Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

Recibido 20/08/2025
Aceptado 15/10/2025

OPTIMIZACIÓN DE ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVO EN CLIMAS CÁLIDOS-HÚMEDOS: UN MARCO HOLÍSTICO PARA LOS SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN DE EDIFICIOS VERDES

OPTIMIZING PASSIVE DESIGN STRATEGIES IN WARM-HUMID CLIMATES: A HOLISTIC FRAMEWORK FOR GREEN BUILDING RATING SYSTEMS

OTIMIZAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE DESIGN PASSIVO EM CLIMAS QUENTES E ÚMIDOS: UMA ABORDAGEM HOLÍSTICA PARA SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO DE EDIFICAÇÕES SUSTENTÁVEIS

Karthik Chadalavada
Master of Architecture
Assistant Professor, Department of Architecture
School of Planning and Architecture, Vijayawada, India
https://orcid.org/0000-0002-7598-0002
karthik.ch@spav.ac.in

Kranti Kumar Myneni
Doctor of Philosophy
Assistant Professor, Department of Architecture
School of Planning and Architecture, Vijayawada, India
https://orcid.org/0000-0002-0753-5636
kranti.myneni@spav.ac.in

Srinivas Daketi
Doctor of Philosophy
Professor, Department of Architecture
School of Planning and Architecture, Vijayawada, India
https://orcid.org/0000-0002-5995-9457
srinivas.d@spav.ac.in

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

RESUMEN

Las Herramientas de Certificación de Edificios Verdes (GBRT, por sus siglas en inglés), como LEED, BREEAM, GRIHA y WELL, evalúan la sostenibilidad de los edificios, pero a menudo carecen de un marco estandarizado para valorar las estrategias pasivas, esenciales para la eficiencia energética y el confort térmico en climas cálido-húmedos. Este estudio propone un marco holístico para optimizar dichas estrategias, integrando perspectivas cualitativas de expertos con datos cuantitativos de diversos sistemas. Mediante PCA, MCDA y modelos de regresión, se desarrolla un sistema de puntuación ponderado para comparar estrategias. El análisis muestra que las estrategias pasivas combinadas mejoran notablemente el desempeño sostenible. Home Performance Index (24,72) y ARZ (23,06) obtienen puntuaciones más altas, con énfasis en diseños pasivos, mientras que LEED (10,91) y GRIHA (9,96) muestran un margen de mejora. El marco AHP propuesto prioriza la envolvente del edificio, la ventilación natural, la aislación y la selección de materiales. Estudios de caso revelan que las estrategias pasivas pueden reducir la carga térmica en un 59%, bajar la temperatura interior en 2,5–3 °C y ahorrar hasta un 29% de energía, lo que refuerza su valor en contextos de climas cálido-húmedos.

Palabras clave
estrategias de diseño pasivo, GBRTs, desempeño en sostenibilidad, clima cálido-húmedo, modelo de puntuación ponderada

ABSTRACT

Green Building Rating Tools (GBRTs) such as LEED, BREEAM, GRIHA, and WELL assess building sustainability but often overlook a standardized framework for evaluating passive design strategies, which are critical for energy efficiency and thermal comfort in warm-humid climates. This study proposes a holistic framework for optimizing passive strategies by integrating qualitative expert insights with quantitative data across rating systems. Using PCA, MCDA, and regression modelling, a weighted scoring system is developed to compare strategies. Analysis shows that combined passive strategies significantly improve sustainability performance. Home Performance Index (24.72) and ARZ (23.06) score highest in passive design emphasis, while LEED (10.91) and GRIHA (9.96) reveal improvement potential. The proposed AHP framework focuses on envelope optimization, natural ventilation, insulation, and material selection to enhance climate responsiveness. Case studies demonstrate that passive measures such as shading, ventilation, and insulation reduce cooling loads by 59%, lower indoor temperatures by 2.5–3°C, and boost energy savings by up to 29%, reinforcing their value in warm-humid climate contexts.

Keywords
passive design strategies, GBRTs, sustainability performance, warm-humid climate, weighted scoring model

RESUMO

Ferramentas de Avaliação de Edifícios Sustentáveis (GBRTs), como LEED, BREEAM, GRIHA e WELL, avaliam a sustentabilidade, mas frequentemente não incluem um marco padronizado para estratégias de design passivo, essenciais em climas quentes e úmidos. Este estudo propõe um modelo holístico para otimizar essas estratégias, integrando análises qualitativas de especialistas e dados quantitativos entre os sistemas. Utilizando PCA, MCDA e regressão, é criado um sistema de pontuação ponderada para comparação estratégica. A análise mostra que estratégias passivas combinadas aumentam significativamente o desempenho sustentável. Home Performance Index (24,72) e ARZ (23,06) obtêm as maiores pontuações, enquanto LEED (10,91) e GRIHA (9,96) indicam necessidade de aprimoramento. O modelo AHP proposto foca em otimização da envoltória, ventilação natural, isolamento e seleção de materiais. Estudos de caso demonstram que estratégias como sombreamento e ventilação reduzem a carga térmica em 59%, diminuem a temperatura interna em 2,5–3 °C e economizam até 29% de energia, comprovando sua eficácia climática.

