



**Revista Especializada de Ingeniería
y Ciencias de la Tierra**

VOL: 6 N° 1 julio - diciembre 2026

ISSN L: 2805-1874

Diseño Bioclimático para la Mitigación del Calor Urbano en Edificaciones de la Ciudad de Panamá para el año 2026

Bioclimatic Design for Urban Heat Mitigation in Buildings in Panama City by 2026

Daniel Champsaur Sánchez

Universidad de Panamá – Facultad de Arquitectura, Panamá

daniel.champsaur@up.ac.pa

<https://orcid.org/0009-0002-6509-5322>

Recibido: 9/2/2026 Aceptado: 10/5/2026

DOI <https://doi.org/10.48204/reicit.v6n1.10116>

RESUMEN

El presente estudio analiza las estrategias bioclimáticas para la mitigación del calor urbano en edificaciones de la Ciudad de Panamá proyectadas para el año 2026. La investigación surge ante la creciente problemática del fenómeno de isla de calor urbano que afecta significativamente el confort térmico, el consumo energético y la calidad de vida de los habitantes de la capital panameña. El objetivo general es identificar y proponer estrategias bioclimáticas efectivas adaptadas al clima tropical húmedo de Panamá que permitan reducir las temperaturas interiores y exteriores de las edificaciones urbanas. El alcance de esta investigación se centra en estrategias de diseño pasivo, gestión de la envolvente térmica, integración de vegetación urbana, materiales reflectantes y sistemas de ventilación natural aplicables a edificaciones residenciales y comerciales en la ciudad de Panamá. La metodología empleada es de tipo cualitativo-descriptivo con enfoque correlacional, utilizando análisis de contenido de literatura científica, estudios de caso de proyectos existentes y revisión de normativas climáticas internacionales adaptables al contexto local. Los principales resultados indican que la implementación de techos verdes puede reducir las temperaturas superficiales entre 20°C y 30°C, mientras que las fachadas vegetales disminuyen la temperatura ambiente interior hasta 5°C. El uso de materiales con alto índice de reflectancia solar (SRI) puede reducir la absorción de calor hasta en 70%, y la ventilación

cruzada optimizada puede disminuir la necesidad de aire acondicionado entre 40% y 60%. En conclusión, la aplicación integral de estrategias bioclimáticas en edificaciones de la Ciudad de Panamá no solo contribuye a la mitigación del calor urbano, sino que también genera ahorros energéticos significativos, mejora el confort térmico de los ocupantes y fortalece la resiliencia urbana ante el cambio climático, posicionando a Panamá como referente regional en arquitectura bioclimática tropical.

PALABRAS CLAVE: Bioclimática, isla de calor urbano, ventilación natural, techos verdes, confort térmico

ABSTRACT

Anteroom: This study analyzes bioclimatic strategies for mitigating urban heat in buildings in Panama City projected for the year 2026. The research arises from the growing problem of the urban heat island phenomenon that significantly affects thermal comfort, energy consumption, and the quality of life of the inhabitants of the Panamanian capital. The general objective is to identify and propose effective bioclimatic strategies adapted to Panama's humid tropical climate that allow reducing interior and exterior temperatures of urban buildings. The scope of this research focuses on passive design strategies, thermal envelope management, urban vegetation integration, reflective materials, and natural ventilation systems applicable to residential and commercial buildings in Panama City. The methodology employed is qualitative-descriptive with a correlational approach, using content analysis of scientific literature, case studies of existing projects, and review of international climate regulations adaptable to the local context. The main results indicate that the implementation of green roofs can reduce surface temperatures between 20°C and 30°C, while vegetated facades decrease interior ambient temperature up to 5°C. The use of materials with high solar reflectance index (SRI) can reduce heat absorption up to 70%, and optimized cross ventilation can decrease the need for air conditioning between 40% and 60%. In conclusion, the comprehensive application of bioclimatic strategies in Panama City buildings not only contributes to urban heat mitigation but also generates significant energy savings, improves occupant thermal comfort, and strengthens urban resilience to climate change, positioning Panama as a regional reference in tropical bioclimatic architecture.

KEYWORDS: Bioclimatic, urban heat island, natural ventilation, green roofs, thermal comfort

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema: La Ciudad de Panamá enfrenta un acelerado crecimiento urbano que ha transformado significativamente su paisaje y microclima local. Según estudios recientes, las zonas urbanas densamente construidas experimentan temperaturas entre 3°C y 8°C más elevadas que las áreas rurales circundantes, fenómeno conocido como isla de calor urbano (Oke, 1987; Erell et al., 2011). Esta problemática se intensifica debido al clima tropical húmedo característico de Panamá, con temperaturas promedio anuales de 27°C y humedad relativa superior al 80%, condiciones que demandan un elevado consumo energético para climatización artificial.

Objetivo de la investigación: Identificar y proponer estrategias bioclimáticas efectivas adaptadas al clima tropical húmedo de Panamá que permitan reducir las temperaturas interiores y exteriores de las edificaciones urbanas.

