las distribuciones de presión inducidas por el viento son otro aspecto de la disposición de los edificios. Estos dependen de muchos factores en el entorno urbano, como la condición del flujo de aproximación, la dirección del viento, la geometría de la estructura urbana y el entorno urbano (Montazeri y Bloqueo, 2013; Setaih et al., 2013).

Material de la superficie

El uso de materiales menos absorbentes (alto albedo) es una técnica práctica y prometedora para reducir el efecto del entorno térmico en la comodidad de los peatones. Las superficies de alto albedo reflejan una mayor parte de la radiación solar entrante, reduciendo así la cantidad absorbida y almacenada como calor en entornos urbanos. Se caracteriza por la capacidad de las superficies ambientales para absorber la radiación solar entrante en entornos urbanos (Akbari et al., 1992; Baniassadi et al., 2018; Fintikakis et al., 2011). Por otro lado, las superficies blancas y de colores más claros pueden mejorar el confort térmico al reducir la temperatura ambiente. La evidencia de la investigación ha indicado que aumentar la reflectancia solar de los materiales

en 0,25 reduce significativamente la temperatura del material en 10°C, ya que mantiene las superficies estructurales más frías bajo el sol, reduciendo así la convección de calor del material al aire ambiente (Akbari et al., 2001; Setaih et al., 2013; Synnefa et al., 2011). Si bien el principio sigue siendo válido en regiones tropicales como Bandung, los estudios empíricos sugieren que las reducciones de temperatura debidas a las mejoras del albedo pueden moderarse ligeramente debido a la humedad basal consistentemente alta y los efectos difusos de la radiación (Benrazaví et al., 2016; Liu et al., 2023).

Vegetación

Uno de los métodos más comunes y efectivos para mejorar el confort térmico de los peatones al aire libre en espacios urbanos es plantar vegetación y árboles en los espacios abiertos disponibles. Tal intervención puede disminuir la ganancia de calor del sol, proporcionando enfriamiento tanto a través de la sombra como de la evapotranspiración (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003). Estudios empíricos han demostrado el fuerte papel de la vegetación en la modificación de los microclimas urbanos. Por ejemplo, Picot (2004) observó que los parques urbanos en climas cálidos reducen la temperatura del aire local hasta en 2 a 3 °C en comparación con las áreas urbanizadas adyacentes. Del mismo modo, Mahmoud (2011) informó que las áreas sombreadas debajo de las copas de los árboles exhibían una temperatura radiante media (MRT) más baja que los espacios sin sombra.

La gran ventaja de la cobertura arbórea es el efecto refrescante del impacto conjunto de la evapotranspiración (ET) y la sombra de las copas (Kim y Lee, 2024; Kim et al., 2024; Shashua- Bar y Hoffman, 2000). Más allá de su papel estético y su agradable percepción natural, aumentar la vegetación en las áreas urbanas representa una técnica de mitigación significativa, ya que ayuda a reducir el estrés por calor, bloquea el ruido, mejora la calidad del aire y protege a las personas del viento, lo que lo convierte en



Figura 2. Situación actual en kampung en Tamansari. Esto muestra la altura típica de un edificio y el ancho de la calle. El asentamiento (arriba) en el interior tiene una alta relación H/W, y el perímetro (abajo) tiene una baja relación H/W. Fuentes: Fotografías tomadas por los autores.

un componente esencial del diseño urbano resistente al clima (Fintikakis et al., 2011; Liu et al., 2023). Estudios de simulación recientes revelan que la efectividad del enfriamiento de la vegetación depende en gran medida de la geometría del corredor. En cañones con relaciones H/W más altas, el impacto de la sombra de los árboles se vuelve más pronunciado, lo que mejora las reducciones tanto en la temperatura del aire como en la MRT. En su simulación, la vegetación es más efectiva para corredores con orientación O-E que otras orientaciones (Liu et al., 2023; Suryantara et al., 2019).

METODOLOGÍA

El estudio de caso se realizó en Tamansari (Figura 1), un kampung urbano ubicado en Bandung, Indonesia ($6^{\circ}53'50.5''$ S $107^{\circ}36'31.2''$ E). Bandung cubre un área total de 16.729,65 hectáreas y tiene una población de 2.579.837 personas en 2023, lo que la convierte en una de las ciudades más densamente pobladas de Indonesia, con una densidad de 15.051 personas/km². Tamansari ejemplifica las características morfológicas de los kampung urbanos en el sudeste asiático, donde los espacios al aire libre expresan innegablemente diversas interacciones sociales (Figura 2).

El efecto de las características exteriores en el confort térmico se analiza mediante una simulación del microclima utilizando el software ENVI-met 4. Es importante señalar que este estudio no utilizó un modelo calibrado. No se incorporaron datos medidos en terreno con fines de calibración o validación. En cambio, el modelo de simulación utiliza condiciones meteorológicas constantes establecidas manualmente en función de los datos climatológicos locales.