Palavras-chave
estratégias de design passivo, GBRTs, desempenho em sustentabilidade, clima quente e úmido, modelo de pontuação ponderada

INTRODUCCIÓN

Desde que la certificación de sostenibilidad se arraigó en muchos países, se ha convertido en una herramienta ampliamente aceptada para evaluar el desempeño ambiental de los edificios (Atampugre et al., 2022). La urbanización ha aumentado exponencialmente, lo que ha llevado a que los edificios representen casi el 40% del consumo mundial de energía (Agencia Internacional de la Energía [AIE], 2020) y el 36% de las emisiones de CO_2 (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2020). El sector de la construcción se ha convertido así en un importante contribuyente al cambio climático (Chen et al., 2021). En consecuencia, las Herramientas de Calificación de Edificios Ecológicos (GBRT, por su sigla en inglés) como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) y GRIHA (Green Rating for Integrated Habitat Assessment) se han vuelto esenciales para evaluar el impacto del sector.

Sin embargo, pocos estudios han explorado la comparabilidad y la efectividad de las estrategias de diseño pasivo en estos marcos de calificación, especialmente en climas cálido-húmedos, donde dichas estrategias resultan más cruciales. La literatura reciente respalda la noción de que las estrategias pasivas, como la ventilación natural, el sombreado y la orientación optimizada del edificio, pueden mejorar significativamente la eficiencia energética y la comodidad de los ocupantes (Aksamija, 2013; Steemers, 2003; Szokolay, 2012). Específicamente, el consumo de energía puede reducirse hasta un 40% en edificios residenciales y un 30% en los comerciales mediante el diseño pasivo (Berardi, 2017).

En climas cálido-húmedos, donde el enfriamiento mecánico de espacios puede representar casi la mitad del consumo de electricidad de un edificio, las técnicas de enfriamiento pasivo ofrecen alternativas prometedoras para reducir la demanda de energía (Alaidroos y Krarti, 2016; Hu et al., 2023). Las GBRT actuales varían ampliamente en la forma en que califican y sopesan las estrategias pasivas. Por ejemplo, LEED enfatiza el rendimiento energético y del agua, pero subrepresenta los elementos de diseño pasivo (USGBC, 2019). BREEAM incluye indicadores de sostenibilidad más amplios, pero carece de una provisión clara para las estrategias pasivas de BRE Global (2016). GRIHA se alinea mejor con las condiciones climáticas de la India, pero no se compara con los estándares globales (Kochhar et al., 2022). Finalmente, WELL pone un gran énfasis en los parámetros de IEQ, como la ventilación y la luz natural, mientras descuida la optimización de la energía (Kent et al., 2024).

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un marco holístico que integre las estrategias de diseño pasivo en todas las Herramientas de Calificación de Edificios Ecológicos (GBRT) aplicables y evaluar su efectividad práctica para lograr ahorros de energía, confort térmico y reducciones de la huella de carbono.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

- Desarrollar un marco cuantificado para estrategias de diseño pasivo en climas cálido-húmedos, integrando perspectivas cualitativas de expertos y métricas de desempeño de estudios de casos con las principales GBRT: LEED, BREEAM, GRIHA y WELL.
- Evaluar estas herramientas de calificación respecto de las metodologías de ponderación y de evaluación de estrategias de diseño pasivo, identificando diferencias, brechas e inconsistencias.
- Recopilar y analizar datos cuantitativos sobre el rendimiento de organismos certificadores, modelos de simulación energética y estudios de campo para evaluar el rendimiento de las principales características de diseño pasivo, como ventilación natural, aislamiento térmico, iluminación natural y dispositivos de sombreado.
- Emplear técnicas estadísticas avanzadas, como el Análisis de Componentes Principales (PCA), el Análisis de Decisiones Multicriterio (MCDA) y los métodos de puntuación ponderada, para cuantificar el impacto relativo de diferentes estrategias de diseño pasivo dentro y entre marcos de calificación.
- Desarrollar modelos predictivos y realizar análisis de sensibilidad mediante ecuaciones de regresión para identificar los criterios de diseño pasivo más influyentes que contribuyen a la eficiencia energética, al confort térmico y a la reducción de la huella de carbono.
- Proporcionar recomendaciones de políticas para una mayor integración y estandarización de las medidas de diseño pasivo en las GBRT, fomentando un enfoque holístico y sensible al clima para el diseño de edificios sustentables.