Justificación: El diseño bioclimático propone estrategias arquitectónicas que consideran las condiciones climáticas locales como radiación solar, vientos dominantes e humedad para optimizar el confort térmico sin depender excesivamente de sistemas mecánicos. Integrar estos principios en proyectos urbanos puede mitigar el calor urbano, reducir el consumo energético y contribuir a entornos más saludables y resilientes frente al cambio climático. Dado que la Ciudad de Panamá presenta un clima tropical con altas temperaturas y humedad durante gran parte del año, aplicar el diseño bioclimático se vuelve una necesidad tanto ambiental como social para el año 2026.

Planteamiento de la hipótesis: La sustitución de superficies naturales por materiales impermeables como concreto y asfalto, la reducción de espacios verdes, la densificación vertical sin consideraciones bioclimáticas y la generación de calor antropogénico procedente de vehículos y sistemas de climatización, agravan esta situación. Este escenario plantea desafíos urgentes para el sector de la construcción y el desarrollo urbano sostenible.

MÉTODO Y MATERIALES

La presente investigación adopta un enfoque cualitativo-descriptivo con alcance correlacional-explicativo, orientado a comprender las relaciones entre estrategias bioclimáticas específicas y su efectividad en la mitigación del calor urbano en el contexto climático de la Ciudad de Panamá (Szokolay, 2004). El estudio se desarrolla bajo un diseño transversal, mediante el análisis sistemático de literatura científica, normativas internacionales, estudios de caso y datos climáticos locales, con el objetivo de identificar patrones, relaciones causales y mejores prácticas aplicables al año 2026. La técnica principal empleada es el **análisis de contenido**, aplicado a múltiples fuentes documentales para extraer, categorizar y sintetizar información relevante sobre estrategias bioclimáticas. Los instrumentos incluyen matrices de análisis comparativo para evaluar la efectividad de diferentes estrategias según criterios como reducción de temperatura, ahorro energético, costo de implementación, mantenimiento requerido y adaptabilidad al contexto panameño.

Se utiliza también el **análisis de casos múltiples**, documentando proyectos arquitectónicos existentes que han implementado exitosamente soluciones bioclimáticas en climas tropicales (Wong & Chen, 2009; Yeang, 2006). Para cada caso se examina: características climáticas del sitio, estrategias bioclimáticas implementadas, tecnologías y materiales empleados, resultados cuantitativos de desempeño térmico y energético, lecciones aprendidas y aplicabilidad al contexto panameño.

1. CONDICIONES CLIMÁTICAS LOCALES

La incorporación de elementos como aleros, celosías y parasoles reduce significativamente la radiación solar directa que incide sobre las fachadas y superficies expuestas, disminuyendo las temperaturas superficiales de los muros y techos.

La Ciudad de Panamá se ubica en una zona de clima tropical de sabana (clasificación Köppen Aw), caracterizada por altas temperaturas durante todo el año, elevada humedad relativa y una estación lluviosa bien definida. La temperatura promedio anual oscila entre 26°C y 28°C, con mínimas nocturnas raramente inferiores a 22°C y máximas diurnas que pueden superar los 34°C durante la estación seca (enero a abril). La amplitud térmica diaria es relativamente moderada, típicamente entre 8°C y 12°C, lo que representa tanto una ventaja como un desafío para estrategias de enfriamiento pasivo (Koenigsberger et al., 1977).

La humedad relativa promedio anual es del 80%, con valores que pueden alcanzar el 95% durante las primeras horas de la mañana en la estación lluviosa. Esta alta humedad limita significativamente la efectividad del enfriamiento evaporativo natural, una estrategia común en climas cálidos-secos, pero favorece el uso de ventilación como principal mecanismo de confort térmico (Auliciems & Szokolay, 2007; Givoni, 1998). La precipitación anual promedia 1,900 mm, concentrándose entre mayo y diciembre, con septiembre y octubre como los meses más lluviosos.

2. DATOS CLIMÁTICOS CLAVE

Temperatura promedio: 27°C

Humedad relativa: 80% anual

Radiación solar: 4.5-5.5 kWh/m²/día

Velocidad de viento: 2-4 m/s

Precipitación: 1,900 mm anuales

3. RADIACIÓN SOLAR Y TRAYECTORIA DEL SOL

La ubicación ecuatorial de Panamá (8°58' N) determina características solares específicas cruciales para el diseño bioclimático. Durante el solsticio de verano (junio), el sol alcanza su máxima altura solar de aproximadamente 82° sobre el horizonte al mediodía, mientras que en el solsticio de invierno (diciembre) esta altura es de aproximadamente 58°. Esta trayectoria solar casi cenital durante gran parte del año implica que las fachadas norte y sur reciben menor radiación directa que las fachadas este y oeste, particularmente durante las horas de la mañana y tarde cuando el ángulo solar es más bajo y penetrante (Olgyay, 2015).

La radiación solar global promedio en la Ciudad de Panamá varía entre 4.5 kWh/m²/día en la estación lluviosa y 5.5 kWh/m²/día en la estación seca, valores considerablemente altos que representan una fuente significativa de ganancias térmicas no deseadas en edificaciones.

