

Herramienta pedagógica para educar ante el efecto de isla de calor urbana

Pedagogical Tool for Education on the Urban Heat Island Effect

DOI: <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.36.1.2026.06>

Recibido: 11 de diciembre de 2025 Aceptado: marzo 7 de 2026

Alejandro Guerrero¹ 
alejandro.torrenegra@correounivalle.edu.co

María Verónica Machado Penso² 
mmpenso@hotmail.com; mmachado@utem.cl

Elizabeth Parra Correa³ 
elizabethparra.arq@gmail.com

Andrés Felipe de los Ríos⁴ 
andres.delosrios@correounivalle.edu.co

Santiago Barahona⁵
sbarahonas@unal.edu.co

Para citar este artículo:

Guerrero, A., Machado Penso, M. V., Parra Correa, E., de los Ríos, A. F., & Barahona, S. (2026). Herramienta pedagógica para educar ante el efecto de isla de calor urbana. MODULO ARQ CUC, 36(1), 123-155. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.36.1.2026.06>

1 Director del centro de investigación territorio, construcción y espacio (CITCE). Profesor Titular. Escuela de Arquitectura. Facultad de Artes Integradas. Universidad del Valle, Cali, Colombia. Arquitecto, Universidad Autónoma del Caribe. Barranquilla (Colombia). Doctor en Arquitectura, Universidad del Zulia. Maracaibo (República Bolivariana de Venezuela). Magister en Gerencia de Proyectos de I+D, Universidad Rafael Belloso Chacín. Maracaibo (República Bolivariana de Venezuela). Profesor e investigador de la Escuela Arquitectura.

2 Académica del Departamento de Planificación y Ordenamiento Territorial, Universidad Tecnológica Metropolitana UTEM. Arquitecta venezolana, investigadora y artista espacial. Su formación incluye un Máster en Tecnologías Avanzadas en Construcción Arquitectónica por la Universidad Politécnica de Madrid y otra Maestría en Filosofía por la Universidad del Norte de Colombia con Doctorado y Posdoctorado en Arquitectura de la Universidad del Zulia. Tiene una destacada trayectoria en el cruce entre pedagogía, arte, arquitectura, ecología y pensamiento crítico.

3 La.B Arquitectura más bioclimática. Arquitecta con maestría en Bioclimática y amplia experiencia en investigación y consultoría en diseño ambiental. Ha participado en proyectos urbanos y arquitectónicos enfocados en el análisis climático, confort térmico, iluminación natural y estrategias de sostenibilidad en entornos tropicales. Su trabajo integra herramientas paramétricas y simulación ambiental para la toma de decisiones en diseño. Actualmente desarrolla proyectos y procesos formativos orientados a la comprensión del clima, el territorio y su influencia en el habitar humano.

4 Profesor Asociado. Escuela de Arquitectura. Facultad de Artes Integradas. Universidad del Valle. Arquitecto Universidad del Valle. Estudiante de Doctorado en Diseño y Creación de la Universidad de Caldas. Magíster en Arquitectura de la Universidad de San Buenaventura. Especialista en Interventoría de Proyectos de la Universidad Nacional. Investigador en temas asociados a los procesos de descripción viso-espacial en la arquitectura y sus implicaciones de carácter teórico, técnico y estético, donde se relaciona los medios de expresión y fabricación digital como aproximación y exploración proyectual.

5 Universidad Nacional de Colombia. Arquitecto egresado de la Universidad Nacional de Colombia – Medellín 2022. Modelador energético de edificaciones. Profesionalmente ha asesorado proyectos residenciales y de uso comercial respecto a la mejora de condiciones de habitabilidad y consumo, y la verificación de su desempeño con entes certificadores. Académicamente, ha participado en investigaciones enfocadas en el desarrollo de alternativas pasivas de mejora de confort térmico, y métodos de análisis de valores lumínicos y térmicos de espacios.



Resumen

La isla de calor urbana (ICU), aun cuando constituye uno de los fenómenos térmicos más estudiados, puede entenderse como la manifestación localizada de una reconfiguración climática cuya complejidad permanece mayormente invisibilizada en la experiencia cotidiana, dificultando reconocerla como resultado directo de decisiones urbanas. Esta investigación desarrolla y evalúa una herramienta digital interactiva capaz de traducir los procesos térmicos urbanos a una experiencia cognitiva situada. El objetivo es integrar modelación tridimensional, termografías, simulación microclimática y mediación sensorial para favorecer la comprensión causal del efecto de isla de calor urbana. Metodológicamente, se combinaron análisis satelital de vegetación, registros térmicos in situ, construcción de un gemelo digital en Unreal Engine, modelado algorítmico de evapotranspiración e interfaz web que permite modificar variables urbanas y visualizar sus efectos térmicos en tiempo real. La prueba piloto evidenció comprensión causal entre presencia vegetal, decisiones materiales y comportamiento térmico, indicando que la experiencia inmersiva posibilita reconocer la agencia climática de las plantas frente a superficies de alta inercia. La herramienta funciona como mediación cognitiva que desnaturaliza el calor urbano y habilita criterios para mitigación y educación climática situada. Los resultados proyectan la escalabilidad hacia distintos contextos educativos y comunitarios, contribuyendo a la formación de criterios urbanos sensibles a la habitabilidad térmica y a la incorporación de especies vegetales en estrategias de adaptación climática.

Palabras clave: Educación, Antropoceno, Sostenibilidad, Termografías, Microclima, Isla Urbana de Calor (ICU).

INTRODUCCIÓN

El acelerado proceso de urbanización en el contexto del Antropoceno ha intensificado los desbalances térmicos y climáticos en las ciudades, generando configuraciones materiales y energéticas que exacerban la vulnerabilidad socioambiental. Esta tendencia, responsable

Abstract

Although the urban heat island (UHI) is one of the most widely studied thermal phenomena, it can be understood as a localized manifestation of climatic reconfiguration whose complexity remains largely invisible in everyday experience. This invisibility hinders its recognition as a direct outcome of urban planning decisions. This research develops and evaluates an interactive digital tool capable of translating urban thermal processes into situated cognitive experience. The objective is to integrate 3D modeling, thermographic imaging, microclimatic simulation, and sensory mediation to promote a causal understanding of the urban heat island effect. Methodologically, the study combines satellite vegetation analysis, in situ thermal recordings, the construction of a digital twin in Unreal Engine, algorithmic modeling of evapotranspiration, and a web-based interface that allows users to modify urban variables and visualize their thermal impacts in real time. The pilot test revealed a clear causal comprehension between vegetation presence, material decisions, and thermal behavior, suggesting that immersive experiences enable the recognition of the climatic agency of plants compared to high-inertia surfaces. The tool acts as a cognitive mediator that denaturalizes urban heat and supports criteria for climate mitigation and situated climate education. The results indicate the potential for scalability in diverse educational and community contexts, contributing to the development of urban planning criteria that are sensitive to thermal habitability and the integration of vegetation in climate adaptation strategies.

Keywords: Education, Anthropocene, Sustainability, Thermography, Microclimate, Urban Heat Island (UHI).

de aproximadamente el 70 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2022), ha implicado en el caso colombiano un incremento del 30 % en la demanda energética entre 2010 y 2018, asociado principalmente al acondicionamiento térmico de espacios interiores (Giraldo et al., 2021). Estas cifras sitúan al entorno construido como uno de

los principales responsables del consumo energético —62 % de la energía final y de las emisiones asociadas 55 % del total (Anderson, Wulfhorst & Lang, 2015), haciendo visible no sólo la magnitud del fenómeno, sino también la necesidad de desarrollar mediaciones cognitivas capaces de traducir este metabolismo energético en comprensión pública situada.

Entre los factores estructurales de esta transformación, la mineralización progresiva del paisaje urbano resultado de la sustitución sistemática de coberturas vegetales por superficies de alta inercia térmica como el concreto, el asfalto o materiales compuestos ha reconfigurado de manera irreversible el metabolismo climático urbano. Este proceso, además de incrementar la absorción y retención de radiación solar, reduce de forma crítica la capacidad de enfriamiento pasivo derivada de la evapotranspiración y del sombreado arbóreo, produciendo gradientes térmicos que alteran la dinámica atmosférica local y desplazan umbrales de habitabilidad para diversas especies (Santamouris & Asimakopoulos, 1996.; Kaaviya & Senthil, 2025; Quadros & Mizgier, 2023). La manifestación perceptual de esta acumulación térmica se canaliza a través de la termoecepción, mecanismo sensorial que no logra traducir su complejidad causal y que, en consecuencia, mantiene invisibilizada la producción térmica urbana (Tafalla, 2019). Esta invisibilización, lejos de ser un fenómeno meramente físico, revela la ausencia de dispositivos culturales y pedagógicos capaces

de mediar entre procesos termodinámicos y experiencia ciudadana, evidenciando así la necesidad de desarrollar herramientas de comprensión pública del fenómeno.

En Colombia, esta configuración térmica adquiere especial relevancia en ciudades tropicales densamente construidas, donde la pérdida acelerada de vegetación y la expansión de superficies impermeabilizadas han sido ampliamente documentadas. Estudios en Barranquilla evidencian incrementos térmicos de hasta 5 °C en sectores centrales respecto a zonas con mayor presencia vegetal (Villadiego, 2014); en Medellín, se registran promedios de 4,81 °C a media mañana (Soto-Estrada, 2019); y en Cali, se constata una correlación directa entre el cambio de uso del suelo y la intensificación térmica urbana (Preciado & Aldana, 2011). Estos patrones confirman que, aún con esfuerzos puntuales de mitigación, la tendencia estructural hacia la mineralización urbana persiste, reforzada por modelos de desarrollo que subvaloran los aportes de las plantas. Ante esta persistencia, no basta comprender el fenómeno desde el registro técnico: se vuelve necesario traducir estas transformaciones en experiencias perceptuales capaces de activar conciencia pública sobre la relación entre materialidad urbana y comportamiento térmico.

A pesar de estos esfuerzos, las ciudades colombianas continúan sumergidas en procesos de mineralización que, día tras día, producen la desaparición de la capa vegetal y degradan

las condiciones de habitabilidad del espacio exterior. La vegetación, más que un recurso paisajístico, constituye un elemento estructural para el bienestar urbano en contextos tropicales, dado que su presencia regula dinámicas ambientales decisivas para la calidad de vida cotidiana. Sin embargo, esta función climática rara vez se traduce en comprensión pública, lo que evidencia una brecha entre los procesos biofísicos que sostienen la habitabilidad y la percepción social de su relevancia, reforzando la necesidad de dispositivos formativos que tornen visible este vínculo.