Esta investigación beneficiará a varias partes interesadas, entre ellas arquitectos, legisladores, desarrolladores y consultores de sostenibilidad, al proporcionar un marco basado en evidencia para evaluar soluciones de diseño pasivo en todos los sistemas de certificación. Al combinar datos estadísticos con perspectivas cualitativas de expertos, este estudio respalda un proceso de certificación basado en el desempeño y adaptado al clima. Los hallazgos apuntan a reducir la demanda de energía operativa en los edificios, lo que constituye un paso crucial para alcanzar los objetivos climáticos globales. Si se integran adecuadamente, las estrategias pasivas podrían reducir las emisiones de carbono en un 50% para 2030 y ayudar a alcanzar el estado cero neto para 2050 (Legg, S., 2021). Estos objetivos requieren una integración, evaluación y optimización sistemáticas del diseño pasivo en los programas formales de certificación para garantizar la eficiencia energética, la comodidad de los ocupantes y las soluciones arquitectónicas sensibles al clima.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Las estrategias de diseño pasivo, que incluyen ventilación natural, aislamiento térmico, iluminación natural y dispositivos de sombra, mejoran el rendimiento del edificio en climas cálidos y húmedos. Estas estrategias mejoran la calidad ambiental interior y la eficiencia energética al aprovechar las condiciones climáticas locales, reduciendo así la dependencia de los sistemas mecánicos. Los sistemas de calificación de edificios verdes (GBRS, por sus siglas en inglés) suelen respaldar dichos enfoques en la evaluación de la sustentabilidad. La ventilación natural es una estrategia pasiva clave que promueve el confort térmico interior al facilitar la eliminación del calor y al

mejorar la calidad del aire. Una revisión sistemática destaca su popularidad en regiones cálidas y húmedas para mejorar el confort térmico y reducir la demanda de enfriamiento mecánico (Chen et al., 2021). La aislación térmica, por su parte, minimiza la transferencia de calor entre los ambientes interiores y exteriores. Zahiri y Altan (2016) demostraron que una aislación adecuada en climas cálidos reduce significativamente el consumo de energía de enfriamiento. La iluminación natural reemplaza la artificial con luz natural, lo que ayuda a conservar energía. Sin embargo, debe equilibrarse con la ganancia de calor solar para ser eficaz en condiciones cálidas y húmedas. Altan et al. (2016) mostraron que un diseño apropiado de iluminación natural mejora la comodidad de los ocupantes, al tiempo que reduce las cargas de iluminación. Los dispositivos de sombreado, como persianas y voladizos, son esenciales para bloquear la radiación solar directa y reducir la ganancia de calor en interiores. Jega y Muhy Al-Din (2023) informaron que el sombreado disminuye significativamente la demanda de energía en edificios cálidos y húmedos.

Más allá del sombreado y la aislación, la materialidad desempeña un papel crucial. Tang et al. (2020) abogan por incluir dichos sistemas en las categorías de innovación en las GBRT. Las principales GBRS (LEED, BREEAM, GRIHA y WELL) evalúan la sostenibilidad mediante diversos indicadores. Un estudio comparativo reveló que, si bien todos estos sistemas promueven diseños energéticamente eficientes, el énfasis en las estrategias pasivas varía entre ellos (Chen et al., 2015). LEED asigna puntos en energía, IEQ e innovación, y los estudios sugieren una mayor satisfacción de los ocupantes en los edificios certificados LEED (Kent et al., 2024). BREEAM enfatiza la eficiencia de los recursos y el bienestar, alentando el diseño pasivo para lograr puntajes más altos. GRIHA se enfoca más en el clima de la India y promueve técnicas pasivas, como la iluminación y la ventilación naturales (Jadhav et al., 2020).

A pesar de su potencial, las estrategias pasivas enfrentan varias barreras para la implementación de GBRS, en particular en zonas cálido-húmedas. Chenvidyakarn (2018) enfatizó desafíos como datos climáticos inadecuados, variabilidad del comportamiento y objetivos de diseño en conflicto. La implementación efectiva requiere un enfoque holístico que considere la orientación, el clima y el comportamiento del usuario. Mientras que los sistemas activos (HVAC, iluminación) mejoran la eficiencia, las estrategias pasivas reducen la demanda de energía en la etapa de diseño.

Los GBRS indios aún no han proporcionado mecanismos de evaluación específicos de la región, adaptados a las diferentes necesidades climáticas (Shan y Hwang, 2018). Además, GRIHA y otros aún infravaloran el diseño pasivo en sus sistemas de crédito, lo que deja un margen significativo para su expansión. Un cambio hacia intervenciones pasivas gratificantes puede respaldar mejor los objetivos de sostenibilidad en la práctica. Las recientes intervenciones de bajo consumo y el aumento de los costos de la energía han renovado el interés por el diseño pasivo. Las GBRT son ahora clave para estandarizar las evaluaciones de edificios ecológicos a nivel mundial. Sin embargo, muchos permanecen indiferentes ante los matices climáticos regionales, lo que genera brechas en la evaluación. El Código Nacional de Construcción (NBC, por sus siglas en inglés) de la India reconoce la importancia de la evaluación pasiva del diseño en una etapa temprana e insta a la integración de medidas específicas de la región en los programas de certificación.

Se sabe que el entorno construido modifica las variables climáticas que inciden en el equilibrio energético del cuerpo humano; el confort térmico es uno de los factores que inciden en la habitabilidad espacial (Sosa-Castro et al., 2017). Para incorporar verdaderamente la sustentabilidad, las GBRT deben ir más allá de la puntuación genérica y desarrollar marcos sensibles al clima y basados en la investigación. Como destaca el Código Nacional de Construcción de la India (Oficina de Normas Indias, 2016), el diseño pasivo es rentable, adaptable a la escala local y fundamental para garantizar la comodidad de los ocupantes, al tiempo que reduce el consumo de energía. Los estándares regionales deben reflejar estas prioridades para respaldar un entorno construido resiliente y con bajas emisiones de carbono.