El dominio de simulación seleccionado es de 60 m (x) x 60 m (y) x 15 m (z), con una resolución espacial de 1 m por cuadrícula. Se utilizaron parámetros ambientales predeterminados, pero debido a que la ubicación del estudio no está disponible en el software, la longitud y latitud de la ubicación se establecieron manualmente. Debido a la ubicación, algunos parámetros físicos dependientes de la ubicación, como la temperatura, la humedad y la velocidad

del viento, se establecieron en función de los datos de BMKG Indonesia (Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika) o la Agencia Indonesia de Meteorología, Climatología y Geofísica. Los parámetros ambientales utilizados fueron la temperatura del aire (23°C - 33°C , promedio 27°C), la humedad relativa (47-89%, promedio 48%) y la velocidad del viento establecida en 1 m/s de este a oeste. La simulación se ejecutó durante 18 horas, desde las 4:00 hasta las 22:00. Debido a que la ubicación se encuentra en el hemisferio sur, el día elegido para el cálculo es el solsticio de verano para el hemisferio sur, que es el 21 de diciembre, el día más caluroso del año.

El modelo base utilizó el pavimento de hormigón existente con un albedo de 0,25, representando superficies grises estándar en condiciones reales. Estos valores se aplicaron en todas las superficies del suelo, incluidas las calles, el pavimento y los espacios comunes. La vegetación se modeló como objetos volumétricos tridimensionales, como en su condición de la vida real, teniendo en cuenta la densidad del área foliar (LAD, en inglés), la altura de los árboles y la forma de la copa. ENVI-met simula la vegetación como agentes microclimáticos dinámicos que influyen en el sombreado solar, la evapotranspiración y el flujo del viento. Como Bruse y Fleer (1998) sugirieron, estos parámetros permiten que el modelo simule el efecto de la vegetación sobre la temperatura y el flujo de aire de manera más realista. La vegetación existente en terreno, en su mayoría árboles de tamaño mediano con copas anchas, se integró en la simulación y se exploraron escenarios ecológicos adicionales para evaluar su impacto en las condiciones térmicas exteriores.

La simulación tuvo como objetivo aislar y comparar los efectos de la configuración del edificio (relaciones H/W y orientación), el material de la superficie (variación del albedo) y los patrones de vegetación en las condiciones del microclima exterior. La simulación evalúa la radiación difusa, directa y reflejada de onda corta (SW, en inglés), la velocidad del viento y la temperatura radiante media (MRT, en inglés). Estos parámetros son cruciales para comprender el confort térmico. La radiación SW difusa contribuye a la carga de calor radiante incluso en condiciones de sombra. La radiación SW directa puede aumentar significativamente las temperaturas de la superficie. La radiación SW reflectante mide la porción de radiación solar reflejada

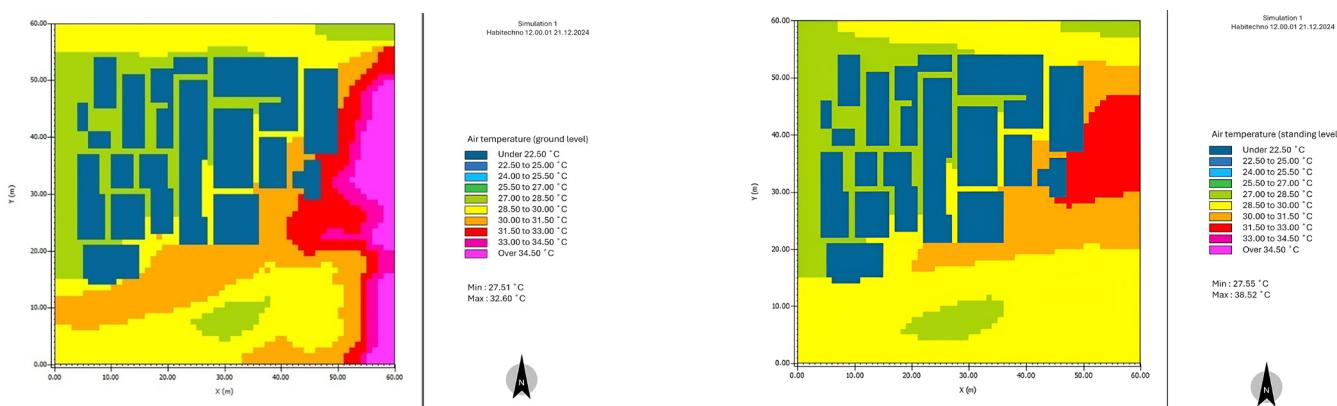


Figura 3. (A) Radiación reflejada a nivel del suelo; (B) Radiación reflejada a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