En la última década, las ciudades colombianas han logrado avances representativos en la implementación de infraestructura verde urbana (IVU)⁶ para mitigar la degradación derivada de la pérdida de vegetación. Entre los beneficios más destacados se encuentran la mejora de la calidad del aire, la gestión de aguas pluviales y la conservación de la biodiversidad, a lo que se suma la capacidad de ciertos sistemas de ecologización horizontal para reducir los efectos térmicos asociados a las islas urbanas de calor (ICU). En particular, las cubiertas verdes actúan como filtros solares que disminuyen la absorción de calor de los materiales constructivos y aportan enfriamiento a través del sombreado y la evapotranspiración (Kaaviya & Senthil, 2025). Sin embargo, estos aportes, aunque empíricamente demostrados,

no siempre se traducen en comprensión pública ni en apropiación ciudadana de su dimensión climática. Cabe señalar que, si bien la literatura técnica utiliza el término “infraestructura verde urbana” para referirse a estos elementos, en adelante se emplearán expresiones que reconozcan la condición viva y agente de las plantas, evitando su reducción a mera función instrumental dentro del metabolismo urbano.

No obstante, incluso en contextos donde se han incorporado prácticas de convivencia con las plantas con beneficios demostrables en regulación térmica, gestión hídrica y conservación ecológica, persiste una brecha crítica: la ausencia de dispositivos formativos capaces de traducir estos procesos biofísicos en conocimiento socialmente compartido y operativamente aplicable. En otras palabras, el aporte climático de las especies vegetales se ve limitado por la carencia de metodologías de mediación que vinculen la dimensión cuantitativa de los datos ambientales con experiencias perceptuales inmersivas, capaces de hacer visible —y comprensible— la complejidad de las interdependencias entre materialidad, clima y bienestar urbano. Tal ausencia no es únicamente educativa, sino también política, en la medida en que invisibiliza la agencia climática de las plantas y dificulta la construcción de criterios urbanos sensibles a su condición viva.

⁶ Se utiliza el término infraestructura verde urbana (IVU) por es el término utilizado por la razón instrumental que rige el conocimiento de este tipo de investigaciones, sin embargo, los autores de esta investigación están en contra del uso de esta terminología, ya que se está objetualizando a una especie viva que ha sido reconocida como sujeto derecho en diferentes ámbitos jurídicos. Se tratará de limitar su uso en lo adelante, ya que no postulamos por las jerarquías entre especies, ni por la cosificación de los procesos materiales. Se sustituirá el IVU por plantas, especies vegetales o frases semejantes

Como plantea [Sterling \(2001\)](#), la educación para la sostenibilidad requiere trascender la mera transmisión de información y activar procesos de aprendizaje transformadores que integren lo cognitivo, lo afectivo y lo experiencial. En esta misma línea, [Kolb \(2015\)](#) y [Ayala Pezzutti et al. \(2020\)](#) subrayan que las experiencias inmersivas, al implicar activamente la percepción sensorial, facilitan la comprensión profunda de fenómenos complejos como el cambio climático urbano. Desde la perspectiva de la visualización científica, [McCormick et al. \(1987\)](#) y [Borgdorff \(2012\)](#) sostienen que la traducción estética de datos técnicos puede catalizar nuevas formas de conocimiento, permitiendo que la información se integre en la experiencia vivida y genere conciencia crítica. Estos aportes permiten entender que la representación termodinámica tiene función informativa y formativa, al habilitar mediaciones cognitivas que articulan percepción sensorial, agencia vegetal y comprensión causal del microclima urbano.

En paralelo, investigaciones recientes en el campo de la interacción humano-computadora (HCI) han destacado que la eficacia de herramientas digitales complejas, como los gemelos digitales depende en gran medida de su usabilidad para usuarios no expertos. Estudios recientes señalan que los gemelos digitales deben diseñarse desde enfoques centrados en el usuario que consideren los requisitos cognitivos de interacción, facilitando la comprensión de información compleja mediante interfaces

intuitivas y explorables ([Palmer, 2025](#)). De manera complementaria, investigaciones sobre entornos educativos basados en realidad virtual han demostrado que la evaluación de métricas de experiencia de usuario (UX), como facilidad de uso, comprensión de tareas, satisfacción del usuario y capacidad de completar acciones dentro del entorno virtual, constituye un componente clave para validar la eficacia pedagógica de estas plataformas ([Rangarajan et al., 2024](#); [Alnuaimi & Awad, 2025](#)). En este contexto, diversos autores subrayan que las métricas de usabilidad y la evaluación de interacción en entornos VR deben adaptarse a las particularidades de los sistemas inmersivos, integrando tanto indicadores de desempeño del usuario como percepciones subjetivas de aprendizaje y experiencia ([Balzerkiewitz, 2024](#)).

Ante esta limitación, se plantea la necesidad de desarrollar herramientas de mediación que integren visualización térmica, modelado ambiental y entornos interactivos capaces de convertir la representación urbano-climática en experiencia cognitiva. Al permitir la manipulación de variables urbanas en entornos virtuales derivados de casos reales —gemelos digitales—, estas mediaciones transforman la modelación computacional en recurso pedagógico situado. Tal aproximación favorece la comprensión de las dinámicas térmicas urbanas al habilitar escenarios de aprendizaje activo, en los que el usuario evalúa en tiempo real las consecuencias de incorporar o eliminar

especies vegetales y otras materialidades, reconociendo su agencia climática y su papel estructural en la configuración del microclima urbano.

En este marco, la presente investigación tiene como propósito diseñar, implementar y evaluar una herramienta pedagógica digital que integre termografías urbanas, modelado tridimensional y arte digital para abordar el efecto de isla de calor urbana desde una mediación cognitiva situada. La propuesta se fundamenta en el cruce entre visualización científica y mediación estética, con el fin de transformar datos ambientales complejos en experiencias sensoriales interactivas que permitan comprender la agencia climática de las plantas y, con ello, incidir en la comprensión pública del fenómeno y en la adopción de prácticas urbanas más sensibles a la habitabilidad térmica.

METODOLOGÍA

La investigación se enmarca en un enfoque aplicado y de carácter mixto orientado al diseño, desarrollo y validación de una herramienta digital interactiva destinada a favorecer la comprensión pública del efecto de isla de calor urbana (ICU). El proceso metodológico se estructuró en cinco fases interdependientes, combinando técnicas cuantitativas para la captura y análisis de datos termoambientales y técnicas cualitativas para la evaluación pedagógica de la experiencia. El núcleo de la

propuesta radica en integrar termografías urbanas, modelado tridimensional (gemelo digital) y simulación térmica con estrategias de mediación sensorial, generando un escenario capaz de manipular variables morfológicas y materiales y visualizar en tiempo real sus repercusiones térmicas, articulando así la dimensión climática con procesos de aprendizaje situados.

Fase 1: Selección y caracterización de casos de estudio

Con el objetivo de disponer de escenarios representativos para el desarrollo y validación de la herramienta, se llevó a cabo un análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) correspondiente a un periodo de diez años (2013–2023). Este índice, calculado a partir de imágenes satelitales, permite cuantificar la presencia vegetal y contrastar con superficies densamente construidas, proporcionando una aproximación comparativa sobre la disminución de especies y el incremento de materialidades mineralizadas. Su utilización habilitó la caracterización termoambiental de los casos y, posteriormente, se convirtió en un insumo clave para construir visualizaciones capaces de hacer perceptible la distribución de vegetación como variable activa en la generación de microclimas urbanos.

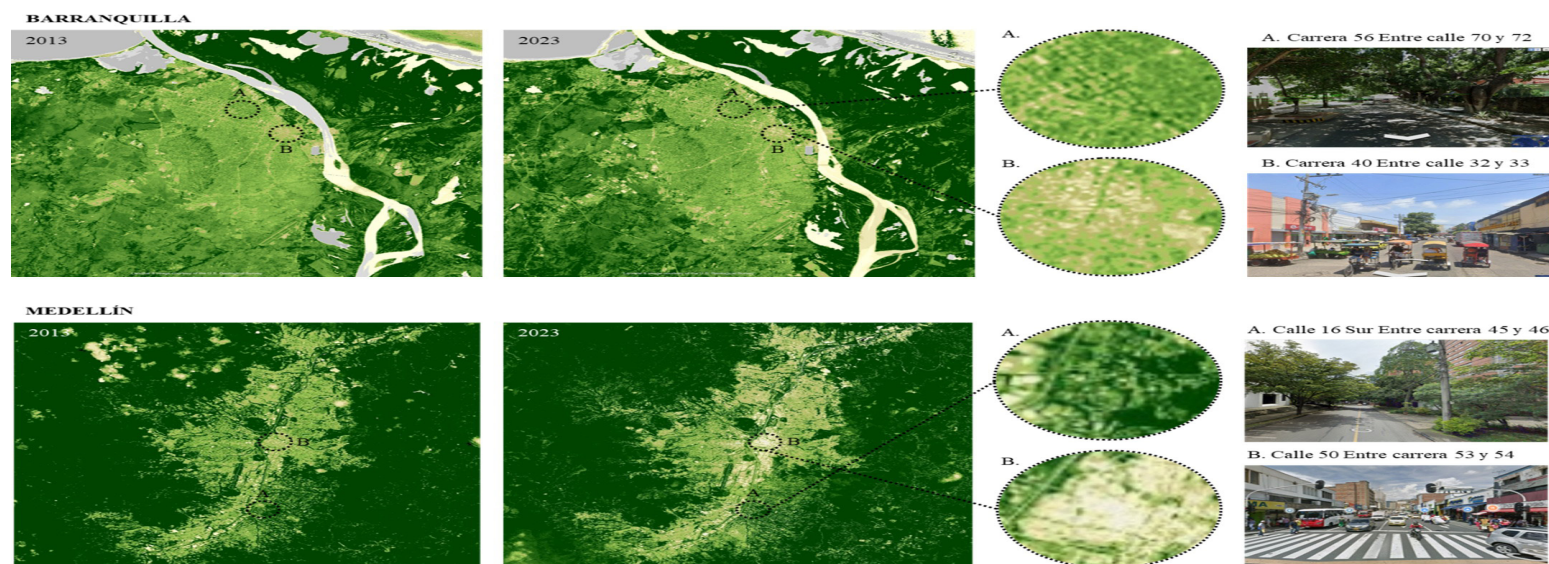
Se establecieron dos criterios climáticos para garantizar la calidad y comparabilidad de las imágenes satelitales, suelo seco y cielo

despejado, cuya identificación se realizó mediante la consulta de datos meteorológicos históricos de la plataforma Meteostat (<https://meteostat.net>). Posteriormente, se recurrió a Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com>) de versión gratuita de acceso a datos y las condiciones de captura de imágenes: del programa Copernicus, incluyendo a Sentinel-1 y Sentinel-2 que produce información multispectral para el análisis territorial y ambiental. Las imágenes que se capturaron corresponden a una escena del satélite Sentinel las cuales se actualizan periódicamente, y son consultadas seleccionando el área de interés, rango temporal y porcentaje de nubosidad. Estos criterios aseguran la precisión en la representación térmica y, al mismo tiempo, generan insumos visuales confiables cuya posterior traducción en el gemelo digital

posibilita que la percepción del contraste térmico opere como elemento estructural del aprendizaje situado.