METODOLOGÍA

Este estudio emplea un diseño de investigación de método mixto para evaluar sistemáticamente la integración y ponderación de estrategias de diseño pasivo en las principales Herramientas de Calificación de Edificios Verdes (GBRT), incluidas LEED, GRIHA, BREEAM y WELL, con un enfoque en climas cálido-húmedos. El objetivo de la investigación no es evaluar la efectividad inherente de las estrategias en sí mismas, sino analizar cómo se contabilizan y priorizan en estos marcos de certificación. La metodología se estructura en tres fases secuenciales: recopilación de datos y mapeo de criterios; análisis cuantitativo y cualitativo; y desarrollo de marcos y evaluación comparativa.

La primera fase consistió en la recopilación exhaustiva de datos y el mapeo de criterios. Se recopilaron datos cualitativos mediante entrevistas semiestructuradas con arquitectos, consultores de sustentabilidad y analistas de desempeño de edificios para capturar información experta sobre la importancia percibida y los desafíos de implementación de las estrategias pasivas. Al mismo tiempo, se recopilaron datos cuantitativos sobre métricas de desempeño de edificios, como el consumo de energía y los niveles de luz natural, a partir de estudios de caso y de la literatura centrados en regiones cálidas y húmedas. Fundamentalmente, se llevó a cabo un mapeo sistemático de los criterios de crédito de las GBRT seleccionadas para identificar y categorizar todos los requisitos previos y los créditos relevantes para el diseño pasivo, estableciendo una línea de base de su representación actual.

En la segunda fase, estos datos fueron sometidos a un riguroso análisis cuantitativo y cualitativo. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) se utilizó para asignar ponderaciones relativas a los parámetros de diseño pasivo en función del juicio de los expertos, creando un punto de referencia para su importancia ideal. Simultáneamente, se desarrollaron modelos de regresión para identificar la relación entre las variables de diseño pasivo y los indicadores clave de desempeño. Los resultados de estos modelos (las ponderaciones derivadas de expertos y los predictores

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

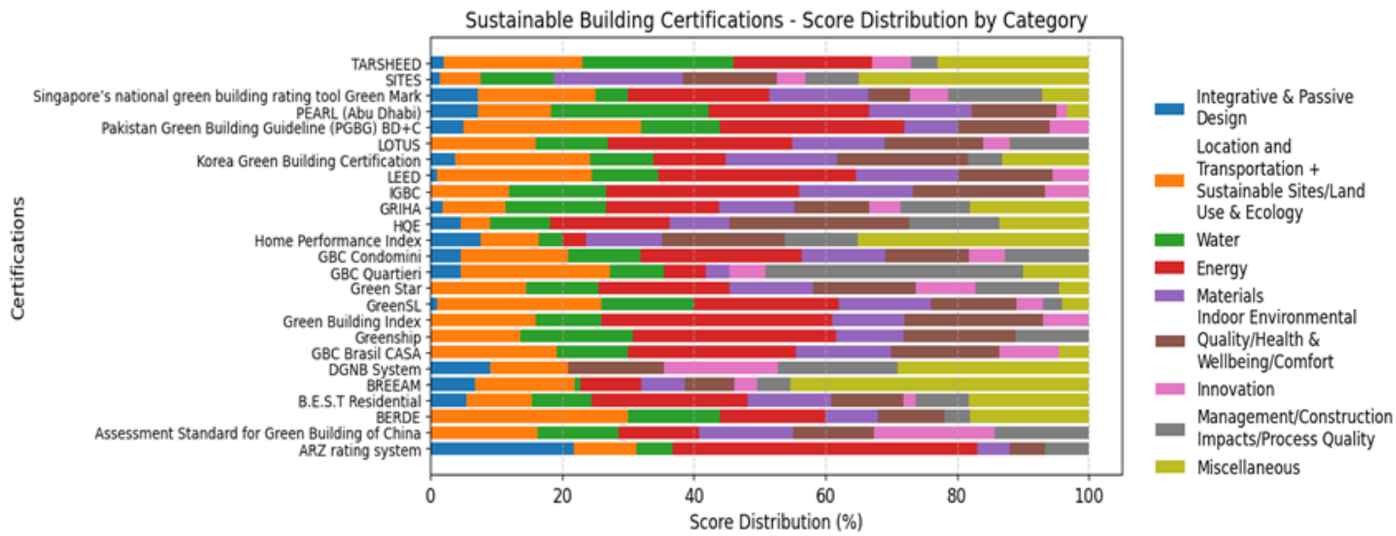

Figura 1. Distribución de puntuaciones de certificaciones en diferentes categorías. Fuente: Preparado por los autores.

basados en el desempeño) se compararon sistemáticamente con la ponderación crediticia real y la estructura de las GBRT mediante análisis de sensibilidad y ROC (Curva Característica Operativa del Receptor), lo que reveló brechas y desalineaciones.