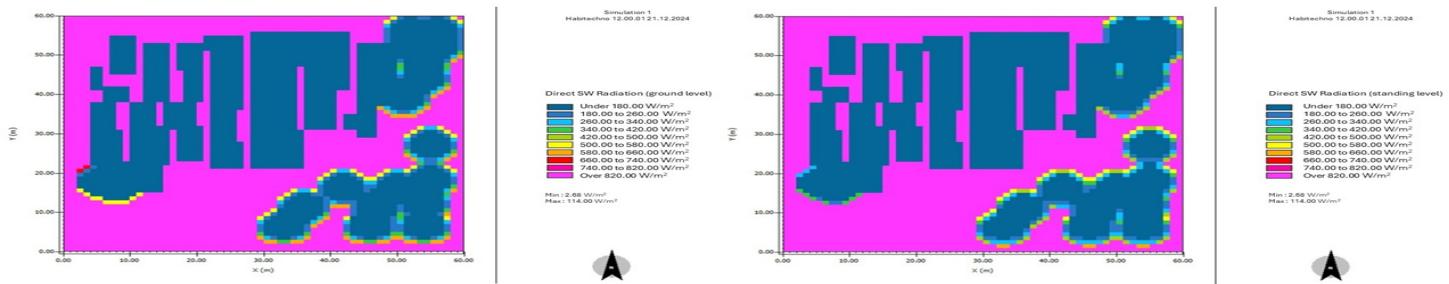


Figura 4. (A) Radiación SW directa a nivel del suelo. (B) Radiación SW directa a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

desde la superficie urbana. La velocidad del viento influye en el enfriamiento convectivo y la circulación del aire. Los resultados proporcionaron información sobre la distribución de la temperatura, la temperatura radiante media (MRT) y la velocidad del viento, que contribuyen de manera crucial al confort térmico percibido al aire libre. La MRT representa el efecto combinado de todas las fuentes de radiación en la percepción térmica humana.

La simulación comparó las variaciones de temperatura tanto en el suelo (0,5 m) como en el nivel de pie (1,5 m). El nivel del suelo proporciona información sobre el entorno térmico a la altura a la que se sientan los niños y la acumulación de calor en la superficie del suelo. El nivel de pie representa la altura promedio de un peatón adulto y la exposición térmica crítica durante las actividades típicas al aire libre. La evaluación de ambos garantiza una comprensión integral de los factores clave para el confort térmico al aire libre y conduce a recomendaciones de diseño urbano más precisas y sensibles al contexto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y MATERIALES DE LA SUPERFICIE

El análisis de la temperatura del aire revela una diferencia significativa entre el nivel del suelo y el nivel de pie. La Figura 3 muestra que la temperatura cerca del suelo es

consistentemente superior a la que se encuentra a 1,5 metros sobre el nivel del suelo. Esta variación se atribuye principalmente a la reflectividad de los materiales de la superficie (albedo). En esta simulación, el material de recubrimiento de la superficie utilizado para el corredor es hormigón con alto albedo, como en el escenario de la vida real. Los materiales de alto albedo aumentan la acumulación de calor en las áreas urbanas, exacerbando el estrés térmico (Synnefa et al., 2007).

Un examen más detallado de la radiación solar (Figura 3 y Figura 4) indica que la radiación directa y difusa no difieren significativamente entre las dos alturas. Existen diferencias entre los valores de radiación en áreas con una relación <1 H/W a nivel de pie y a nivel del suelo, como se muestra en el área rectangular resaltada (Figura 3). La radiación reflejada de onda corta (SW) (Figura 5) muestra un aumento notorio a nivel del suelo. Dado que no existe un número estándar específico para esta radiación, este estudio examina los valores a diferentes niveles de altura. Este resultado indica que la dependencia entre la superficie del suelo y la relación H/W contribuye a temperaturas ambientales elevadas.

Efectos en la disposición de las construcciones

Una orientación de calle E-O gana 30-36 °C a nivel del suelo y 33-39 °C a nivel de pie en una relación >1 H/W, y una orientación de calle N-S tiene un rango de MRT de 42-48 °C a nivel del suelo y 51-54 °C a nivel de pie (Tabla 1). La