Las cubiertas planas, predominantes en edificaciones modernas, reciben la máxima incidencia de radiación solar, convirtiéndolas en superficies críticas para la implementación de estrategias de mitigación térmica. El análisis de sombreado debe considerar que las protecciones solares horizontales son más efectivas en fachadas norte y sur, mientras que las fachadas este y oeste requieren protecciones verticales o combinadas debido a los ángulos solares bajos durante estas orientaciones.

4. PATRONES DE VIENTO

Los vientos predominantes en la Ciudad de Panamá provienen principalmente del norte y noreste durante la estación seca, y del suroeste durante la estación lluviosa, con velocidades promedio entre 2 y 4 m/s. Estos vientos, aunque moderados, son suficientes para generar ventilación cruzada efectiva cuando las edificaciones están apropiadamente diseñadas y orientadas. Sin embargo, la densificación urbana y la configuración de edificaciones de gran altura han creado efectos de cañón urbano que pueden bloquear o redirigir estos flujos de aire naturales, reduciendo su disponibilidad a nivel peatonal y en plantas bajas.

El aprovechamiento de la ventilación natural es particularmente crítico durante las horas nocturnas, cuando las temperaturas exteriores descienden ligeramente y la ventilación puede contribuir al enfriamiento de las masas térmicas interiores. Estudios indican que velocidades de aire interior entre 0.5 y 1.5 m/s pueden incrementar la temperatura de confort hasta 3°C en condiciones de alta humedad, reduciendo significativamente la necesidad de climatización mecánica. La orientación óptima de edificaciones para maximizar la ventilación cruzada en el contexto panameño debe considerar la apertura de fachadas principales hacia los vientos predominantes del noreste, evitando obstrucciones significativas en estas orientaciones (Serra & Coch, 1995; Hyde, 2008).

5. ISLA DE CALOR URBANO EN PANAMÁ

7.1.FENÓMENO Y CAUSAS EN LA CIUDAD DE PANAMÁ

El efecto de isla de calor urbano en la Ciudad de Panamá se ha intensificado progresivamente en las últimas décadas debido al acelerado proceso de urbanización y densificación del tejido urbano. Mediciones satelitales y estaciones meteorológicas urbanas revelan que las zonas centrales de la ciudad, particularmente áreas como Bella Vista, El Cangrejo y Punta Pacífica, experimentan temperaturas entre 3°C y 8°C superiores a las registradas en áreas periurbanas y rurales circundantes durante las horas nocturnas, cuando el fenómeno es más pronunciado (Oke, 1987; Wong & Chen, 2009).

7.2.DENSIFICACIÓN URBANA

Reemplazo de superficies naturales permeables por materiales impermeables de alta capacidad térmica como concreto y asfalto.

7.3.PÉRDIDA DE VEGETACIÓN

Reducción significativa de cobertura arbórea y espacios verdes que proporcionaban enfriamiento evapotranspirativo

7.4.CALOR ANTROPOGÉNICO

Emisión de calor desde sistemas de climatización, vehículos e industrias que incrementa la temperatura ambiente.

Los impactos del calor urbano en edificaciones se manifiestan de múltiples formas. Las temperaturas superficiales de cubiertas pueden alcanzar 70°C-80°C durante días soleados, transmitiendo cargas térmicas significativas hacia espacios interiores y demandando un mayor funcionamiento de sistemas de aire acondicionado. Las fachadas expuestas al oeste, particularmente problemáticas en el contexto panameño, pueden alcanzar temperaturas superficiales de 50°C-60°C durante las tardes, incrementando sustancialmente las ganancias térmicas. El pavimento urbano, que puede alcanzar temperaturas de 60°C-70°C, irradia calor hacia fachadas inferiores y espacios peatonales, exacerbando el discomfort térmico exterior (Erell et al., 2011).

6. IMPACTOS EN CONSUMO ENERGÉTICO

El incremento de temperatura urbana se traduce directamente en mayor demanda de energía para climatización. Estudios estiman que por cada grado Celsius de aumento en temperatura exterior, la demanda de enfriamiento puede incrementarse entre 2% y 4% (Santamouris & Asimakopoulou, 1996). En edificaciones comerciales de la Ciudad de Panamá, la climatización representa entre 50% y 70% del consumo eléctrico total, porcentaje que se incrementa proporcionalmente con el efecto isla de calor.

7. IMPACTOS EN SALUD PÚBLICA

Las olas de calor urbano, cada vez más frecuentes e intensas, representan riesgos significativos para la salud pública, particularmente para poblaciones vulnerables como adultos mayores, niños y personas con condiciones médicas preexistentes. El estrés térmico puede causar agotamiento, deshidratación, golpes de calor y exacerbar enfermedades cardiovasculares y respiratorias.

8. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN A ESCALA URBANA

La mitigación efectiva del calor urbano requiere intervenciones tanto a escala urbana como de edificación individual. A nivel urbano, la preservación y expansión de espacios verdes, parques y corredores ecológicos es fundamental para mantener islas de frescura que contrarresten el calentamiento general. La implementación de infraestructura verde en vías públicas, incluyendo arborización de aceras y medianas con especies nativas de copa amplia, puede reducir temperaturas de pavimento hasta 10°C-15°C mediante sombreado directo.

La regulación de materiales urbanos es igualmente crucial. La promoción de pavimentos permeables, superficies de color claro con alto albedo y techos reflectantes o vegetados en nuevas construcciones puede reducir significativamente la absorción y retención de calor.

solar (Akbari et al., 2001). Las normativas urbanas deben incentivar o exigir ratios mínimos de cobertura vegetal, distancias entre edificaciones que permitan ventilación urbana, y orientaciones que favorezcan la exposición a vientos predominantes. La integración de cuerpos de agua, fuentes y espejos de agua en espacios públicos puede contribuir al enfriamiento evaporativo local, aunque su efectividad es limitada en climas de alta humedad como Panamá.

9. ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVO: ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

11.1. ORIENTACIÓN Y GEOMETRÍA EDIFICATORIA

La orientación óptima de edificaciones en la Ciudad de Panamá debe responder simultáneamente a dos objetivos primarios: minimizar la exposición a radiación solar directa en fachadas y maximizar el aprovechamiento de vientos predominantes para ventilación natural (Kwok & Grondzik, 2018; Olgyay, 2015; Givoni, 1998). El eje longitudinal de edificaciones rectangulares debe orientarse preferentemente en dirección norte-sur, exponiendo las fachadas de menor superficie (testeros) hacia las orientaciones este y oeste donde la radiación solar es más problemática durante las horas de la mañana y tarde. Las fachadas principales orientadas al norte y sur reciben menor radiación directa debido a los altos ángulos solares característicos de latitudes tropicales.

11.2. ORIENTACIÓN NORTE-SUR

Fachadas principales norte-sur minimizan exposición a radiación solar directa. Protecciones horizontales efectivas. Ideal para espacios habitables principales.

11.3. APROVECHAMIENTO DE VIENTOS

Orientar aberturas principales hacia vientos predominantes noreste. Considerar configuración urbana circundante y efectos de cañón.

11.4. REDUCCIÓN DE INCIDENCIA SOLAR ESTE-OESTE

Reducir superficie de fachadas expuestas a orientaciones este y oeste. Considerar servicios, circulaciones o espacios secundarios en estos frentes.

La geometría edificatoria influye significativamente en el desempeño térmico. Edificaciones con configuraciones compactas presentan menor relación superficie/volumen, reduciendo la exposición a ganancias térmicas, pero limitan las oportunidades de ventilación cruzada. Por el contrario, configuraciones alargadas o con patios internos favorecen la ventilación natural pero incrementan la superficie de envolvente expuesta. En el contexto panameño, se recomienda un equilibrio mediante configuraciones que mantengan profundidades de planta no mayores a 12-15 metros para permitir ventilación cruzada efectiva, combinadas con patios o atrios que funcionen como chimeneas térmicas promoviendo el movimiento vertical del aire caliente.

11.5. VENTILACIÓN CRUZADA OPTIMIZADA

La ventilación cruzada constituye la estrategia pasiva más efectiva para lograr confort térmico en climas tropicales húmedos como el de Panamá, donde la alta humedad limita el potencial del enfriamiento evaporativo (Hyde, 2008; Koenigsberger et al., 1977). Para maximizar su efectividad, las aberturas de entrada de aire deben ubicarse en fachadas expuestas a vientos predominantes (noreste en Panamá), preferentemente en niveles inferiores donde las presiones positivas son mayores. Las aberturas de salida deben posicionarse en fachadas opuestas o adyacentes, en niveles superiores, aprovechando las presiones negativas generadas por el flujo de viento sobre la edificación y el efecto de flotación térmica del aire caliente.

10. PRINCIPIOS DE DISEÑO

- Relación de áreas: abertura de entrada 60-80% del área de salida
- Profundidad efectiva: máximo 5 veces la altura del espacio
- Altura de aberturas: preferentemente en la mitad superior del muro
- Evitar obstrucciones en el flujo de aire interior
- Considerar ventanas operables tipo guillotina o pivotantes

El dimensionamiento de aberturas debe considerar que una relación de área de entrada-salida de aproximadamente 1:1.5 favorece la aceleración del flujo de aire interior. Sin embargo, aberturas excesivamente grandes pueden comprometer el control solar y la privacidad. Sistemas de celosías ajustables, persianas exteriores operables o elementos de sombreado fijo permiten modular el flujo de aire mientras proporcionan protección solar. Las aberturas elevadas cerca del cielo raso facilitan la evacuación del aire caliente estratificado, especialmente efectivo en espacios de doble altura o con entrepisos abiertos.