El análisis resultante permitió seleccionar dos calles en tres ciudades colombianas (Medellín, Cali y Barranquilla), con configuraciones urbanas contrastantes en términos de materialidad superficial, niveles de sombreado y presencia de especies arbóreas. Estos contrastes constituyeron los casos de estudio para la implementación del modelo digital debido a su diversidad térmica, lo que posibilita la comparación perceptual entre escenarios urbanos con distintas relaciones entre mineralización y presencia vegetal; este aspecto resulta fundamental para construir experiencias pedagógicas orientadas a reconocer la agencia climática de las plantas.

Figura 1. Imágenes satelitales NDVI y selección de casos de estudio en tres ciudades Colombianas.



Nota: A. Sectores con mayor presencia de vegetación. B. Sectores con mayor mineralización del suelo.
Fuente: Sentinel Hub (2024).

Fase 2: Captura y procesamiento de datos térmicos

Una vez seleccionadas las dos áreas de estudio para cada ciudad, se llevaron a cabo recorridos peatonales sistemáticos con el propósito de generar un registro térmico y botánico de alta precisión. Este levantamiento contempló dos acciones principales y constituyó un insumo decisivo para la construcción del gemelo digital, en la medida en que permitió documentar las variaciones térmicas asociadas a materialidades mineralizadas y a la presencia de especies vegetales, elemento fundamental para su posterior traducción perceptual dentro de la herramienta pedagógica:

Caracterización arbórea. Esta acción permitió documentar la diversidad de especies vegetales presentes y establecer correlaciones potenciales entre morfología de copa, densidad foliar y capacidad de enfriamiento climático. Más allá del registro botánico, este insumo fue decisivo para modelar la agencia térmica diferenciada de las plantas dentro del gemelo digital, permitiendo que los usuarios comparen, mediante experiencia inmersiva, los efectos climáticos asociados a distintas configuraciones vegetales.

Registro termográfico. La captura de imágenes térmicas se realizó empleando una cámara termográfica portátil HIKMICRO B21L, seleccionada por su alta resolución y capacidad para mediciones precisas en campo. Las termografías fueron tomadas en horario de mediodía, bajo condiciones de cielo despejado

y suelo seco, con el propósito de maximizar la incidencia de radiación solar y, por ende, el contraste térmico entre diferentes materiales y superficies. Este contraste constituye un insumo clave para la posterior visualización en el entorno digital, en la medida en que permite distinguir perceptualmente gradientes térmicos y comprender su relación con la materialidad urbana dentro de la experiencia inmersiva educativa.

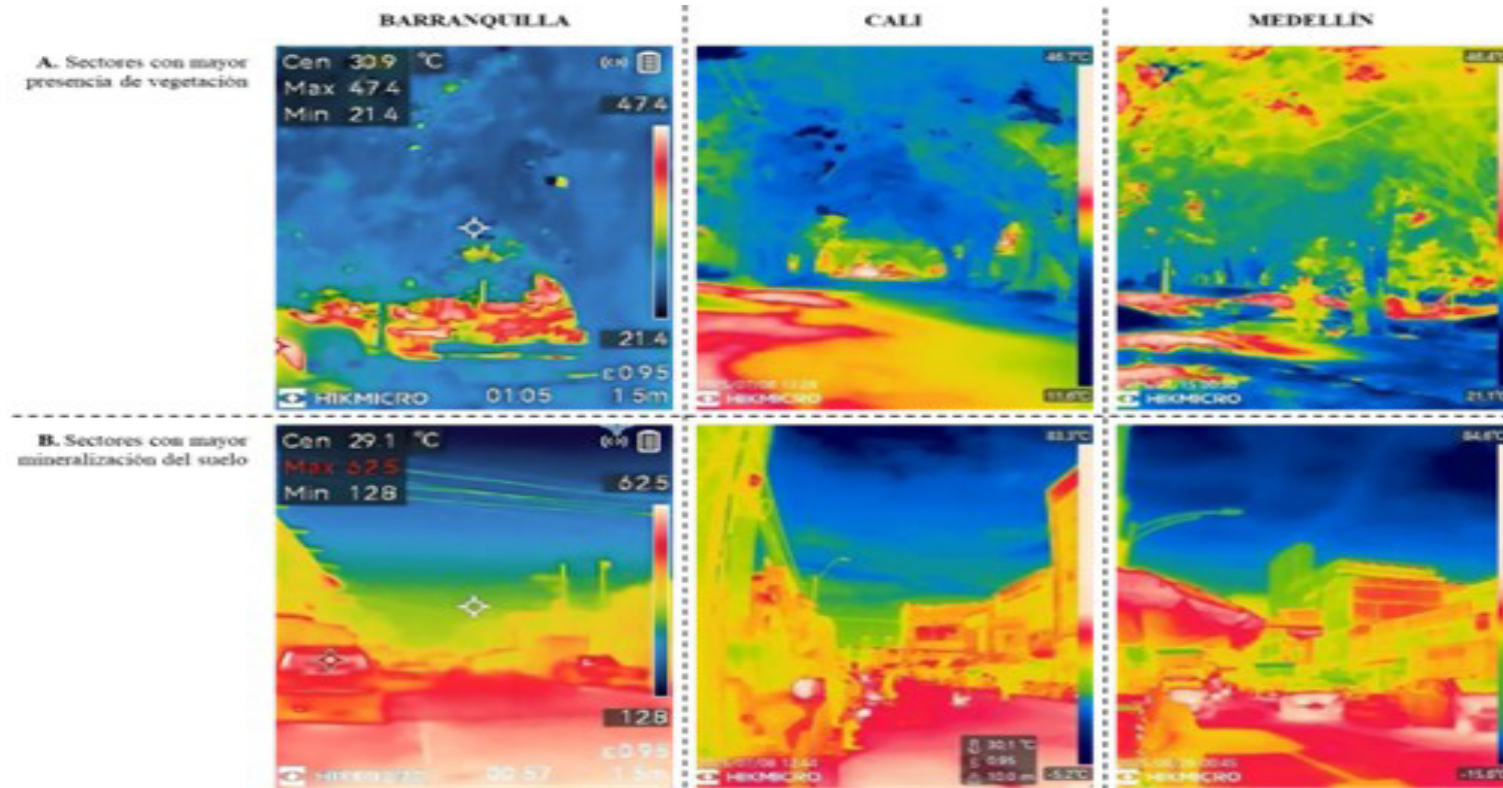
La correcta calibración de la cámara termográfica fue validada previamente y, de manera simultánea, se compararon las fotografías con mediciones puntuales en sitio mediante un sensor infrarrojo, ajustando la distancia y el material del objeto medido. Esto permitió garantizar la fidelidad de los valores de temperatura superficial registrados. Adicionalmente, las imágenes se optimizaron en términos de calidad visual mediante el software de escritorio provisto por el fabricante, lo que mejoró la legibilidad de los gradientes térmicos y facilitó su interpretación. Este procesamiento constituyó un insumo determinante para su posterior integración en el entorno digital inmersivo, donde la legibilidad de los gradientes térmicos resulta esencial para la comprensión del comportamiento térmico de las materialidades urbanas durante la experiencia educativa interactiva.

El conjunto de datos resultante permitió elaborar un mapa térmico de alta resolución para cada caso de estudio, constituyendo la base para las etapas posteriores de modelado tridimensional y desarrollo del gemelo digital. Más allá de ser un

insumo técnico, este mapa representa el primer nivel de traducción del fenómeno térmico hacia su visualización educativa, pues posibilita

construir una representación termoambiental susceptible de ser explorada perceptualmente dentro de la experiencia inmersiva.

Figura 2. Capturas termográficas de los dos sectores seleccionados para cada ciudad.



Fuente: propia de los autores

Fase 3: Creación e implementación del gemelo digital interactivo

A partir de la cartografía térmica generada en las fases previas y de la información morfológica detallada de los entornos seleccionados, se construyeron gemelos digitales mediante los programas SketchUp y Rhinoceros, integrando datos provenientes de cartografía digital, imágenes satelitales de alta

resolución, fotografías de archivo y registros propios obtenidos in situ. La construcción de estos modelos permitió reproducir la morfología urbana con precisión geométrica y, a partir de ello, constituyó la base para su traducción termo-visual dentro del gemelo digital, habilitando escenarios inmersivos en los que el usuario explora la relación entre materialidad urbana y comportamiento térmico.

Estos modelos incluyeron una capa específica de información térmica derivada tanto de las imágenes satelitales procesadas como de las termografías capturadas, junto con atributos relativos a la materialidad de las superficies, la presencia vegetal y la morfología urbana. En los sectores con plantas, se incorporaron las especies arbóreas identificadas en terreno, modeladas en función de su forma, altura, densidad foliar y distribución espacial, con el fin de representar su comportamiento térmico diferencial dentro del entorno virtual. En los sectores donde no se registró presencia vegetal, la modelación consideró las materialidades urbanas predominantes, reproduciendo fielmente su textura y reflectancia térmica para posibilitar la comparación perceptual de los contrastes termoambientales durante la experiencia inmersiva.

Posteriormente, los gemelos digitales fueron importados y optimizados en el motor Unreal Engine, configurando un entorno virtual inmersivo que posibilita la navegación interactiva en tiempo real. Este gemelo digital se diseñó para integrar simulaciones dinámicas que permiten modificar parámetros urbanos p. ej., sustitución de materiales de pavimento, incorporación o remoción de especies vegetales o implementación de cubiertas y observar de inmediato las repercusiones térmicas de cada decisión material. Con ello, la navegación deja de ser una exploración visual para convertirse en una mediación cognitiva que hace perceptible

la relación causal entre materialidad urbana y comportamiento térmico.

Para potenciar la percepción multisensorial, se incorporaron paisajes sonoros grabados en cada caso de estudio, siguiendo criterios de captura que preservarán las características acústicas del lugar. La interacción se implementó mediante gafas de realidad virtual y controles tipo joystick, con proyección simultánea en pantalla, lo que facilitó tanto la exploración individual como la discusión colectiva. La integración del componente sonoro contribuyó a reconstruir la atmósfera urbano-climática de los casos y amplificó la experiencia perceptual, evitando una lectura puramente visual y favoreciendo una aproximación más situada a las condiciones de habitabilidad térmica.

De forma complementaria, se integraron panoramas 360° activables mediante códigos QR y se desarrolló una plataforma web que centralizó los contenidos gráficos, térmicos y tridimensionales, garantizando su accesibilidad y permanencia. Esta plataforma actuó como sistema de visualización avanzada y, simultáneamente, como laboratorio pedagógico experimental en el que los usuarios podían manipular variables urbanas y explorar de manera situada las interdependencias entre materialidad, presencia vegetal y comportamiento microclimático, lo que favoreció una comprensión causal del fenómeno más allá de su mera observación.