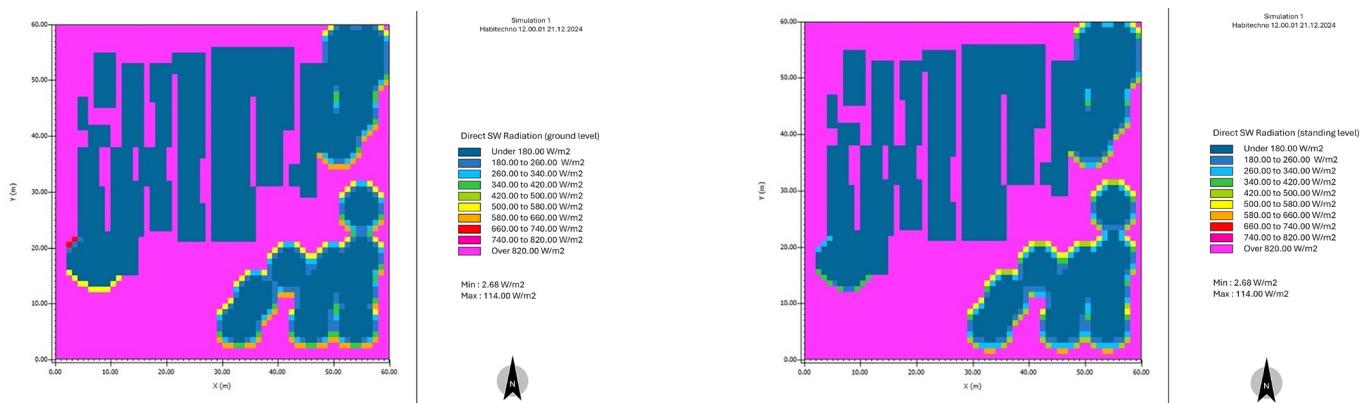


Figura 5. (A) Radiación SW reflejada a nivel del suelo. (B) Radiación SW reflejada a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

Tabla 1. Valores de diferentes relaciones H/W e intervalos de MRT: . Fuente: Preparado por los autores.

Relación H/W	Orientación a la calle	Rango de MRT nivel del suelo (°C)	Rango de MRT nivel de pie (°C)
0,83	E-O	48-51	51-54
1,66	E-O	33-36	36-39
2,5	E-O	30-33	33-36
5	E-O	30-33	33-39
1,25	N-S	45-48	51-54
2,5	N-S	45-48	51-54
5	N-S	42-45	51-54

MRT normal debería ser inferior a 40 °C (Nikolopoulou y Steemers, 2003; Pamungkas et al., 2024), lo que hace que la orientación de la calle E-O sea más cómoda que la N-O. Este resultado difiere de otros estudios previos en los que la orientación de la calle E-O crea una condición térmica más incómoda que la N-E.

Este resultado muestra que la disposición de las construcciones y la relación H/W son críticas para modificar las condiciones térmicas a través del sombreado. Los resultados de la simulación confirman que la relación altura-anchura (H/W) de las calles influye en la eficiencia del sombreado. En este estudio de caso, la trayectoria del sol está ligeramente por encima del ecuador, por lo que la luz del sol que incide sobre la masa del edificio al norte de la carretera proyecta sombras en la calle E-O. Además, las calles N-S con una relación H/W de >1 proporcionan más sombra, reduciendo efectivamente la MRT en el suelo y el nivel de pie (Figura 5). La disposición de las construcciones también influye significativamente en la eficiencia del sombreado. Estudios previos indican que una relación H/W >1 proporciona una sombra efectiva, minimizando la exposición directa a la radiación solar (Taleghani et al., 2014; Ali-Toudert y Mayer, 2006).

Además, la orientación de la calle afecta el acceso solar en el corredor de la calle. Como sugiere un estudio previo

(Ali-Toudert y Mayer, 2006), las orientaciones este-oeste resultan más efectivas para proporcionar sombra y mejorar el confort térmico. Esta orientación crea áreas sombreadas más amplias durante todo el día, lo que reduce la exposición al calor en los senderos peatonales y los espacios públicos. Estudios en ciudades tropicales, como los realizados por Johansson y Emmanuel (2006), confirman que diseños urbanos adecuados pueden mitigar significativamente el estrés por calor, particularmente cuando se integran con vegetación y sombreado de formas construidas.

Vegetación y flujo de viento

Esta simulación muestra diferencias en la velocidad del viento a nivel del suelo y de pie en el perímetro del asentamiento y en las áreas interiores al aire libre. El perímetro tiene una carretera principal ancha, una relación H/W <1, y contiene un grupo de árboles trembesi, mientras que el interior al aire libre tiene una relación H/W >1. En áreas con una relación H/W >1, la velocidad del viento permanece estable entre 0,15 y 0,45 m/s, mientras que en áreas con una relación H/W <1, la velocidad del viento varía entre 0,3 y 1,2 m/s tanto a nivel del suelo como de pie (Figura 6).

La vegetación contribuye tanto a la sombra como a la regulación del flujo del viento. Esta simulación revela que la