12.1. PROTECCIONES SOLARES EXTERIORES

Las protecciones solares exteriores son fundamentales para interceptar la radiación solar antes de que alcance la envolvente térmica, previniendo así ganancias de calor significativamente más efectivas que protecciones interiores (Lechner, 2015; Serra & Coch, 1995). En fachadas norte y sur, las protecciones horizontales tipo aleros, voladizos o balcones son altamente efectivas debido a los ángulos solares altos característicos. El dimensionamiento debe calcularse considerando los ángulos solares específicos de cada mes y hora crítica, buscando proporcionar sombra completa durante las horas de mayor radiación (10:00 a 16:00) en estación seca.

12.2. CELOSÍAS Y PERSIANAS

Elementos calados de material cerámico, concreto o aluminio. Bloquean radiación directa mientras permiten ventilación. Diseño tradicional panameño reinterpretado.

12.3. PROTECCIONES HORIZONTALES

Aleros, voladizos, marquesinas. Efectivas en fachadas N-S. Dimensionar según ángulo solar. Profundidad típica 0.8-1.5m para ventanas residenciales.

12.4. PROTECCIONES VERTICALES

Parteluces, brise-soleil verticales. Esenciales en fachadas E-O. Espaciamiento calculado según ángulo de incidencia lateral del sol.

12.5. FACHADAS DE DOBLE PIEL

Sistema de envolvente múltiple con cámara ventilada. Intercepta radiación en capa exterior. Aire caliente evacuado por efecto chimenea. Costoso pero altamente efectivo.

En fachadas este y oeste, donde los ángulos solares son bajos y penetrantes, se requieren protecciones verticales tipo parteluces o brise-soleil orientados según el ángulo de incidencia solar. Las celosías de elementos horizontales o verticales, tradicionales en la arquitectura colonial panameña, ofrecen una solución culturalmente relevante y técnicamente efectiva, bloqueando hasta 60-70% de la radiación solar mientras mantienen iluminación natural difusa y ventilación. Los materiales de protecciones solares deben ser resistentes a la humedad y corrosión salina, preferentemente aluminio anodizado, concreto prefabricado, maderas tropicales tratadas o cerámicos cocidos. Los colores claros reducen la absorción de calor e irradiación hacia ventanas.

11. ENVOLVENTE TÉRMICA DE ALTO DESEMPEÑO: MATERIALES REFLECTANTES Y DE ALTO ALBEDO

Los materiales de envolvente con alto índice de reflectancia solar (SRI) son cruciales para reducir la absorción de calor en superficies expuestas, particularmente en cubiertas planas que reciben la máxima radiación solar (Serra & Coch, 1995). Los techos tradicionales de color oscuro pueden alcanzar temperaturas superficiales de 70°C-80°C en días soleados, mientras que techos con recubrimientos reflectantes de alta reflectancia pueden mantenerse 30°C-40°C más fríos, reduciendo drásticamente la transferencia de calor hacia espacios interiores (Akbari et al., 2001; Cheng et al., 2012).

En fachadas, acabados de color claro con reflectancia solar superior al 60% son recomendables, especialmente en orientaciones este y oeste. Las pinturas cerámicas reflectantes, acabados de estuco claro, revestimientos cerámicos de colores claros o paneles de aluminio anodizado natural son opciones apropiadas. Materiales "fríos" especialmente formulados con pigmentos reflectantes infrarrojos pueden mantener colores relativamente oscuros para fines estéticos mientras reflejan la porción infrarroja del espectro solar responsable de las ganancias térmicas. El mantenimiento periódico de estas superficies es

crítico, ya que la acumulación de polvo, suciedad y crecimiento de microorganismos puede reducir significativamente la reflectancia efectiva con el tiempo.

12. AISLAMIENTO TÉRMICO APROPIADO

Aunque el aislamiento térmico es menos crítico en climas tropicales que en climas fríos, su aplicación estratégica en cubiertas puede reducir significativamente las ganancias térmicas por conducción (Lechner, 2015; Szokolay, 2004). Los materiales aislantes apropiados para el contexto panameño deben considerar no solo su resistencia térmica (valor R) sino también su resistencia a la humedad, durabilidad en condiciones de alta temperatura y compatibilidad con sistemas constructivos locales. La espuma de poliuretano de celda cerrada, con valores R de 6-7 por pulgada, ofrece excelente desempeño térmico y resistencia a la humedad, aunque su costo es superior. Paneles rígidos de poliisocianurato (R-6 por pulgada) representan una alternativa más económica con buen desempeño. Aislantes de fibra de vidrio, aunque comunes, deben protegerse adecuadamente contra la humedad mediante barreras de vapor para evitar degradación y pérdida de capacidad aislante.

14.1. CUBIERTAS

El aislamiento térmico es más crítico en cubiertas expuestas directamente a radiación solar. Espesores de 50-75mm de aislamiento rígido bajo membrana impermeable pueden reducir la transferencia de calor hasta en 60-70%. Los sistemas de cubierta invertida, donde el aislamiento se coloca sobre la membrana impermeable, protegen la impermeabilización de ciclos térmicos extremos, prolongando su vida útil.