La fase final se centró en sintetizar estos hallazgos en un resultado práctico. Se desarrolló un nuevo marco de puntuación ponderada que integra ponderaciones de expertos basadas en el AHP con datos de desempeño de modelos estadísticos. Luego, este marco propuesto se comparó con una selección de proyectos certificados bajo LEED, BREEAM, GRIHA y WELL para ilustrar su aplicación e identificar, con mayor especificidad, dónde y cómo se podrían mejorar los sistemas de calificación existentes para integrar y recompensar mejor las estrategias de diseño pasivo en futuras evaluaciones de edificios verdes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio empleó un enfoque mixto que incorporó PCA, AHP, análisis de regresión y entrevistas con expertos para evaluar cómo se representan y priorizan las estrategias de diseño pasivo en las Herramientas Globales de Calificación de Edificios Verdes (GBRT) en climas cálido-húmedos. Los resultados revelaron inconsistencias significativas en la ponderación y la profundidad otorgadas a las estrategias pasivas en las herramientas predominantes, lo que requiere un marco de evaluación más receptivo al clima.

VARIACIONES EN EL ÉNFASIS EN LA SUSTENTABILIDAD ENTRE LOS SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN

Un análisis en profundidad de las distribuciones de puntajes en 25 sistemas globales de certificación de edificios verdes (Figura 1) destaca las diversas formas en que se interpreta y se prioriza la sustentabilidad en las regiones geográficas y climáticas. Los sistemas internacionalmente destacados, como LEED (EE. UU.) y BREEAM (Reino Unido), demuestran una metodología de puntuación relativamente equilibrada, distribuyendo el énfasis de manera uniforme entre las categorías clave, incluidas la eficiencia energética, el uso de materiales, la conservación del agua y la calidad ambiental interior (IEQ, por sus siglas en inglés). Esta estructura

Tabla 1. Desglose del PCA para cada certificación según las estrategias de diseño pasivo. Fuente: Preparado por los autores.

Certificación	Puntuación de PCA
Sistema de calificación ARZ	3,84
Estándar de Evaluación para la Construcción Verde de China	-0,81
BERDE	-0,81
B.E.S.T Residential	0,35
BREEAM	0,63
Sistema DGNB	1,13
GBC Brasil CASA	-0,81
Greenship	-0,81
Índice de Construcción Verde	-0,81
GreenSL	-0,59
Green Star	-0,81
GBC Quartieri	0,16
GBC Condomini	0,16
Índice de Desempeño del Hogar	0,81
HQE	0,16
GRIHA	-0,40
IGBC	-0,81
LEED	-0,61
Certificación de Construcción Verde de Corea	-0,02
LOTUS	-0,81
Directriz de Construcción Verde de Pakistán (PGBG) BD + C	0,26
PEARL (Abu Dabi)	0,73
Green Mark de Singapur	0,72
SITES	-0,50
TARSHEED	-0,38

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

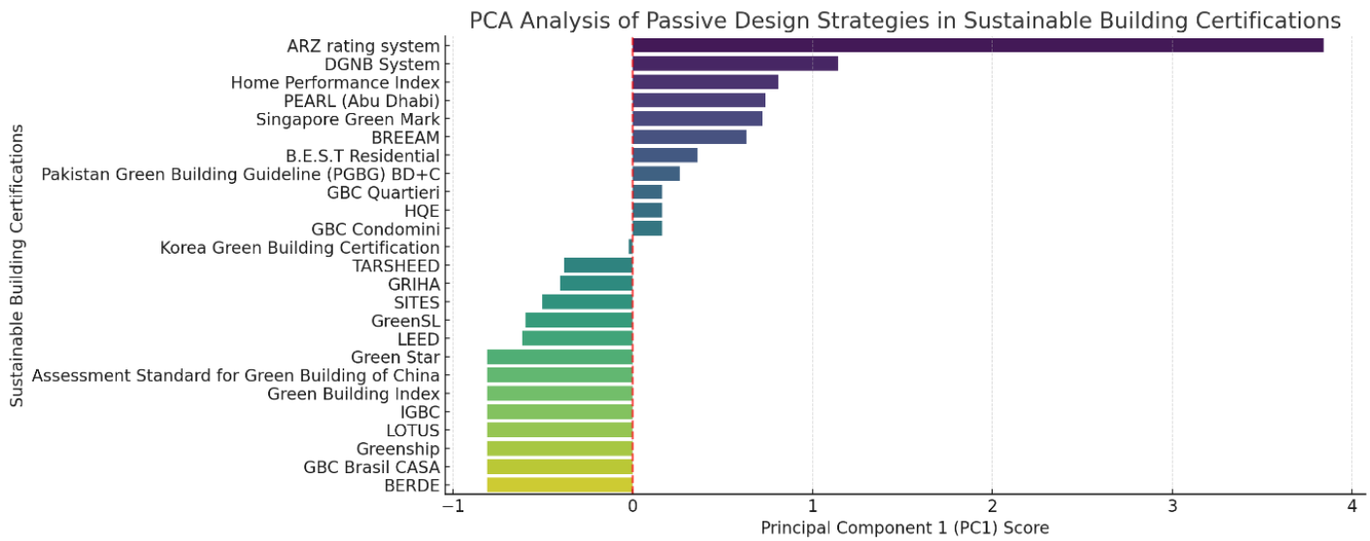

Figura 2. Análisis del PCA de estrategias de diseño pasivo para la certificación de edificación sustentable. Fuente: Preparado por los autores.

equilibrada refleja su intención de proporcionar puntos de referencia de sostenibilidad de aplicación universal.