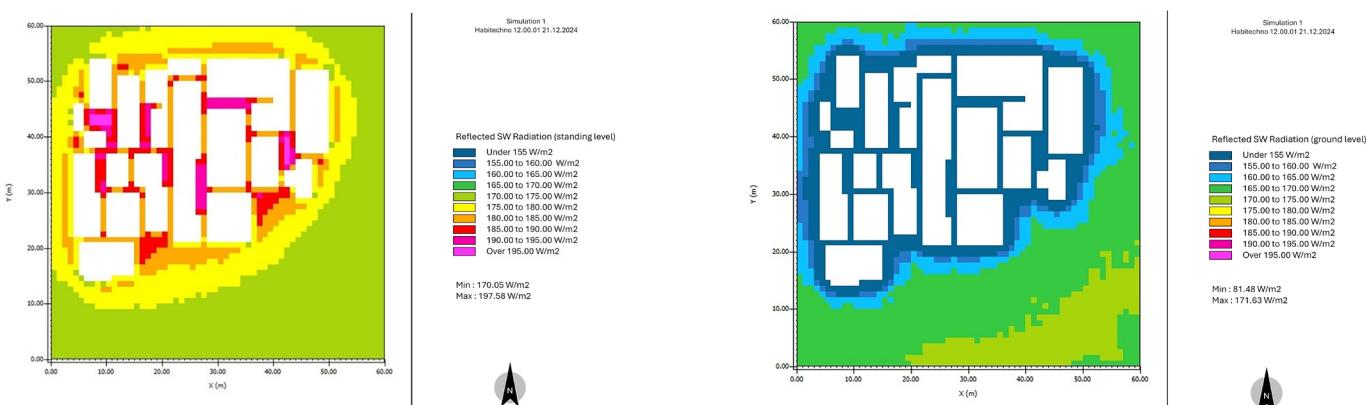


Figura 6. (A) MRT a nivel del suelo. (B) MRT a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

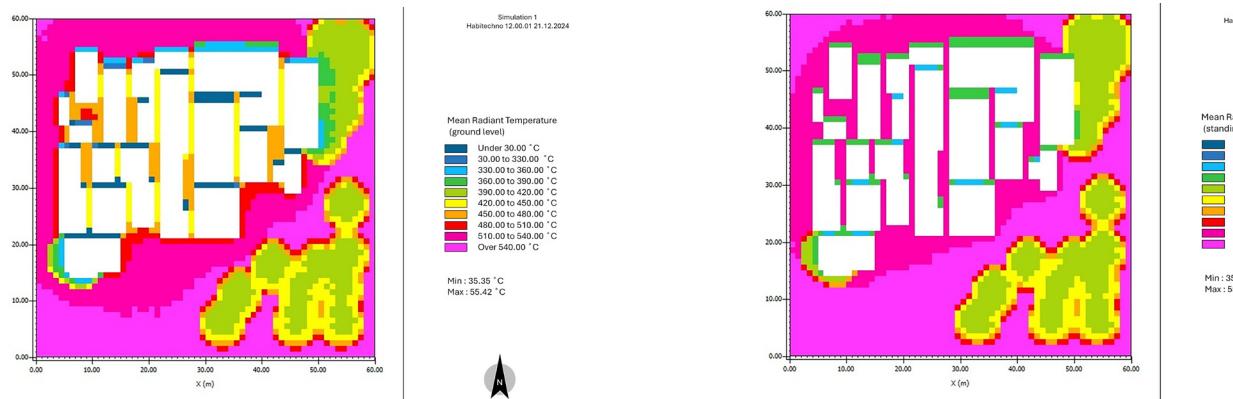


Figura 7. (A) Velocidad del viento a nivel de pie. (B) Velocidad del viento a nivel de pie. Fuente: Preparado por los autores.

velocidad del viento generalmente es mayor a nivel de pie que a nivel del suelo en el perímetro del asentamiento (Figura 7), lo que indica una interrupción causada por la fricción superficial. Esto también indica que el movimiento del aire es bastante cómodo con <2,5 m/s para los habitantes, para las frecuentes actividades sentadas al aire libre. Por otro lado, este estudio muestra que la vegetación no juega un papel activo en áreas de alta relación H/W y morfología regional orgánica, a diferencia de varios estudios previos (Liu et al., 2023; Rodríguez et al., 2025; Suryantara et al., 2019).

No obstante, los espacios abiertos con vegetación demuestran una mayor velocidad del viento, lo que sugiere que la vegetación estratégicamente ubicada puede mejorar la ventilación natural y al mismo tiempo reducir el estrés térmico. En este caso, la vegetación de la zona oriental es un árbol trembesi (*Samanea saman*) con un tronco grande y una copa ancha. Por ende, el aire a nivel del suelo y de pie se ventila bien en toda su área. Otros investigadores también han demostrado que la vegetación colocada estratégicamente puede reducir las temperaturas urbanas hasta en 5 °C, mejorando significativamente las condiciones microclimáticas (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Shashua-Bar y Hoffman, 2000).

Además, la sombra de los árboles proporciona varios efectos de enfriamiento a través de los búferes de la radiación solar y la

evapotranspiración, reforzando el papel de la vegetación en la mejora de las condiciones microclimáticas. Estos hallazgos se alinean con estudios previos que enfatizan la importancia de integrar la vegetación en los asentamientos para la optimización del confort térmico. Además, Bowler et al. (2010) destacaron que la vegetación puede contribuir a los efectos de enfriamiento a largo plazo, reduciendo la intensidad de las islas de calor urbanas. Estudios recientes han demostrado que combinar copas de árboles con superficies permeables del suelo puede amplificar los efectos de enfriamiento (Morakinyo et al., 2017), reforzando la importancia de integrar estrategias de ecologización urbana. Una estrategia que puede ser una opción viable para callejones estrechos es un jardín vertical y plantas en macetas. Además, los árboles contribuyen a la regulación del flujo de aire al aumentar la velocidad del viento en espacios abiertos, promoviendo aún más los efectos de enfriamiento, como se demostró en estudios en asentamientos urbanos densos en Asia (Ng et al., 2011).