14.2. FACHADAS

En fachadas, el aislamiento es menos común en construcción local pero puede ser beneficioso en edificaciones de alta eficiencia energética. Sistemas EIFS (sistema de aislamiento y acabado exterior) con 25-50mm de aislamiento pueden reducir ganancias térmicas, aunque deben detallarse cuidadosamente para evitar problemas de humedad en climas tropicales húmedos.

14.3. VENTANAS DE ALTO DESEMPEÑO

Las ventanas representan el componente más vulnerable de la envolvente térmica, siendo responsables de 30-50% de las ganancias térmicas totales en edificaciones climatizadas. En el contexto panameño, la selección de ventanas debe equilibrar múltiples criterios: control de ganancias solares, transmisión de iluminación natural, permeabilidad para ventilación natural, resistencia a vientos huracanados y resistencia a corrosión por ambiente salina (Kwok & Grondzik, 2018; Givoni, 1998). El vidrio de control solar con recubrimientos de baja emisividad (low-e) puede bloquear hasta 60-70% de la radiación solar mientras mantiene alta transmisión de luz visible (60-70%), reduciendo significativamente las ganancias térmicas sin comprometer la iluminación natural.

Los vidrios laminados con películas intercaladas de control solar ofrecen ventajas adicionales de seguridad contra impactos y reducción acústica. El Factor Solar (SHGC - Solar Heat Gain Coefficient) recomendado para ventanas en Panamá debe ser inferior a 0.40, idealmente entre 0.25-0.35 para fachadas con exposición solar significativa. La transmitancia térmica (valor U) es menos crítica que en climas fríos, siendo aceptables valores de 2.0-3.0 W/m²K para ventanas de vidrio simple con marco de aluminio con ruptura de puente térmico. Las ventanas practicables tipo guillotina, proyectantes o pivotantes son preferibles a ventanas fijas para permitir ventilación natural cuando las condiciones exteriores son apropiadas, típicamente durante horas nocturnas y primeras horas de la mañana.

14.4. TECHOS VERDES EXTENSIVOS E INTENSIVOS

Los techos verdes representan una de las estrategias más efectivas de mitigación térmica en edificaciones urbanas, proporcionando múltiples beneficios ambientales simultáneos. Mediante procesos de evapotranspiración, sombreado y aislamiento térmico, los techos verdes pueden reducir las temperaturas superficiales de cubiertas entre 20°C y 30°C comparados con cubiertas convencionales oscuras, y hasta 10°C-15°C comparados con cubiertas reflectantes. Esta reducción se traduce en disminuciones de temperatura interior de 3°C-5°C en espacios directamente debajo de la cubierta, reduciendo cargas de enfriamiento entre 25% y 40% (Jim & Peng, 2012; Hien et al., 2007).

14.4.1. TECHOS VERDES EXTENSIVOS

Sustratos delgados (5-15cm), vegetación de bajo mantenimiento (sedum, gramíneas nativas), cargas estructurales ligeras (60-150 kg/m²). Apropriados para retrofits de edificaciones existentes. Mantenimiento mínimo: 2-3 visitas anuales. Inversión inicial: \$80-150/m².

14.4.2. TECHOS VERDES INTENSIVOS

Sustratos profundos (15-60cm), vegetación diversa incluyendo arbustos y árboles pequeños, cargas estructurales altas (150-500+ kg/m²). Requieren estructura diseñada específicamente. Mantenimiento regular similar a jardín tradicional. Inversión inicial: \$150-400/m².

La implementación de techos verdes en Panamá debe considerar aspectos específicos del clima tropical húmedo. La selección de especies vegetales debe priorizar plantas nativas o adaptadas a condiciones de alta temperatura, radiación solar intensa, humedad elevada y períodos de sequía durante estación seca. Especies de gramíneas tropicales como *Paspalum notatum*, plantas suculentas resistentes como *Portulaca grandiflora*, y coberturas vegetales nativas como *Wedelia trilobata* han demostrado buen desempeño en proyectos similares en clima tropical. El sistema de drenaje es crítico dada la alta precipitación durante la estación lluviosa; capas de drenaje robustas con capacidad de evacuación de 3-5 litros/min/m² son necesarias para evitar saturación y daños por peso excesivo.

Los co-beneficios de techos verdes incluyen gestión de aguas pluviales mediante retención del 40-60% de precipitación anual, extensión de vida útil de membranas impermeabilizantes

al protegerlas de radiación UV y ciclos térmicos extremos, incremento de biodiversidad urbana al crear hábitats para aves e insectos, y mejora de calidad de aire mediante captura de partículas y CO₂. A nivel urbano, la implementación masiva de techos verdes puede contribuir significativamente a la mitigación del efecto isla de calor, con estudios indicando reducciones de temperatura ambiente de 1°C-2°C en vecindarios con alta proporción de cubiertas vegetadas.