Por el contrario, las herramientas específicas de la región, como la Green Mark de Singapur y el sistema de certificación PEARL de Abu Dhabi, asignan mayor peso a categorías como el uso sustentable de la tierra, la eficiencia del agua y la integración ecológica urbana. Estas prioridades reflejan el denso carácter urbano y el clima tropical de Singapur, así como el entorno árido y escaso de recursos de Medio Oriente. Mientras tanto, los sistemas europeos como DGNB (Alemania) y HQE (Francia) otorgan mayor importancia a la calidad ambiental interior y al bienestar de los ocupantes y se alinean con las estrictas normas de salud, confort y seguridad que prevalecen en la UE.

Por otro lado, sistemas como Greenenship (Indonesia) y TARSHEED (Qatar) priorizan la conservación del agua y la reducción de la energía, dados los acuciantes problemas ambientales que enfrentan esas regiones. En conjunto, estas distinciones subrayan que las GBRT no son modelos únicos para todos, sino que están profundamente moldeadas por factores climáticos, culturales y políticos contextuales, lo que enfatiza la necesidad de marcos de sustentabilidad adaptativos y sensibles a la región.

ÉNFASIS EN ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVO: PERSPECTIVAS DEL PCA

Los resultados del Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) (Figura 2, Tabla 1) revelan disparidades en la forma en que los sistemas de certificación incorporan estrategias de diseño pasivo. El PCA se basa en datos y reduce todas las variables a componentes principales. Destaca los sistemas que, estadísticamente, enfatizan ciertas estrategias pasivas (ventilación, sombreado, aislación). El sistema de calificación ARZ obtuvo la puntuación más alta (PC1 = 3,84), seguido de DGNB, Índice de Rendimiento del Hogar, PEARL y Green Mark, lo que indica una fuerte integración de ventilación, aislación y sombreado. Por el contrario, sistemas como LEED, GRIHA, IGBC, Índice de Construcción Verde y Greenship obtuvieron calificaciones negativas, lo que refleja una incorporación más débil del diseño pasivo. Debido a que el PCA se basa en la varianza estadística de las variables de entrada, tiende a resaltar los sistemas con una fuerte integración cuantitativa de múltiples características pasivas (por ejemplo, ARZ, DGNB). Sin embargo, el PCA no captura la priorización subjetiva ni las ponderaciones asignadas por los expertos, lo que explica por qué algunos sistemas que obtienen una buena puntuación en el PCA se clasifican de manera diferente en el AHP.

CLASIFICACIONES DE ESTRATEGIA PASIVA: AHP Y RESULTADOS DE REGRESIÓN

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) arrojó clasificaciones ponderadas (Tabla 2, Figura 3), identificando el Índice de Desempeño del Hogar (24,72) y el ARZ (23,06) como los sistemas de calificación de mayor rendimiento, debido a su fuerte énfasis en las estrategias de diseño pasivo. En contraste, LEED (10,91) y GRIHA (9,96) recibieron puntajes moderados, lo que indica limitaciones en su capacidad para responder a los principios de diseño adaptativo al clima. AHP está impulsado por expertos y prioriza según el juicio humano sobre la importancia. Es por eso que el Índice de Desempeño del Hogar y ARZ parecen fuertes, pero sistemas como LEED suben en AHP (a pesar de los puntajes más débiles de PCA) porque los expertos reconocen sus marcos más amplios.

Las puntuaciones del AHP se derivaron de juicios de expertos (n = 15) que realizaron comparaciones por pares de criterios de diseño pasivo en 25 sistemas de calificación. Los expertos (arquitectos, consultores y asesores de políticas de India, Singapur y Medio Oriente) fueron seleccionados por su experiencia directa en proyectos de clima cálido-húmedo. Las ponderaciones finales se sintetizaron mediante el

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

método estándar de valores propios de AHP para garantizar una priorización basada en el consenso.

Complementando esto, el análisis de regresión (Tabla 4) demostró la importancia estadística de elementos de diseño pasivos específicos para reducir el consumo de energía de enfriamiento: los dispositivos de sombreado condujeron a una reducción de 18,2 kWh/m^2/año ($p < 0,001$), la aislación de paredes logró un ahorro de 12,3 kWh/m^2/año, el albedo del techo contribuyó con 10,5 kWh/m^2/año y la ventilación natural mejoró las tasas de cambio de aire en 7,8 ACH. El modelo de regresión representó el 82% de la varianza en el uso de energía de enfriamiento ($R2 = 0,82$), lo que subraya el papel crítico de las estrategias pasivas. Estos coeficientes se extrajeron y estandarizaron a partir de múltiples estudios revisados por pares en climas cálidos y húmedos. Para garantizar la comparabilidad, los valores se normalizaron con respecto a los edificios de referencia informados en la literatura (generalmente con cumplimiento mínimo o diseños convencionales sin características pasivas). Por lo tanto, los "ahorros" representan mejoras relativas respecto de estas líneas de base, en lugar de cifras absolutas universales.