Figura 3. Realidad virtual y gemelos digitales.



Fuente: propia de los autores

Fase 4: Modelado algorítmico y simulación de enfriamiento vegetal

Esta fase se orientó a integrar la morfología urbana con las dinámicas microclimáticas asociadas a la presencia de especies arbóreas. Para ello, se empleó la simulación convencional de UTCI, la cual no contempla el efecto de enfriamiento derivado de la evapotranspiración y, por tanto, subrepresentada la agencia climática de las plantas. En paralelo, se desarrolló un método específico para calcular el potencial de enfriamiento de las especies en los espacios situados bajo su copa, incorporándolo al final de la simulación convencional para

generar imágenes de microclimas urbanos capaces de evidenciar el impacto adicional de la evapotranspiración. Este procedimiento se estructuró en los siguientes cuatro componentes principales:

- 1) Desarrollo del modelo paramétrico y del algoritmo. Se utilizó el entorno de modelado visual Grasshopper (plug-in de Rhinoceros 3D) en combinación con los complementos Ladybug Tools (Ladybug y Honeybee) para la simulación ambiental. El modelo tridimensional incorporó las geometrías derivadas de la cartografía térmica (Fases 1 y 2), permitiendo asignar propiedades materiales (albedo, emisividad,

conductividad térmica) y condiciones de contorno climáticas específicas para cada caso de estudio. El algoritmo desarrollado permitió la variación interactiva de parámetros urbanos —como la presencia o ausencia de especies vegetales, pavimentos de alta reflectancia o implementación de cubiertas— y la visualización inmediata de sus efectos térmicos en el espacio simulado, haciendo posible que estas transformaciones sean experimentadas pedagógicamente como relaciones causales entre decisiones materiales y comportamiento microclimático.

2) Integración de parámetros de evapotranspiración vegetal. El modelo incorporó coeficientes de evapotranspiración específicos para especies arbóreas nativas, obtenidos de literatura técnica y bases de datos climáticos regionales. Estos coeficientes, expresados en términos de pérdida de calor latente por unidad de área foliar, fueron integrados en el balance energético superficial del modelo para simular el enfriamiento inducido por la presencia

vegetal. Con ello, el gemelo digital representó las formas de presencia arbórea y corrigió la subrepresentación del efecto evapotranspirativo en la simulación térmica convencional, lo que permitió comparar perceptualmente su contribución climática y comprender su agencia en la configuración del microclima urbano.

3) Para cada caso de estudio se seleccionaron tres especies arbóreas que cumplieran los siguientes criterios: (a) ser especies nativas comúnmente utilizadas en la ciudad de interés; (b) presentar un porte medio que permitiera su presencia en diversos contextos urbanos; y (c) ofrecer diversidad en la estructura morfológica de la copa (aparasolada, globosa e irregular). Esta selección garantizó representatividad ecológica y permitió modelar diferencias en sombreado y evapotranspiración, haciendo visible en el entorno virtual la contribución climática diferenciada de cada especie y su incidencia en la experiencia pedagógica comparativa.

Tabla 1. Especies seleccionadas y su respectivo potencial de enfriamiento

Nombre Común	Nombre científico	Forma de copa	Altura Máxima (metros)	Radio de Copa	Volumen de aire debajo de copa	Área foliar	Potencial de Enfriamiento (Ls/día)
Almendro	<i>Terminalia catappa</i>	Aparasolada	15	>14	2570	3,25	40-113
Roble Morado	<i>Tabebuia rosea</i>	Globosa	40	>14	5079	4,25	180-280
Olivo Verde	<i>Olea europaea</i>	Oval	15	7	1653	2	23-123
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	Globosa	50	>14	5790	4,5	350-500
Aguacate	<i>Persea americana</i>	Oval	20	11	2200	4,25	200-300

Casco de Vaca	<i>Bauhinia picta</i>	Oval	18	14	2636	3,5	94-283
Mango	<i>Mangifera indica</i>	Semiglobosa	35	>14	4814	4,5	200-300

Nota: Especies seleccionadas para cada ciudad. Barranquilla: Almendro, Olivo verde y Roble morado. Cali: Roble morado, Ceiba y Aguacate. Medellín: Guayacán, Casco de Vaca y Mango.

Fuente: propia de los autores

Estimación de la temperatura en espacios bajo influencia arbórea mediante balance energético. A partir del potencial de enfriamiento estimado para cada especie (expresado en kWh o kcal), de la temperatura del aire de referencia (bulbo seco) y de la radiación solar incidente, se aplicó el siguiente procedimiento, orientado a corregir la subrepresentación del efecto evapotranspirativo en la simulación térmica convencional y permitir comparaciones perceptuales entre escenarios con distinta presencia vegetal:

Conversión del potencial de enfriamiento. Se convierte el potencial de enfriamiento de cada especie arbórea, obtenido en kWh o kcal/día, a vatios (W) o vatios-hora (Wh), según la escala temporal de análisis, empleando las equivalencias:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{kcal} = 4184 \text{ J}$$

Estimación del flujo de calor eliminado (Q). Se determina el flujo de calor eliminado por la copa, considerando dos componentes:

a) Enfriamiento latente debido a la evapotranspiración, calculado como:

$$QET = \lambda \times E$$

Donde:

QET: flujo de calor eliminado por evapotranspiración.

λ = calor latente de vaporización del agua (aprox. $2,45 \times 10^6$ J/kg),

E = tasa de evapotranspiración (kg/s), derivada del coeficiente de cultivo (Kc) y la evapotranspiración de referencia (ET₀) según [Allen et al. \(1998\)](#).

b) Reducción de carga térmica por sombra, estimada a partir de la radiación solar incidente (R_s) y el coeficiente de transmitancia de la copa (τ):

$$QS = (1 - \tau) \times R_s \times A$$

Donde:

A = proyección horizontal de la copa (m²).

El flujo total se obtiene como:

$$Q = QET + QS$$

Donde:

Q_s = flujo de calor eliminado por sombreadamiento

Cálculo de la variación de temperatura del aire bajo la copa mediante la ecuación:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \times C_p}$$

Donde:

Q = flujo de calor eliminado (W),

m = caudal másico de aire bajo la copa (kg/s),

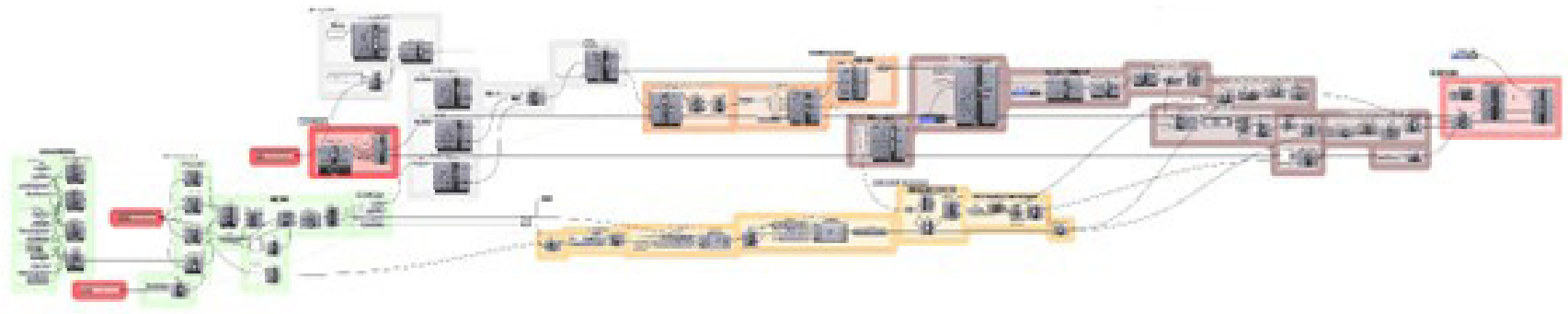
C_p = calor específico del aire (aprox. 1005 J/kg ·K).

Obtención de la temperatura final bajo copa como:

$$T_{\text{bajo copa}} = T_{\text{referencia}} - \Delta T$$

Este método permitió cuantificar, dentro del entorno de simulación, la reducción térmica atribuible a la vegetación en condiciones de máxima carga solar, generando así escenarios comparativos con y sin intervención verde.

Figura 4. Algoritmo simulación UTCI modificada para incorporar el potencial de enfriamiento de la vegetación.

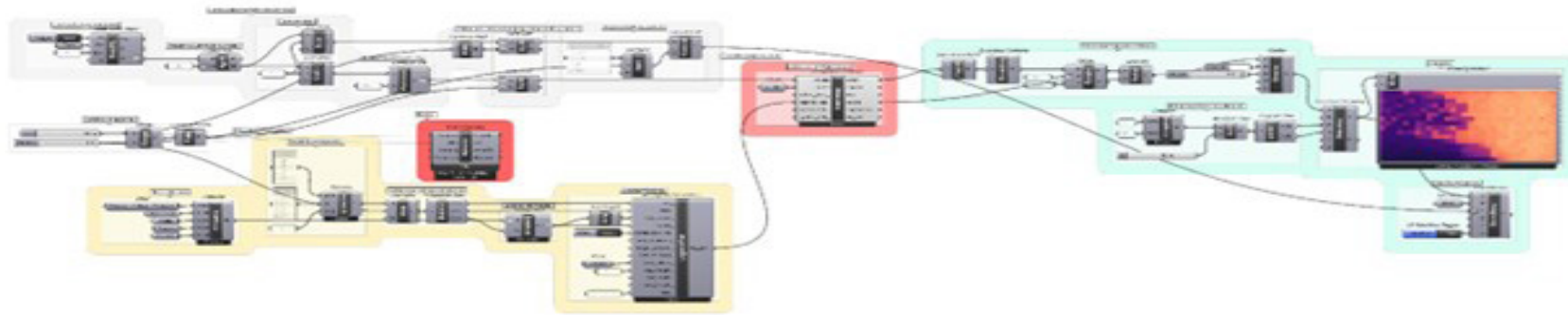


Fuente: propia de los autores

Segmentación de imágenes resultantes. Con el fin de integrar los resultados gráficos de las simulaciones en la página web interactiva, se requirió la segmentación de los espacios simulados en distintas zonas, lo que permitió exportar imágenes en formatos compatibles con la visualización online. Cada caso de estudio

fue simulado iterativamente para examinar la variación de los resultados según ubicación y especie arbórea seleccionada, posibilitando comparaciones perceptuales entre escenarios y facilitando su exploración pedagógica dentro del entorno digital.

Figura 5. Algoritmo segmentación y procesamiento de las imágenes.