14.5. FACHADAS VEGETALES Y JARDINES VERTICALES

Las fachadas vegetales ofrecen una estrategia complementaria de mitigación térmica particularmente efectiva en edificaciones de media y gran altura donde las cubiertas representan una proporción menor de la envolvente total. Mediante sombreado directo de fachadas, evapotranspiración y creación de cámaras de aire ventiladas entre vegetación y muro, los jardines verticales pueden reducir temperaturas superficiales de fachadas hasta 15°C-20°C, disminuyendo ganancias térmicas en espacios interiores adyacentes hasta 5°C y reduciendo demandas de enfriamiento entre 20% y 30% dependiendo de la orientación y extensión de la fachada vegetada (Pérez et al., 2014).

14.5.1. SISTEMAS DE FACHADAS VEGETALES

Sistemas modulares con sustrato: Paneles pre-vegetados con sustrato inorgánico ligero, instalación rápida, mantenimiento accesible. Apropriados para proyectos comerciales e institucionales. Costo: \$400-800/m².

Sistemas hidropónicos: Vegetación sin sustrato, nutrición mediante solución líquida, peso reducido, mantenimiento técnico especializado. Mayor inversión inicial: \$600-1200/m². Ideal para edificaciones emblemáticas.

Trepadoras con soporte: Enredaderas cultivadas desde suelo o macetas, crecimiento sobre mallas o cables tensados. Solución de bajo costo: \$50-150/m². Requiere varios años para cobertura completa. Apropiado para residencias.

La selección de especies para jardines verticales en Panamá debe considerar tolerancia a radiación solar directa (para fachadas este-oeste), capacidad de crecimiento vertical, resistencia a vientos, y requerimientos hídricos. Especies apropiadas incluyen helechos tropicales (*Nephrolepis exaltata*) para zonas sombreadas, *Philodendron scandens* para zonas de sombra parcial, y *Epipremnum aureum* para condiciones de mayor radiación. Las enredaderas tradicionales como *Bougainvillea glabra* o *Pyrostegia venusta* son opciones de bajo mantenimiento para sistemas con soporte, aunque su crecimiento es más lento inicialmente (Kubota & Toe, 2015; Wong & Chen, 2009).

Los sistemas de irrigación automatizados son esenciales, típicamente mediante riego por goteo o microaspersión con frecuencias de 2-4 veces diarias durante estación seca. El consumo de agua puede variar entre 3-8 litros/m²/día dependiendo de especies, orientación y condiciones climáticas. La integración con sistemas de captación de agua pluvial o reutilización de aguas grises puede reducir significativamente el impacto hídrico. El mantenimiento incluye poda regular (mensual), fertilización (trimestral), reemplazo de

plantas (5-10% anual), y limpieza de sistemas de irrigación (mensual). La inversión en monitoreo automatizado de humedad de sustrato y sistemas de irrigación inteligente puede optimizar el consumo de agua y reducir el mantenimiento manual.

13. ARBORIZACIÓN PERIMETRAL ESTRATÉGICA

La arborización estratégica alrededor de edificaciones proporciona sombreado directo de fachadas y pavimentos, enfriamiento evapotranspirativo del microclima, y filtración del viento antes de ingresar a espacios interiores. Árboles de copa amplia ubicados al este y oeste de edificaciones pueden bloquear radiación solar de bajo ángulo durante horas de la mañana y tarde, cuando el sol es más penetrante y problemático. Un árbol maduro de copa densa puede reducir temperaturas superficiales de fachadas bajo su sombra hasta 10°C-15°C, y bajar temperaturas de aire circundante 2°C-5°C mediante evapotranspiración (Akbari et al., 2001; Erell et al., 2011).

Tabebuia rosea

Roble de sabana, árbol nativo panameño de copa amplia (10-15m diámetro), crecimiento moderadamente rápido, floración espectacular rosada. Ideal para sombreado de fachadas este-oeste.

Handroanthus guayacan

Guayacán, árbol nativo de copa densa, crecimiento moderado, floración amarilla característica. Excelente para sombreado perimetral y áreas de estacionamiento.

Ceiba pentandra

Ceiba, árbol icónico panameño de gran tamaño, copa extendida, sistema radicular profundo. Apropiado para espacios amplios, parques y plazas. Significado cultural importante.

La selección de especies arbóreas debe considerar múltiples criterios: velocidad de crecimiento (especies de crecimiento rápido proporcionan beneficios en 5-7 años vs. 15-20 años para especies lentas), tamaño de copa en madurez (debe proporcionar sombra adecuada sin interferir con servicios aéreos o estructuras), carácter deciduo o perenne (especies deciduas permiten ganancia solar en invierno en climas templados, pero en Panamá las especies perennes son generalmente preferibles para sombreado constante), sistema radicular (raíces superficiales pueden dañar pavimentos y cimentaciones; preferir especies de raíces profundas), y resistencia a vientos (criterio crítico en Panamá dado el riesgo de vientos huracanados).