Implicaciones para la planificación urbana

Los resultados resaltan la importancia de las estrategias holísticas de diseño urbano que integran la disposición de los edificios, la selección de materiales y la vegetación para crear ambientes exteriores térmicamente cómodos. La ubicación estratégica de la vegetación, particularmente

en espacios abiertos a lo largo del eje del corredor oeste-este, es esencial. Los estudios confirman que el sombreado reduce la radiación directa en las superficies al tiempo que mantiene despejados los corredores de viento (Shashua-Bar y Hoffman, 2000). Como se ve en la Figura 6, la MRT en el corredor O-E es más alto que el corredor N-S en coordenadas de altitud similares. La colocación, incluidos los jardines en la azotea y la vegetación de la terraza en el segundo o tercer piso, puede promover la evapotranspiración y mejorar el confort térmico en niveles más altos, especialmente en una relación H/W >1 (Morakinyo et al., 2017; Perini y Magliocco, 2014). Esta estrategia también se vuelve aún más crucial para un corredor con relación O-E H/W <1 , ya que controla la velocidad del viento. Los jardines verticales, como las paredes verdes y la plantación de fachadas, también ayudan a regular las temperaturas de los edificios y mejoran la calidad del aire.

Los pavimentos y fachadas de colores claros pueden reflejar más luz solar y absorber menos calor, lo que los hace adecuados para áreas abiertas (Synnefa et al., 2007; Santamouris, 2013). Sin embargo, la reflectividad excesiva puede atrapar el calor dentro de espacios confinados en callejones estrechos con edificios muy cerrados, lo que genera efectos de calentamiento involuntarios. Los estudios futuros deberían explorar combinaciones de materiales permeables y de alto albedo existentes óptimos para garantizar una mitigación equilibrada del calor.

Este estudio demuestra que las superficies del piso de albedo en áreas al aire libre pueden elevar el estrés por calor de los peatones en kampungs urbanos con espacios estrechos flanqueados por edificios estrechos de dos a tres pisos. El aumento de la reflectividad conduce a una mayor exposición al calor radiante, lo que compensa los beneficios de la reducción de la temperatura del aire. Como resultado, los peatones pueden experimentar una mayor incomodidad térmica a pesar de las condiciones ambientales más frías. Este estudio destaca la importancia de considerar una interacción climática más amplia al aplicar dichos materiales para pavimentar, en lugar de concreto.

El diseño de asentamientos compactos en áreas de alta densidad requiere una planificación cuidadosa para integrar corredores de ventilación y ajustar la composición de las relaciones H/W de los edificios y las orientaciones de las calles. Los espacios entre los edificios a lo largo del eje norte-sur mejoran el flujo de aire, mientras que los búfors de vegetación en el lado este-oeste son reguladores térmicos. Estos búfors reducen la exposición a la radiación y filtran los contaminantes de manera efectiva.

Los espacios semiabiertos y las áreas comunes sombreadas dentro de asentamientos densos pueden mejorar la resiliencia social y ambiental al reducir el estrés por calor y promover el bienestar público. Estas estrategias son pautas prácticas para los urbanistas y arquitectos que diseñan asentamientos kampung de alta densidad en climas tropicales.

Mejorar el confort térmico en callejones estrechos dentro de asentamientos de alta densidad requiere un enfoque multifacético que considere las limitaciones espaciales, las

necesidades espaciales privadas y las condiciones climáticas. Los planificadores urbanos deben comprometerse con las comunidades y autoridades locales para implementar diseños y políticas para esta área con desarrollo orgánico. La planificación regional requiere un enfoque impulsado por la comunidad que pueda sinergizar la implementación de ideas y políticas en áreas públicas, el dominio del diseño del planificador y la implementación de ideas en superficies de edificios, que son el dominio del diseño privado. Al implementar la política en áreas privadas, los urbanistas deben fomentar la integración de materiales de construcción sostenibles esenciales para mejorar el confort térmico a largo plazo.

CONCLUSIONES

Este estudio examina la influencia de los materiales de la superficie, la disposición de los edificios y la vegetación en el confort térmico al aire libre en los kampungs urbanos. Cada factor juega un papel crucial en la modificación del microclima de los espacios al aire libre, con implicaciones significativas para el diseño y la planificación urbana. Abordar estos factores de manera integral puede fomentar entornos urbanos de alta densidad más saludables y habitables.

El estudio revela que los materiales de superficie de alto albedo tienden a elevar la temperatura del aire debido a sus propiedades reflectantes, particularmente las superficies del suelo. Se prefieren materiales de pavimentación de albedo más bajo para mitigar la acumulación de calor. Las disposiciones de las construcciones con una alta relación altura/ancho (H/W) proporcionan una sombra efectiva, minimizan la radiación solar directa y reducen la temperatura radiante media (MRT). Una orientación del edificio de este a oeste es más efectiva para crear áreas exteriores sombreadas. La vegetación mejora el confort térmico al proporcionar sombra y ET, lo que ayuda a disipar el calor. Este estudio revela que tiene un impacto menor en el aumento del flujo de viento en corredores de relación >1 H/W y estructuras orgánicas que cuando es <1, ya que la masa constructiva reduce la velocidad del viento. Para maximizar sus beneficios, la vegetación debe colocarse estratégicamente alrededor de espacios abiertos para optimizar el flujo de aire.