Fuente: propia de los autores

En conjunto, esta fase aportó la capacidad de traducir la agencia climática de las especies arbóreas en impactos térmicos modelados, cerrando el ciclo entre captura de datos, representación virtual y análisis predictivo. Esta integración habilita criterios técnicos para la planificación urbana y el diseño de estrategias de mitigación del efecto de isla de calor urbana, y además constituye la base para su mediación pedagógica dentro del gemelo digital, donde dichos impactos pueden ser explorados y comprendidos de manera situada.

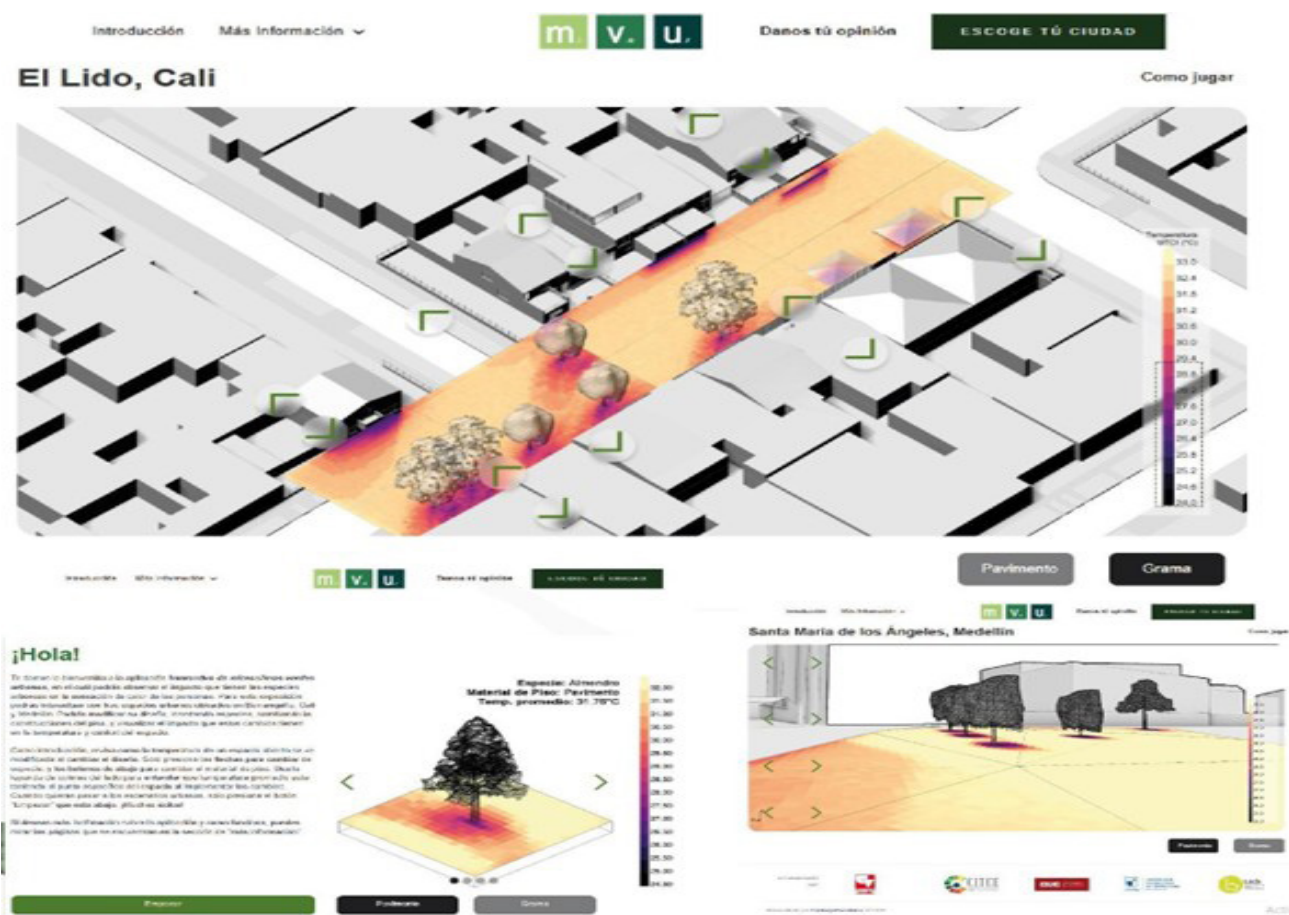
Fase 5: Diseño de la interfaz interactiva

Haciendo uso de una herramienta de diseño web que permitió asegurar la accesibilidad y permanencia digital del proyecto, se desarrolló una interfaz que posibilita al usuario añadir o retirar materialidades urbanas (pavimentos de alta emisividad, cubiertas reflectantes) así como incorporar o eliminar especies vegetales en distintos puntos del entorno.

Estas acciones se reflejan de manera inmediata en el comportamiento térmico del modelo, habilitando una experiencia interactiva desde la cual es posible comprender de forma causal la incidencia que tienen las decisiones materiales sobre el microclima urbano.

La interfaz incorpora una visualización intuitiva que combina mapas de temperatura en falso color, modelado 3D navegable y paneles de información contextual, con el propósito de facilitar la comprensión causal de las relaciones entre materialidad urbana, presencia vegetal y comportamiento microclimático. Esta integración ofrece información y actúa como mediación visual capaz de traducir procesos termodinámicos complejos en experiencias explorables, favoreciendo la construcción de conocimientos situados.

Figura 6. Ejemplo de la interfaz interactiva.

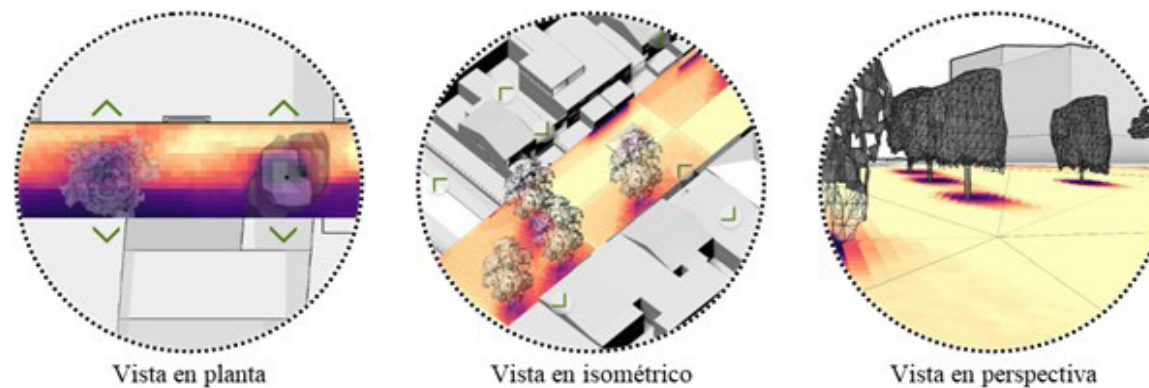


Fuente: propia de los autores

Para cada caso de estudio se desarrollaron tres modos de visualización, vista en planta, en perspectiva y en isométrica, con el propósito de ofrecer diversas lecturas espaciales que amplíen las posibilidades de interpretación del entorno modelado. Esta diversidad visual

busca favorecer la comprensión situada de las particularidades de cada caso y, posteriormente, evaluar comparativamente la efectividad de cada modo de visualización mediante el cuestionario aplicado a los usuarios.

Figura 7. Tipos de visualización propuestos.



Fuente: propia de los autores.

Fase 6: Prueba piloto y evaluación

Para validar la pertinencia pedagógica y técnica de la herramienta, se desarrolló una prueba piloto con un grupo de usuarios seleccionados según el siguiente perfil sociodemográfico descriptivo: estudiantes de Barranquilla y Cali de segundo y décimo semestre de Arquitectura, conformado por una muestra de 60 personas de cuales el 60% mujeres y el 40 % hombres, edad media 17 a 25 años, residencia urbana el 100%, estudiantes de pregrado, y familiaridad con conceptos de cambio climático urbano. Esta heterogeneidad buscó evaluar la mediación de la herramienta

en distintos perfiles cognitivos y examinar su capacidad para favorecer la comprensión situada del fenómeno térmico urbano.

Durante la prueba, los participantes interactuaron con la interfaz en escenarios predefinidos y en configuraciones libres. Se aplicó un cuestionario estructurado orientado a analizar la apropiación cognitiva y la construcción de comprensiones causales derivadas de la interacción con el aplicativo. Este instrumento incluyó preguntas cerradas y abiertas, organizadas en torno a la comprensión del fenómeno térmico urbano, la identificación de variables relevantes para la mitigación (materialidad, presencia

vegetal y sombreado), la capacidad inferencial para relacionar decisiones de diseño con comportamiento térmico y la percepción del potencial pedagógico de la herramienta. Las preguntas combinaron escalas nominales y ordinales con el propósito de obtener indicadores cuantitativos y cualitativos que permitieran distinguir entre facilidad de uso, comprensión declarada, construcción de inferencias causales y motivación hacia transformaciones posibles en el entorno construido. En conjunto, esta estructura metodológica permitió evaluar

simultáneamente la usabilidad del aplicativo y su capacidad para favorecer procesos de pensamiento climático situado.

El análisis de esta información permitió ajustar la usabilidad del aplicativo y evaluar su capacidad para favorecer la comprensión causal y situada de las dinámicas térmicas urbanas, así como para promover reflexiones críticas en torno a las decisiones materiales y sus repercusiones en estrategias de adaptación climática.

Figura 8. Prueba piloto y evaluación de la herramienta interactiva,



Fuente: propia de los autores.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de los resultados obtenidos mediante la integración de modelación térmica, herramienta digital, gemelo digital y experiencia interactiva permite examinar en qué medida la herramienta pedagógica desarrollada contribuye a visibilizar la agencia

climática de las especies vegetales y a traducirla en comprensiones causales significativas para los usuarios. En este sentido, la discusión evalúa la coherencia entre los comportamientos térmicos de los escenarios interactivos y los patrones documentados en los casos de estudio, así como la capacidad de la herramienta para promover aprendizajes críticos sobre la relación

entre decisiones materiales, presencia vegetal y habitabilidad climática en contextos urbanos tropicales.

En este marco, la interpretación de los resultados exige comprender la isla de calor urbana como efecto térmico cuantificable y, al mismo tiempo, como manifestación de dinámicas urbanas complejas donde interacción material, agencia vegetal y racionalidad territorial convergen en la producción de microclimas diferenciados.

La isla de calor urbana, aun cuando constituye uno de los fenómenos térmicos más estudiados en relación con la urbanización contemporánea, se presenta aquí como la expresión localizada de una reconfiguración climática que no puede reducirse a la suma de factores materiales aislados. En efecto, la sustitución sistemática de plantas por superficies de alta inercia térmica no representa únicamente un patrón técnico de urbanización; responde también a una racionalidad territorial que, en el contexto del Antropoceno, consolida un metabolismo urbano intensivo en el que la ciudad consume energía y la reproduce térmicamente. Desde esta perspectiva, la ICU debe comprenderse como una condición producida activamente por las lógicas que organizan la materialidad, la ocupación del suelo y la propia noción de infraestructura urbana, así como por la necesidad de restituir formas de convivencia con las plantas desde relaciones de interdependencia.