La ubicación estratégica considera distancias de plantación de 3-6 metros de fachadas para proporcionar sombra efectiva mientras se minimiza el riesgo de daño por raíces o caída de ramas. Árboles de menor tamaño pueden ubicarse más cerca (2-3m) mientras que especies de gran porte requieren distancias mayores (6-10m). La orientación norte es menos crítica para sombreado arbóreo dado el alto ángulo solar, pero puede ser apropiada para especies que proporcionen enfriamiento evapotranspirativo general del microclima. Los patios interiores pueden incorporar árboles de altura media que proporcionen sombra y canalicen

ventilación sin obstruirla completamente. El diseño de paisajismo debe integrar sistemas de irrigación eficiente, preferentemente con agua pluvial captada, y considerar mulching orgánico para conservación de humedad y supresión de hierbas competidoras.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian datos representativos y novedosos que confirman la efectividad de las estrategias bioclimáticas aplicadas al contexto tropical húmedo de la Ciudad de Panamá. La información presentada demuestra, de manera original, que el diseño arquitectónico puede desempeñar un papel esencial en la mitigación del calor urbano al integrar sistemas pasivos que mejoran el confort térmico y reducen el consumo energético en edificaciones residenciales y comerciales (Olgyay, 2015; Yeang, 2006).

La secuencia lógica de los resultados permite comprender la relación directa entre las condiciones climáticas locales como la radiación solar, la humedad relativa y los patrones de viento y la necesidad de soluciones arquitectónicas específicas. Se determinó que los techos verdes, las fachadas vegetales y el uso de materiales reflectantes reducen la temperatura superficial entre 20 °C y 30 °C y disminuyen el calor interior hasta en 5 °C, evidenciando un impacto cuantificable en la eficiencia térmica y energética de las edificaciones (Jim & Peng, 2012; Hien et al., 2007; Pérez et al., 2014; Akbari et al., 2001).

Estos hallazgos se vinculan estrechamente con los objetivos iniciales de la investigación, orientados a identificar estrategias bioclimáticas adaptadas al contexto panameño. Asimismo, confirman la hipótesis de que la sustitución de superficies naturales y la falta de vegetación urbana son factores determinantes del fenómeno de isla de calor urbano (Oke, 1987; Erell et al., 2011). Al correlacionar los resultados con las fuentes consultadas, se reafirma la pertinencia del diseño pasivo, la orientación edificatoria y la ventilación cruzada como pilares del confort térmico en climas tropicales (Givoni, 1998; Serra & Coch, 1995; Lechner, 2015).

Finalmente, las conclusiones derivadas remiten de forma coherente a los resultados obtenidos: la aplicación integral de estrategias bioclimáticas en la Ciudad de Panamá no solo permite reducir las temperaturas urbanas y mejorar la habitabilidad, sino que también posiciona al país como referente regional en arquitectura sostenible y resiliente al cambio climático. En consecuencia, se evidencia la necesidad de incorporar estas prácticas dentro de las políticas públicas y normativas constructivas nacionales para alcanzar una planificación urbana más responsable y ambientalmente eficiente (Kwok & Grondzik, 2018; Szokolay, 2004).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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)
- Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (2007). Thermal comfort. PLEA Notes 3. University of Queensland.
- Cheng, V., Ng, E., & Givoni, B. (2012). Effect of envelope design on thermal performance of naturally ventilated residential buildings in tropical climates. *Energy and Buildings*, 45, 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). Urban microclimate: Designing the spaces between buildings. Earthscan.
- Givoni, B. (1998). Climate considerations in building and urban design. John Wiley & Sons.
- Hien, W. N., Yu, C., Chandra, A. N., Rasid, M. N. A., & Tan, P. Y. (2007). Effects of roof top garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4), 353–364. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00044-9)
- Hyde, R. (2008). Climate responsive design: A study of buildings in moderate and hot humid climates. Taylor & Francis.
- Jim, C. Y., & Peng, L. L. H. (2012). Substrate moisture effect on water balance and thermal performance of a tropical extensive green roof. *Ecological Engineering*, 47, 9–23. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.022>
- Koenigsberger, O. H., Ingersoll, T. G., Mayhew, A., & Szokolay, S. V. (1977). Manual of tropical housing and building: Climatic design. Longman.
- Kwok, A. G., & Grondzik, W. T. (2018). The green studio handbook: Environmental strategies for schematic design (3rd ed.). Routledge.
- Kubota, T., & Toe, D. H. C. (2015). Evaluation of vertical greenery systems for building energy saving in the tropics. *Renewable Energy*, 75, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.038>
- Lechner, N. (2015). Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Olgyay, V. (2015). Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism (Revised ed.). Princeton University Press.
- Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates (2nd ed.). Routledge.
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2014). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12), 4854–4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>

- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. N. (Eds.). (1996). *Passive cooling of buildings*. James & James Science Publishers.
- Serra, R., & Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Edicions UPC.
- Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to architectural science: The basis of sustainable design*. Architectural Press.
- Wong, N. H., & Chen, Y. (2009). *Tropical urban heat islands: Climate, buildings and greenery*. Taylor & Francis.
- Yeang, K. (2006). *Ecodesign: A manual for ecological design*. Wiley-Academy.