Además, el análisis de la curva ROC (Figura 4) respaldó estos hallazgos, con una AUC (Área Bajo la Curva) de 0,80, lo que indica una alta precisión predictiva de las variables de diseño pasivo en la evaluación del desempeño de la sustentabilidad. ROC se basó en una clasificación logística en la que los edificios se clasificaron como de "alto rendimiento" si la reducción de la carga de enfriamiento era ≥20% respecto de los valores de referencia informados en la literatura, y de "bajo rendimiento" en caso contrario. Utilizando variables pasivas (sombreado, aislación, albedo del techo, ventilación natural) como predictores, el modelo logró una AUC de 0,80, lo que demuestra que estas estrategias distinguen de manera confiable entre casos de alto y bajo rendimiento.

La divergencia entre PCA y AHP resalta una idea clave: PCA refleja la incorporación estructural de criterios pasivos en los marcos de certificación, mientras que AHP refleja la importancia percibida asignada por los expertos. Por ejemplo, el puntaje PCA relativamente bajo de LEED (-0,61) muestra un énfasis estadístico limitado en las características pasivas; sin embargo, su puntaje AHP moderado (10,91) refleja el reconocimiento de los expertos de su adaptabilidad global y de sus contribuciones indirectas al desempeño pasivo. Esta superposición y divergencia ilustran cómo las evaluaciones estadísticas y basadas en expertos pueden complementarse entre sí. Los resultados de la regresión refuerzan los hallazgos del PCA y del AHP al cuantificar el impacto de las medidas pasivas individuales. Por ejemplo, el sombreado (-18,2 kWh/m²/año) y la aislación de paredes (-12,3 kWh/m²/año) emergen como predictores estadísticamente significativos de ahorro de energía, alineándose con las clasificaciones AHP ponderadas por expertos que colocaron las estrategias de envolvente y sombreado en la cima. Por lo tanto, aunque PCA/AHP difieren en las clasificaciones generales, ambos convergen en la importancia de la optimización y la ventilación de la envolvente.

Tabla 2. Puntuaciones ponderadas según la sustentabilidad de cada certificación. Fuente: Preparado por los autores.

Calificación	Certificación	Puntuación ponderada
1	Índice de Desempeño del Hogar	24,72
2	Sistema de calificación ARZ	23,06
3	SITES	19,28
4	PEARL (Abu Dabi)	19,14
5	Green Mark de Singapur	15,06
6	Certificación de Construcción Verde de Corea	14,26
7	BREEAM	14,14
8	Sistema DGNB	12,09
9	GBC Quartieri	11,58
10	B.E.S.T Residential	11,44
11	Directriz de Construcción Verde de Pakistán	11,27
12	TARSHEED	11,19
13	BERDE	11,04
14	GBC Condomini	10,97
15	LEED	10,91
16	Greenship	10,66
17	HQE	10,40
18	GBC Brasil CASA	10,29
19	GreenSL	10,19
20	GRIHA	9,96
21	Green Star	9,66
22	Índice de Construcción Verde	9,16
23	LOTUS	8,98
24	IGBC	6,52
25	Estándar de Evaluación para la Construcción Verde de China	4,12

Figura 3. Clasificación basada en puntajes ponderados. Fuente: Preparado por los autores.

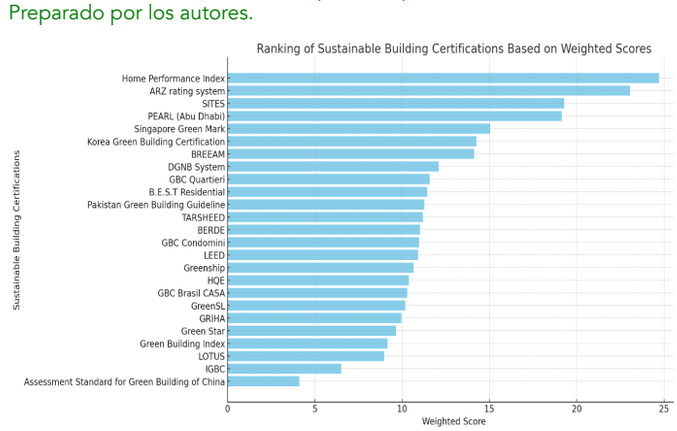

Figura 4. Curva ROC. Fuente: Preparado por los autores.

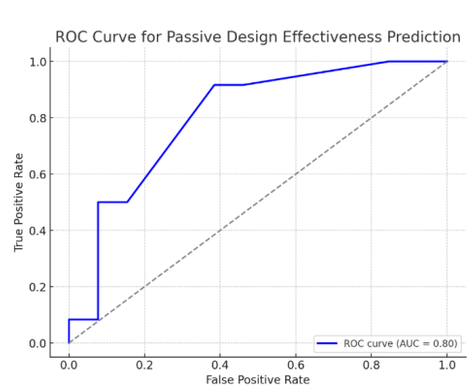

Tabla 3. Puntuaciones medias de las variables de diseño pasivo según expertos. Fuente: Preparado por los autores.