En este punto, los resultados obtenidos invitan a examinar no solo lo que la modelación

revela, sino aquello que la experiencia cotidiana suele ocultar: la invisibilidad perceptiva de reconocer la complejidad térmica como producto de decisiones urbanas. Esta discusión, por tanto, no puede limitarse a una verificación técnica del modelo y requiere inscribir la lectura de los hallazgos en la necesidad de mediación sensorial y pedagógica señalada por [Sterling \(2001\)](#) y [Kolb \(2015\)](#). La herramienta más allá de permitir la visualización de comportamientos térmicos en espacios calle, opera como un dispositivo cultural que problematiza cómo la ciudad produce sus propios microclimas y cómo estos, al permanecer fuera del campo perceptual común, se consolidan como condiciones estructurales de vulnerabilidad. Desde esta perspectiva, los resultados adquieren sentido como respuesta situada a los desbalances térmicos que definen las ecologías urbanas del presente.

Visualización científica como traducción termo-sensorial

Uno de los desplazamientos epistemológicos más significativos que emerge de los resultados de esta herramienta radica en la posibilidad de acceder a los usuarios, mediante visualización científica, a procesos termodinámicos que, aunque determinantes en la construcción del microclima urbano, operan convencionalmente en una zona de invisibilidad perceptiva. En este sentido, la termografía y la simulación térmica, integradas en un entorno tridimensional derivado de situaciones urbanas reales, configuran una gramática visual que traduce

termo-sensorialmente la producción térmica de la ciudad y la revela como una operación material, y no como un mero estado atmosférico.

En este sentido, la relación entre visualización científica y mediación estética resulta clave. Como sugieren McCormick (1987) y, desde otra perspectiva, Borgdorff (2012), la visualización consiste en la capacidad de transformar información científica en experiencia perceptible, movilizandodimensiones sensoriales y cognitivas que difícilmente podrían activarse mediante registros textuales o numéricos. En el caso que nos ocupa, la visualización térmica, a partir de patrones térmicos, permite comprender la conformación de los espacios microclimáticos y, con ello, altera el modo en que el calor urbano es interpretado y significado desde una traducción termo-sensorial.

Desde esta perspectiva, la transformación epistemológica se produce por el tránsito entre la abstracción de los datos y la percepción situada del fenómeno. El usuario, al recorrer el entorno digital e interactuar con él, deja de comprender la temperatura como magnitud y comienza a reconocerla como efecto emergente de decisiones urbanas específicas: la presencia o ausencia de especies vegetales, la materialidad superficial o la disposición morfológica de la calle. De este modo, el potencial pedagógico de la herramienta no radica solamente en mostrar lo que ya se sabía sobre la isla de calor; reside, más bien, en posibilitar que el usuario experimente en primera persona, aunque sea en un entorno virtual, la causalidad térmica que

organiza el metabolismo urbano, habilitando condiciones cognitivas orientadas a una toma de decisiones vinculada con estrategias de mitigación climática.

Experiencia inmersiva y aprendizaje transformador

La prueba piloto adquiere relevancia como verificación preliminar de funcionamiento y, simultáneamente, como instancia en la cual la experiencia inmersiva se convierte en un vector de aprendizaje situado capaz de articular percepción, agencia y reflexión climática. Desde la perspectiva del aprendizaje experiencial postulada por Kolb (2015), el conocimiento se construye a partir de la interacción directa con el fenómeno y no únicamente desde su descripción. En este sentido, la incorporación de tecnologías inmersivas, la navegación tridimensional, la herramienta digital desde la cual puede modificar parámetros urbanos y el contraste instantáneo entre escenarios habilita una relación epistemológica distinta con el microclima urbano, dado que el usuario observa en tiempo real, dentro de la simulación, las consecuencias térmicas de sus decisiones materiales y, con ello, activa procesos cognitivos vinculados con la causalidad climática.

Figura 9. Experiencia inmersiva y aprendizaje transformador



Fuente: propia de los autores.

Los resultados del cuestionario refuerzan esta interpretación, especialmente cuando se observa que, al ser consultados sobre si percibieron diferencias significativas en temperatura según la combinación de materiales, presencia vegetal y sombreado, cerca del 90 % afirmó haberlas experimentado. Este dato, si bien puede parecer esperable dadas las características de la herramienta, adquiere relevancia cuando se reconoce que dicha percepción proviene de la interacción directa con los escenarios modelados. En otras palabras, la pregunta dirigida a identificar la percepción de variaciones térmicas cuantifica un nivel de comprensión y confirma que la experiencia inmersiva cumple una función mediadora entre la observación térmica y la comprensión causal del fenómeno, evitando que

la visualización sea asumida únicamente como imagen ilustrativa y asignándole un estatuto cognitivo dentro del proceso de aprendizaje.

Asimismo, cuando se preguntó cuál de las acciones disponibles consideraban más efectiva para mejorar el confort térmico, aproximadamente el 95 % eligió la presencia de especies arbóreas, lo que coincide con la evidencia científica disponible y además indica que la manipulación espacial, es decir la posibilidad de incorporar o eliminar presencia vegetal en tiempo real, se traduce en una comprensión causal concreta, vinculando dicha presencia con la reducción térmica. En este sentido, los resultados sugieren que la experiencia inmersiva opera como una plataforma cognitiva que permite que el usuario interiorice la información a partir de relaciones

visuales directas y que esta interiorización se estructure como conocimiento situado vinculado a decisiones materiales.

Del mismo modo, ante la pregunta sobre si la visualización permitía comprender por qué ciertas soluciones son más eficaces que otras, alrededor del 75 % respondió afirmativamente, lo que puede interpretarse como un indicio de que dicha visualización favorece la construcción de inferencias analíticas orientadas a comparar materialidades, sombreamientos y configuraciones de presencia vegetal. Más del 70 % afirmó, además, que la herramienta les motivó a considerar cambios en su propio entorno o en sus decisiones de diseño; esta respuesta resulta importante porque evidencia su potencial transferencia hacia contextos de acción futura. La pregunta aquí introduce una dimensión que excede la comprensión conceptual, al mostrar una disposición a transformar prácticas urbanas, lo que indica que la mediación visual, más allá de mostrar, moviliza posibles decisiones en el espacio cotidiano de los usuarios y activas formas de agencia climática situada.

Finalmente, la pregunta relativa a la comprensión temática antes y después de la interacción demuestra un aspecto particularmente significativo: aunque una parte de los usuarios afirmaba ser previamente consciente del impacto de pequeñas modificaciones urbanas, más de la mitad reconoció haber incrementado sustantivamente su comprensión tras la experiencia. Esta tensión

entre “conocer” y “comprender” evidencia que el aprendizaje inmersivo profundiza la intelección de relaciones microclimáticas difíciles de captar mediante textualidad o visualización estática. En consecuencia, la aparente familiaridad inicial con el fenómeno no implica necesariamente comprensión de sus causas, lo cual confirma que la experiencia inmersiva, lejos de limitarse a comunicar datos, habilita una reconstrucción perceptual, cognitiva y epistemológica del microclima urbano como resultado directo de decisiones materiales y ambientales, y promueve la comprensión causal más allá de la información previamente declarada.

Gemelo digital como laboratorio pedagógico situado

La integración de datos térmicos en un gemelo digital tridimensional permite comprender la ciudad más allá de su configuración espacial, es decir, como una construcción termodinámica susceptible de ser intervenida. En este sentido, esta parte de la herramienta pedagógica deja de operar como simulador técnico, orientado exclusivamente a la representación gráfica del microclima, para convertirse en un laboratorio pedagógico que posibilita la exploración situada de escenarios urbanos posibles. La modelación tridimensional, en tanto acción dirigida a manipular superficies, materiales y presencia vegetal, se transforma en un medio de aprendizaje que reconecta escala espacial, decisión humana y resultado térmico. Esto

resulta evidente si se considera que, cuando se les formuló la pregunta sobre la facilidad para modificar parámetros con el fin de simular diferentes escenarios, más del 60 % declaró que dicha operación resultaba “muy fácil”, lo cual indica que la accesibilidad técnica no constituye un obstáculo y, por el contrario, favorece la apropiación cognitiva de la modelación como práctica de aprendizaje situada.

Esta dimensión experimental se vuelve especialmente relevante cuando el usuario puede alternar entre configuraciones “con” y “sin” intervención de especies vegetales, observando las variaciones térmicas como consecuencia directa de la alteración morfológica y material del entorno. La posibilidad de contrastar condiciones urbanas mediante experiencia inmersiva, en lugar de recurrir únicamente a descripciones o valores numéricos, refuerza la idea de que la herramienta pedagógica digital, más allá de comunicar datos, produce conciencia ambiental. En otras palabras, la simulación se convierte en un espacio de ensayo donde el usuario experimenta la agencia de su especie homóloga, las plantas, reconociéndolas como sujetos capaces de incidir en el metabolismo térmico urbano.

Este proceso adquiere un valor adicional si se considera que la modelación permite incorporar especies vegetales específicas, simulando sus propiedades térmicas y su efecto diferenciado según morfología de la copa, presencia foliar o distribución espacial. La herramienta, entonces, reproduce una presencia arbórea, lo que favorece

la comprensión estructural del fenómeno y no la mera intuición de que “las plantas enfrían la ciudad”. En suma, la herramienta digital opera como mediación entre la imaginación urbana del usuario y las decisiones que, en el futuro, podrían orientar prácticas de diseño, planificación o intervención climática a escala local. Esto último se aprecia en la respuesta que dieron los usuarios cuando se les preguntó si la experiencia los motivaba a considerar cambios concretos en su entorno o en sus decisiones de diseño: más del 70 % respondió afirmativamente, lo cual sugiere que la modelación activa, además de ser una comprensión analítica, constituye una disposición proyectiva futura hacia transformaciones climáticas en el entorno construido.

La relevancia pedagógica de la herramienta reside, por tanto, en comprender la complejidad estructural del microclima urbano a partir de operaciones directas sobre la forma de la ciudad. De este modo, la herramienta desplaza la simulación de su función tradicional como instrumento técnico hacia un lugar donde la simulación se convierte en práctica reflexiva y, potencialmente, en el inicio de un pensamiento climático aplicado al diseño urbano y orientado a decisiones materiales concretas. Esta práctica reflexiva trasciende la mera observación de patrones térmicos y habilita la elaboración de inferencias vinculadas a la agencia humana sobre la configuración térmica del entorno construido. En consecuencia, la comprensión que emerge de la experiencia supera la descripción

de la ciudad como un espacio afectado por el calor y reconoce que las decisiones urbanas producen condiciones térmicas específicas que, a su vez, pueden transformarse mediante elecciones de diseño, planificación o intervención climática críticas frente a las dinámicas del Antropoceno urbano.