Esta investigación enriquece la comprensión del confort térmico al aire libre en kampungs urbanos de alta densidad, que puede ser una base en la toma de decisiones de los planificadores urbanos. Los hallazgos sirven como una referencia valiosa para los urbanistas, arquitectos y legisladores que buscan diseñar kampungs urbanos sostenibles y térmicamente cómodos o asentamientos de alta densidad. Sin embargo, la implementación efectiva requerirá la colaboración con las comunidades locales, ya que las superficies privadas de los edificios determinan en gran medida las condiciones térmicas exteriores.

En general, el estudio contribuye significativamente al discurso sobre el confort térmico al aire libre en kampungs

urbanos densos. Enfatiza la necesidad de abordar las variables microclimáticas a través de un enfoque de diseño holístico. Las investigaciones futuras deberían incorporar la validación del confort térmico, simular el efecto de los ajustes del diseñador, realizar un monitoreo a largo plazo y explorar factores ambientales adicionales, como el control de la humedad y las características del agua. Los estudios comparativos en múltiples kampungs urbanos podrían mejorar aún más la aplicabilidad de estos hallazgos.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRediT

Conceptualización, R. P., S., D. K; Curación de datos, R. P., S., D. K; Análisis formal, R. P., S.; Adquisición de financiación, R. P., S., D. K.; Investigación, R.P., S., D.K; Metodología, R. P., S.; Administración de proyectos, D. K; Recursos, R. P., S., D. K; Software. S.; Supervisión, D. S.; Validación, R. P., S.; Visualización, R. P., S.; Escritura-borrador original, R. P.; Escritura-revisión y edición, R. P., S.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está financiada por el programa P3MI titulado "Desarrollo de tecnología aplicada de unidades de vivienda y vecindarios en Kampong Kota", bajo el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción, Institut Teknologi Bandung.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>
- Akbari, H., Davis, S., Dorsano, S., Huang, J., & Winert, S. (1992). *Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light-colored surfacing*. United States Environmental Protection Agency. <https://doi.org/10.2172/10155334>
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Aleksandrowicz, O., & Pearlmuter, D. (2023). The significance of shade provision in reducing street-level summer heat stress in a hot Mediterranean climate. *Landscape and Urban Planning*, 229, 104588. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104588>
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Arnfield, A. J. (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, 14(2), 117–131. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90031-D](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90031-D)
- Asriana, N., Rahmah, F. F., & Mezzaluna, N. A. (2024). Characteristics of Public Open Space Area in the Kampung Settlement (Case Study: Kampung Cungkeng). *Journal of Architectural Design and Urbanism*, 6(2), 63–73. <https://doi.org/10.14710/jadu.v6i2.21705>
- Baniassadi, A., Heusinger, J., & Sailor, D. J. (2018). Building energy savings potential of a hybrid roofing system involving high albedo, moisture-retaining foam materials. *Energy and Buildings*, 169, 283–294. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.004>
- Benrazavi, N., Benrazavi, R., Dola, K., Ujang, N., & Benrazavi, N. (2016). Effect of pavement materials on surface temperatures in tropical environment. *Sustainable Cities and Society*, 22, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.011>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3–4), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Cheng, Y., Liu, X., Zeng, Z., Liu, S., Wang, Z., Tang, X., & He, B.-J. (2022). Impacts of Water Bodies on Microclimates and Outdoor Thermal Comfort: Implications for Sustainable Rural Revitalization. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.940482>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: Microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00081-6)
- Fintikakis, N., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, M., Assimakopoulos, D. N., Fintikaki, M., Albanis, G., Papadimitriou, K., Chrysochooides, E., Katopodi, K., & Doumas, P. (2011). Bioclimatic design of open public spaces in the historic centre of Tirana, Albania. *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.12.001>
- Gallardo, A., Palme, M., Lobato-Cordero, A., Beltrán, R., & Gaona, G. (2016). Evaluating Thermal Comfort in a Naturally Conditioned Office in a Temperate Climate Zone. *Buildings*, 6(3), 27. <https://doi.org/10.3390/buildings6030027>
- Givoni, B., Noguchi, M., Saaroni, H., Pochter, O., Yaakov, Y., Feller, N., & Becker, S. (2003). Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*, 35(1), 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00082-8)
- Hamidah, N., Rijanta, R., Setiawan, B., & Marfai, Muh. A. (2017). "Kampung" as a Formal and Informal Integration Model (Case Study: Kampung Pahandut, Central Kalimantan Province, Indonesia). *Forum Geografi*, 31(1), 43–55. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v31i1.3047>
- Johansson, E., & Emmanuel, R. (2006). The influence of urban design on outdoor thermal comfort in the hot, humid city of Colombo, Sri Lanka. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 119–133. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0047-6>