Vegetación, evapotranspiración y enfriamiento situado

La incorporación de especies arbóreas nativas en la simulación no se reduce a reproducir un paisaje vegetal; implica modelar un componente estructural del metabolismo térmico urbano. En la medida en que las ciudades tropicales han sustituido progresivamente coberturas vegetales por materialidades mineralizadas, la presencia arbórea se ha convertido en una forma de agencia que media la radiación solar a través del sombreado e introduce procesos de enfriamiento latente derivados de la evapotranspiración, modificando de forma directa los flujos de calor y la temperatura superficial. La metodología empleada, al combinar la simulación convencional de UTCI con la estimación del enfriamiento producido bajo la copa, permite visualizar el papel activo de las plantas como sujetos capaces de modificar el balance energético del espacio urbano y, por tanto, comprender su contribución climática situada más allá de una valoración estética o paisajística.

Esta dimensión adquiere un sentido pedagógico particular cuando el usuario puede

comparar escenarios “antes” y “después” de la incorporación de especies vegetales, o alternar especies con morfologías de copa diferenciadas, observando variaciones térmicas como respuesta directa a la presencia foliar, la proyección horizontal o la conductividad térmica de las superficies subyacentes. Esta interpretación se ve reforzada por comentarios que señalan la necesidad de observar con mayor precisión las variaciones térmicas producidas por sombra o por diferentes especies, lo cual sugiere que los usuarios, además de aceptar la vegetación como solución intuitiva, buscan comprender su comportamiento diferenciado en términos microclimáticos y construir inferencias causales más precisas respecto de su agencia térmica.

La relevancia metodológica de esta aproximación radica precisamente en que, al incorporar parámetros biofísicos como albedo, emisividad o procesos de enfriamiento latente, la simulación desplaza la presencia vegetal del lugar común de la “solución verde” para situarla dentro de los mecanismos energéticos que sostienen el microclima urbano. Tal como señala la literatura consultada sobre la agencia de las plantas (Bowler et al., 2010; Demuzere et al., 2014; Gill et al., 2007; Shashua-Bar et al., 2010; Velasco & Roth, 2010; Ziter et al., 2019), las especies vegetales deben entenderse como agentes mitigadores y como parte constitutiva del metabolismo térmico urbano, capaces de modificar el confort peatonal, la calidad del aire y la configuración térmica del espacio público. El cruce entre Quadros & Mizgier (2023) y los

resultados del cuestionario revelan que, en el contexto de esta herramienta, la presencia arbórea es percibida, entonces, como sujeto que agencia climáticamente con efectos inmediatos sobre el bienestar térmico y cuyo desempeño puede ser evaluado mediante parámetros energéticos específicos.

Desde esta perspectiva, la simulación de evapotranspiración y el contraste entre configuraciones con distinta presencia vegetal operan como mediación didáctica para comprender que las plantas son especies compañeras y agentes termodinámicos cuya ausencia o presencia reconfigura la habitabilidad del espacio urbano. De ahí que el valor pedagógico de la herramienta reside en permitir que el usuario experimente visualmente la relación entre procesos biofísicos y condiciones microclimáticas, transformando la percepción de la presencia vegetal desde un recurso estético hacia un elemento estructural del metabolismo climático contemporáneo y revelando su agencia climática situada.

De la visualización a la acción urbana: implicaciones para políticas urbanas

La capacidad de la herramienta digital para traducir visualmente procesos térmicos complejos adquiere una dimensión estratégica cuando se considera su posible contribución a la toma de decisiones urbanas. En contextos tropicales donde la degradación vegetal es acelerada y la expansión de superficies de alta inercia térmica configura gradientes

microclimáticos críticos, la visualización científica, además de hacer legible la desigual distribución térmica, abre la posibilidad de integrar los aportes de la convivencia con las especies vegetales en procesos de diseño, planeación urbana y adaptación climática (Galagoda et al., 2018; Herath et al., 2018; Du et al., 2021). La herramienta no reemplaza la política pública ni sustituye los mecanismos institucionales de toma de decisiones, pero sí produce las condiciones cognitivas para reconocer el carácter termodinámico del espacio construido y, por ende, la pertinencia de estrategias basadas en la convivencia con las especies vegetales y la comprensión causal de su agencia climática.

Esta dimensión formativa se refleja en la respuesta de los usuarios cuando se les preguntó si la herramienta podía generar conciencia en comunidades sobre el impacto climático del diseño urbano: aproximadamente el 95 % respondió afirmativamente, lo cual sugiere que la visualización inmersiva tiene un potencial significativo para articular procesos de sensibilización comunitaria y, eventualmente, contribuir a la legitimación social de estrategias basadas en la convivencia con especies vegetales dentro del espacio urbano. Esta interpretación se complementa con la respuesta a la pregunta sobre la utilización de la herramienta en entornos educativos, donde el 85 % consideró que sería adecuada total o parcialmente; este dato permite pensar la herramienta como dispositivo transversal

entre educación ambiental, participación ciudadana y planificación climática, facilitando la comprensión causal del microclima y habilitando formas de agencia comunitaria en procesos futuros de decisión territorial.

La posibilidad de manipular variables y observar resultados térmicos al instante de la modificación opera, así, como mediación entre los imaginarios urbanos del usuario y las estrategias urbanas que podrían implementarse a escala local. Aunque la herramienta en sí misma no modifica la materialidad urbana, sí contribuye a construir una comprensión compartida de los impactos térmicos de determinadas intervenciones, constituyéndose en un recurso que puede informar procesos de diseño urbano, debates sobre nuestras formas de convivencia con especies vegetales o programas de adaptación climática. En este sentido, la visualización participa de la formación de criterios que podrían orientar políticas de mitigación, especialmente en ciudades tropicales donde la pérdida de presencia vegetal compromete la habitabilidad térmica del espacio público y exige decisiones que reconozcan la agencia climática de las plantas.

Limitaciones metodológicas y desafíos

Aunque los resultados de la prueba piloto permiten identificar desplazamientos cognitivos relevantes en la comprensión del fenómeno térmico urbano, es necesario subrayar ciertos límites metodológicos derivados tanto del

diseño del estudio como de la naturaleza misma del dispositivo. En primer lugar, la prueba se realizó con una muestra pequeña y heterogénea de usuarios, lo que impide extraer conclusiones generalizables sobre impacto cognitivo o cambios de comportamiento. Si bien una proporción considerable de usuarios declaró haber incrementado su comprensión del fenómeno después de la experiencia, esta valoración sigue siendo autorreportada y no cuenta con una evaluación longitudinal que permita confirmar la permanencia de dicho aprendizaje ni su eventual traducción en decisiones de diseño urbano o prácticas ambientales cotidianas, lo cual exigirá investigaciones futuras orientadas a medir efectos transformadores en el tiempo.

Del mismo modo, aunque más del 70 % de los usuarios afirmó haber considerado posibles modificaciones en su propio entorno o en decisiones de diseño, esta respuesta no constituye evidencia de impacto conductual y, por tanto, debe entenderse como una disposición declarada más que como una transformación efectiva de la práctica. La ausencia de medición posterior o seguimiento impide evaluar si la experiencia inmersiva efectivamente deriva en conductas orientadas a la mitigación climática o en la incorporación real de especies vegetales en proyectos urbanos, lo que exige estudios longitudinales capaces de observar la eventual traducción de la experiencia en acciones verificables.

Dado que el modelo se construye a partir de mediciones empíricas (estación meteorológica,

termografías y parámetros microclimáticos específicos del sitio), los resultados obtenidos corresponden a las condiciones climáticas del caso de estudio y, por tanto, deben interpretarse como aproximaciones situadas para un momento específico del año. Ello implica que la transferencia a otros entornos urbanos requeriría una calibración que considere sus particularidades microclimáticas y urbanas, incorporando estacionalidad y condiciones locales, y evitando asumir una universalidad a priori.

Estas limitaciones no invalidan la herramienta, pero conducen a comprender que requiere continuidad evaluativa, ampliación de la muestra, estudios comparativos y mecanismos de seguimiento para afirmar impactos pedagógicos o climáticos sostenibles. La experiencia piloto, en consecuencia, debe ser entendida como punto de partida para una línea de trabajo que combine visualización científica, educación climática y evaluación empírica, evitando atribuir efectos transformadores que, por el momento, solo pueden considerarse potenciales y que deberán verificarse mediante investigaciones futuras orientadas a medir cambios sostenidos en las prácticas urbanas.

Proyecciones y escalabilidad de la herramienta pedagógica

Las posibilidades de evolución de la herramienta pedagógica desarrollada deben interpretarse como líneas de proyección que emergen de la propia lógica del dispositivo y

de la evaluación realizada durante la prueba piloto. La naturaleza web de la herramienta abre oportunidades de escalabilidad que trascienden la necesidad de equipamiento especializado y permiten imaginar usos en entornos educativos formales, comunitarios o institucionales, favoreciendo su incorporación en programas de alfabetización climática y sensibilización ambiental sin requerimientos técnicos complejos. En este sentido, la facilidad declarada por la mayoría de los participantes para modificar parámetros urbanos constituye un antecedente relevante: al indicar que dicha manipulación resultaba sencilla, los usuarios sugieren que la herramienta podría ser adoptada por públicos no expertos en contextos escolares o comunitarios, siempre que se acompañe de guías pedagógicas específicas que orienten la experiencia y fortalezcan su dimensión formativa.

Otro factor clave es la facilidad en los requerimientos mínimos de hardware y conectividad para el usuario final. De esta manera, los usuarios pueden acceder a los modelos 3D y a los mapas de calor disponibles en la página web interactiva sin necesidad de equipos especializados. La plataforma ha sido concebida para funcionar de forma fluida y accesible, permitiendo su uso desde cualquier dispositivo móvil o desde ordenadores de escritorio y portátiles, garantizando así una experiencia de consulta ágil y abierta para distintos tipos de usuarios.

Esta potencialidad se ve reforzada por la alta valoración otorgada a la herramienta como recurso para generar conciencia climática: el 95 % señaló que podría contribuir a sensibilizar sobre el impacto ambiental del diseño urbano, lo cual abre un horizonte de uso extendido en programas municipales de convivencia con especies vegetales, iniciativas de participación ciudadana o estrategias de comunicación pública orientadas a la mitigación del efecto de isla de calor. Asimismo, el hecho de que un porcentaje elevado de participantes considerara pertinente su utilización en entornos educativos sugiere que la herramienta pedagógica podría integrarse en currículos escolares como plataforma para comprender la relación entre decisiones urbanas, condiciones microclimáticas y confort térmico, avanzando hacia una educación climática situada que articule conceptos ambientales con experiencias de diseño y procesos de mediación sensorial.

Finalmente, la posibilidad de incorporar nuevos escenarios urbanos, ampliar especies vegetales, integrar indicadores de confort peatonal o conectar la herramienta con métricas municipales de planificación abre un campo de desarrollo que trasciende la experiencia piloto. Si bien estos usos proyectados requieren evaluaciones adicionales y no pueden afirmarse en términos de impacto, los resultados del cuestionario revelan una disposición manifiesta hacia la experimentación con alternativas de diseño urbano, lo que constituye un punto de partida significativo para avanzar hacia

una herramienta digital abierta, escalable y orientada a la participación comunitaria en la construcción de microclimas más habitables y en la apropiación situada de decisiones climáticas.

CONCLUSIONES

Este estudio abordó el efecto de isla de calor urbana en el marco del Antropoceno y la creciente mineralización de las ciudades tropicales, proponiendo un enfoque metodológico que articula medición termográfica, datos meteorológicos, modelación microclimática y visualización científica como vía para comprender el metabolismo térmico urbano desde una experiencia estética situada. La metodología desarrollada permitió cuantificar y modelar gradientes térmicos, así como traducirlos en representaciones accesibles que hacen visible la producción térmica de la ciudad como resultado de decisiones materiales, vegetales y morfológicas. Este vínculo entre simulación y visualización, más que un procedimiento técnico, constituye una operación epistemológica y pedagógica que reconfigura la comprensión de la isla de calor como fenómeno urbano estructural y no meramente atmosférico (Bowler et al., 2010; Rubiano Calderón, 2019).

El diseño e implementación del gemelo digital y de la herramienta web posibilitaron un desplazamiento conceptual que enfatiza la agencia climática de las especies vegetales y su condición viva terrestre, permitiendo que quienes desconocen esta dimensión comiencen

a cuidarles como sujetos que agencian climáticamente y no como ornamento urbano, al observar comparativamente escenarios con y sin intervención vegetal. Más que representar un recurso mitigador, la incorporación de vegetación hizo manifiesta su capacidad para reorganizar las condiciones térmicas del suelo, el confort peatonal y el metabolismo urbano en su conjunto (Salih & Báthoryné Nagy, 2024). Esta evidencia, sustentada en parámetros empíricos y mediciones térmicas, permite afirmar que la herramienta contribuye a desnaturalizar el calor urbano, inscribiéndose en una matriz política y espacial donde la vegetación desempeña un rol estratégico en la transición climática de ciudades tropicales expuestas a degradación vegetal acelerada.

Asimismo, el proceso metodológico demostró que la visualización científica, en tanto traducción termo-sensorial, opera como mediación pedagógica decisiva dentro de una educación climática situada. La interacción con el modelo web habilitó procesos cognitivos orientados a la comprensión causal de las relaciones entre materialidad, vegetación y comportamiento térmico, lo que confirma la pertinencia de la visualización como recurso formativo y no simplemente informativo. La experiencia piloto, aun cuando corresponde a una validación inicial, muestra indicios de apropiación cognitiva que sugieren un potencial educativo relevante, sin que ello permita, por el momento, afirmar transformaciones conductuales sostenidas.

El carácter web de la herramienta pedagógica amplía sus posibilidades de escalabilidad y transferencia hacia contextos educativos, institucionales y comunitarios, sin requerir equipamiento especializado. Asimismo, la lógica metodológica que articula medición termográfica, modelación microclimática, gemelo digital y visualización interactiva permite su adaptación a otros contextos urbanos con condiciones climáticas comparables, lo que refuerza la transferibilidad del enfoque hacia ciudades tropicales o subtropicales que enfrentan procesos similares de intensificación de la isla de calor urbana. De este modo, la herramienta podría incorporarse en programas escolares, iniciativas municipales orientadas a la convivencia con especies vegetales y procesos de participación ciudadana, favoreciendo la construcción de criterios climáticos situados que integren nuestra relación con las plantas en decisiones urbanas futuras (Koeva, 2024; Lopes et al., 2025). Si bien estos escenarios corresponden a proyecciones, constituyen una línea de desarrollo coherente con la naturaleza pedagógica de la herramienta y con la urgencia ecosocial que atraviesan las ciudades tropicales.

En síntesis, la contribución central de esta investigación radica en haber articulado una metodología científica de medición, modelación y simulación térmica con una plataforma de visualización capaz de traducir la complejidad térmica urbana en experiencia estética y cognitiva situada. Lejos de limitarse a describir el fenómeno, la herramienta

habilita formas de pensamiento que reconocen nuestra convivencia e interdependencia con las plantas como condición estructural del habitar urbano en contextos climáticos críticos, situando la educación climática como vector para comprender la agencia vegetal en el metabolismo térmico urbano.

En un escenario marcado por la transición ecosocial del Antropoceno, la herramienta no debe ser comprendida como una solución tecnológica cerrada; antes bien, como una mediación cognitiva capaz de hacer visible aquello que permanece oculto en la experiencia urbana cotidiana: los gradientes térmicos que configuran el habitar contemporáneo y las posibilidades de reorientar su producción mediante el reconocimiento de nuestra interdependencia con las especies vegetales. De este modo, la herramienta pedagógica desarrollada se constituye en un aporte significativo para imaginar formas de educación climática situada que, lejos de limitarse a informar, habilitan la construcción de criterios para intervenir, transformar y repensar la ciudad como espacio térmico y, en última instancia, como espacio vital común.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Alnuaimi, M. A., & Awad, M. (2025). VR environment of digital design laboratory: A usability study. *Frontiers in Virtual Reality*, 6. <https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1566680>
- Anderson, W., Wulfhorst, G., & Lang, W. (2015). Energy analysis of the built environment—A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.027>
- Ayala Pezzutti, R. J., Laurente Cárdenas, C. M., Escuza Mesías, C. D., Núñez Lira, L. A., & Díaz Dumont, J. R. (2020). Mundos virtuales y el aprendizaje inmersivo en educación superior. *Propósitos y Representaciones*, 8(1), e430. <https://doi.org/10.20511/pyr2020.v8n1.430>
- Balzerkiewitz, H.-P., & Stechert, C. (2024). How to assess the usability of virtual reality (VR) systems for implementation in product development processes. *Procedia CIRP*, 128, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.027>
- Borgdorff, H. (2012). The conflict of the faculties: Perspectives on artistic research and academia. Leiden University Press.
- 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>
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A. G., Mittal, N., Feliu, E., & Faehnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multifunctional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Du, H., Zhou, F., Cai, W., Cai, Y., & Xu, Y. (2021). Thermal and humidity effect of urban green spaces with different shapes: A case study of Shanghai, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 5941. <https://doi.org/10.3390/ijerph18115941>
- Galagoda, R. U., Jayasinghe, G. Y., Halwatura, R. U., & Rupasinghe, H. T. (2018). The impact of urban green infrastructure as a sustainable approach towards tropical micro-climatic changes and human thermal comfort. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.05.008>
- Gill, S. E., Handley, J., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Giraldo-Castañeda, W., Czajkowski, J. D., & Gómez, A. F. (2021). Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista De Arquitectura (Bogotá)*, 23(1), 115–124. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>
- Herath, H., Halwatura, R., & Jayasinghe, G. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.013>
- iNaturalist. (s. f.). iNaturalist. <https://www.inaturalist.org/>
- IPCC. (2022). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Kaaviya, U. & Senthil, R. (2025). Enhancing sustainable urban planning to mitigate urban heat island effects through residential greening. *Sustainable Cities and Society*, 129, 1–20.
- Koeva, M. (2024). The role of digital twins in mitigating urban heat islands. GIM International. <https://www.gim-international.com/content/article/the-role-of-digital-twins-in-mitigating-urban-heat-islands>

- Kolb, D. A. (2015). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development* (2nd ed.). Pearson Education.
- Lopes, H. S., Santos, J., & Gálvez, P. (2025). Green infrastructure and its influence on urban heat island: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124446>
- McCormick, B. H., DeFanti, T. A., & Brown, M. D. (1987). Visualization in scientific computing. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 21(6), 3–14. <https://doi.org/10.1145/1401132.1401259>
- Meteostat. (s. f.). Meteostat. <https://meteostat.net/es>
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of environmental physics: Plants, animals, and the atmosphere* (4th ed.). Academic Press.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Palmer, C., Hubbard, E.-M., Grant, R., & Goh, Y. M. (2025). Personas to inform cognitive interaction with a digital twin. *Journal of Industrial Information Integration*, 47, 100893. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100893>
- Preciado Vargas, M. P., & Aldana Olave, A. A. (2011). Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección. *Ventana Informática*, 24, 95–114. <https://doi.org/10.30554/ventanainform.24.162.2011>
- Quadros, B. M. de, & Mizgier, M. G. O. (2023). Urban green infrastructures to improve pedestrian thermal comfort: A systematic review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 88, 128091. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128091>
- Rangarajan, V., Shahbaz Badr, A., & De Amicis, R. (2024). Evaluating virtual reality in education: An analysis of VR through the instructors' lens. *Multimodal Technologies and Interaction*, 8(8), 72. <https://doi.org/10.3390/mti8080072>
- Rubiano Calderón, K. D. (2019). Distribución de la infraestructura verde y su capacidad de regulación térmica en Bogotá, Colombia. *Colombia Forestal*, 22(2), 83–100. <https://doi.org/10.14483/2256201X.14304>
- Sailor, D. J. (1995). Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(7), 1694–1704. <https://doi.org/10.1175/1520-0450-34.7.1694>
- Salih, K., & Báthoryné Nagy, I. R. (2024). Review of the role of urban green infrastructure on climate resiliency. *Urban Science*, 8(4), 220. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040220>

- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (Eds.). (1996). *Passive cooling of buildings*. James & James Science Publishers.
- Sentinel Hub. (s. f.). Sentinel Hub. <https://www.sentinel-hub.com/>
- Shashua-Bar, L., Tsiros, I. X., & Hoffman, M. E. (2010). A modeling study for evaluating passive cooling scenarios in urban streets with trees. *Solar Energy*, 84(1), 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.06.00>
- Soto-Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(2), 421–434. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.13>
- Sterling, S. (2001). *Sustainable education: Re-visioning learning and change*. Green Books.
- Tafalla, M. (2019). *Ecoanimal. Una estética plurisensorial, ecologista y animalista*. Plaza y Valdés Editores.
- Udayasoorian, K. P., & Ramalingam, S. (2025). Enhancing sustainable urban planning to mitigate urban heat island effects through residential greening. *Sustainable Cities and Society*, 129.
- Velasco, E., & Roth, M. (2010). Cities as net sources of CO₂. *Geography Compass*, 4(9), 1238–1259. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00384.x>
- Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*, 75, 142–152.
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>