- Kim, G., & Lee, G. (2024). Validation of CFD models of urban microclimates under high temperature and humidity conditions during daytime heatwaves in dense low-rise areas. *Building and Environment*, 266, 112087. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112087>
- Kim, J. Y., Park, C. Y., Lee, D. K., Yun, S. H., Hyun, J. H., & Kim, E. S. (2024). The cooling effect of trees in high-rise building complexes in relation to spatial distance from buildings. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105737>
- Klemm, K. (2007). *Application of Numerical Simulation in Assessment of Microclimatic Condition in Urban Areas* [Paper Conference]. Proceedings of Building Simulation 2007: 10th Conference of IBPSA, 1130–1145. <https://doi.org/10.26868/25222708.2007.679>
- Liao, M.-C., Sung, W.-P., & Chen Shi, Q.-Q. (2024). Comparing Small Water Bodies' Impact on Subtropical Campus Outdoor Temperature: Measured vs. Simulated Data. *Buildings*, 14(5), 1288. <https://doi.org/10.3390/buildings14051288>
- Liu, Z., Li, J., & Xi, T. (2023). A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings*, 13(12), 3050. <https://doi.org/10.3390/buildings13123050>
- Mahmoud, A. H. A. (2011). Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions. *Building and Environment*, 46(12), 2641–2656. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.025>
- Mandić, L., Đjukić, A., Marić, J., & Mitrović, B. (2024). A Systematic Review of Outdoor Thermal Comfort Studies for the Urban (Re)Design of City Squares. *Sustainability*, 16(12), 4920. <https://doi.org/10.3390/su16124920>
- Montazeri, H., & Blocken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.012>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Murakami, S. (2006). Environmental design of outdoor climate based on CFD. *Fluid Dynamics Research*, 38(2–3), 108–126. <https://doi.org/10.1016/j.fluiddyn.2004.10.006>
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. H. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: A study in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 101(1), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.004>
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35(1), 95–101. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00084-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00084-1)
- Pamungkas, L. S., Kusumawanto, A., & Marsoyo, A. (2024). Outdoor Thermal Comfort and Sustainability of Urban Village Life in The Small Ancient City at Tropic Area Yogyakarta, Indonesia: Approach with ENVI-Met. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 36(3), 130–143. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.36.3.33281>
- Perini, K., & Magliocco, A. (2014). Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003>
- Picot, X. (2004). Thermal comfort in urban spaces: Impact of vegetation growth. Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings*, 36(4), 329–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.044>
- Rochmania, W., & Sukmawati, A. M. (2024). Eksistensi Kampung Kota Melalui Pemberdayaan Masyarakat: Studi di Kampung Ondomohen, Kota Surabaya. *Journal Of Plano Studies*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.36982/jops.v1i1.3992>
- 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>
- Setaih, K., Hamza, N., & Townshend, T. (August 26–28, 2013). *Assessment Of Outdoor Thermal Comfort In Urban Microclimate In Hot Arid Areas* [Paper Conference]. Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.2521>
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)
- Suryantara, B. K., Suryabrata, J. A., & Suryandono, A. R. (2019). The Effect of Vegetation in Various Canyon Geometry on The Thermal Comfort of Jakarta. *Journal of Architectural Research and Design Studies*, 2(2), 80–87. <https://doi.org/10.20885/jars.vol2.iss2.art9>
- Synnefa, A., Karlessi, T., Gaitani, N., Santamouris, M., Assimakopoulos, D. N., & Papakatsikas, C. (2011). Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate. *Building and Environment*, 46(1), 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.014>
- Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>

Taleghani, M., Tenpierik, M., van den Dobbelenstein, A., & Sailor, D. J. (2014). Heat in courtyards: A validated and calibrated parametric study of heat mitigation strategies for urban courtyards in the Netherlands. *Solar Energy*, 103, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.033>

Uno, T., Oka, D., Hokoi, S., Ekasiwi, S. N. N., & Majid, N. H. A. (2018). Thermal Sensation and Comfort in Hot and Humid Climate of Indonesia. In T. Kubota, H. Rijal, H. Takaguchi (Eds.), *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2_13

van den Bosch, M., & Ode Sang, Å. (2017). Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health – A systematic review of reviews. *Environmental Research*, 158, 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.040>

Wang, Y., & Su, T. (2025). The Impacts of Friendly Designs on the Long-Term Sustainability of Modern Urban Parks. *Sustainability*, 17(3), 830. <https://doi.org/10.3390/su17030830>

Zhang, A., Li, W., Xia, C., & Guo, H. (2025). The impact of urban landscape patterns on land surface temperature at the street block level: Evidence from 38 big Chinese cities. *Environmental Impact Assessment Review*, 110, 107673. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107673>