Variable	Media	Desviación estándar (DE)	Mínimo	Máximo
Consumo de energía de enfriamiento (kWh/m²/año)	134,5	18,7	110,0	180,0
Dispositivos de sombreado (Binario: 1 = Sí, 0 = No)	0,65	0,48	0,00	1,00
Ventilación natural (ACH)	4,5	1,2	1,5	6,0
Albedo del techo (% de reflectancia)	0,52	0,15	0,20	0,80
Aislación de la pared (Valor U, W/m²K)	1,2	0,6	0,4	2,5

PERSPECTIVAS DE EXPERTOS SOBRE LA IMPLEMENTACIÓN DE DISEÑO PASIVO

Las perspectivas de las entrevistas con expertos se recopilaron mediante entrevistas semiestructuradas con 15 profesionales, incluidos arquitectos, consultores de sustentabilidad y asesores de políticas, principalmente de India, Singapur y Medio Oriente. Los criterios de selección incluyeron la experiencia directa en proyectos de clima cálido-húmedo o la participación en GBRT. Las entrevistas incluyeron a 8 participantes de India, 4 de Singapur y 3 de Medio Oriente. Se adoptó una estrategia de muestreo intencional para garantizar la participación directa en proyectos de clima cálido-húmedo o en el desarrollo de GBRT. Las respuestas se codificaron y categorizaron temáticamente, y las variables clave, como sombreado, aislamiento y ventilación, se cuantificaron mediante escalas de calificación de expertos. Las perspectivas cualitativas se tradujeron posteriormente en calificaciones cuantitativas mediante ejercicios de puntuación de expertos, en los que los participantes asignaron valores de importancia relativa a cada estrategia en una escala estandarizada. Estas puntuaciones informaron la Tabla 3.

La mayoría de los expertos enfatizaron que la ventilación cruzada, los dispositivos de sombreado y la aislación son críticos en climas cálido-húmedos. Muchos hicieron referencia a precedentes vernáculos, como gruesos muros de cal y patios en Amaravati, que mejoran tanto la comodidad como el acceso a la luz del día.

Un arquitecto dijo:

"En regiones cálido-húmedas, la estrategia de diseño pasivo más efectiva es la ventilación cruzada. La colocación de aberturas debe favorecer el movimiento del viento para reducir la humedad de forma natural."

Otros enfatizaron el aislamiento del techo y la reflectividad. Los expertos también destacaron las disparidades en las prácticas de diseño de aislación, señalando que los valores de U oscilaban entre 0,4 y 2,5 W/m²K en los edificios estudiados (Tabla 3). Un científico de materiales agregó:

"Los PCM, los compuestos de bambú y los materiales para techos de alto albedo pueden mejorar significativamente el rendimiento térmico."

Sin embargo, varios desafíos siguen obstaculizando la implementación generalizada de estrategias de diseño pasivo. Los expertos destacaron las barreras clave, incluida la renuencia relacionada con los costos entre los desarrolladores, las limitaciones planteadas por la alta densidad urbana, que limitan la ventilación efectiva y la penetración de la luz del día, y la ausencia de métricas sólidas basadas en el rendimiento en las Herramientas Actuales de Calificación de Edificios Verdes (GBRT). A pesar de estos obstáculos, la tecnología fue ampliamente considerada un catalizador de la mejora. Muchos expertos enfatizaron el potencial de las herramientas impulsadas por IA para optimizar las estrategias pasivas, el uso del Modelado de Información de Construcción (BIM) para simular el flujo de aire, el sombreado y la luz natural, y la importancia de integrar materiales de origen local con propiedades térmicas apropiadas para el clima. Hubo un amplio consenso sobre la necesidad de incentivos impulsados por políticas y sobre la incorporación obligatoria de componentes de diseño pasivo en los sistemas de calificación. Como señaló un analista de sustentabilidad:

"Los gobiernos deberían exigir elementos pasivos e incentivar a los desarrolladores a través de reembolsos de impuestos y permisos acelerados."

Los expertos recomendaron, además, que los planes de estudio de arquitectura incluyan capacitación en diseño pasivo para garantizar que los futuros profesionales estén bien equipados.

DESARROLLO DE MARCOS A PARTIR DE APORTES DE EXPERTOS

El marco se obtuvo combinando ponderaciones cuantitativas de AHP (Tabla 2), la validación estadística del análisis de regresión (Tabla 4) y los datos de percepción de los expertos (Tabla 3). Esta triangulación aseguró que la inclusión de cada estrategia no solo se basara en su relevancia teórica, sino que también estuviera respaldada por el consenso de expertos y por impactos cuantificados en el desempeño energético. Destaca estrategias como la optimización de la envolvente, la aislación, la ventilación y la selección de materiales, adaptadas a climas cálido-húmedos. Estos resultados validan la necesidad de integrar estrategias pasivas contextuales en las GBRT para garantizar una verdadera capacidad de respuesta climática.

El tema central del marco involucra la optimización de la envolvente del edificio, la ventilación natural, la aislación de techos y paredes y la selección de materiales como componentes para reducir significativamente la demanda de

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

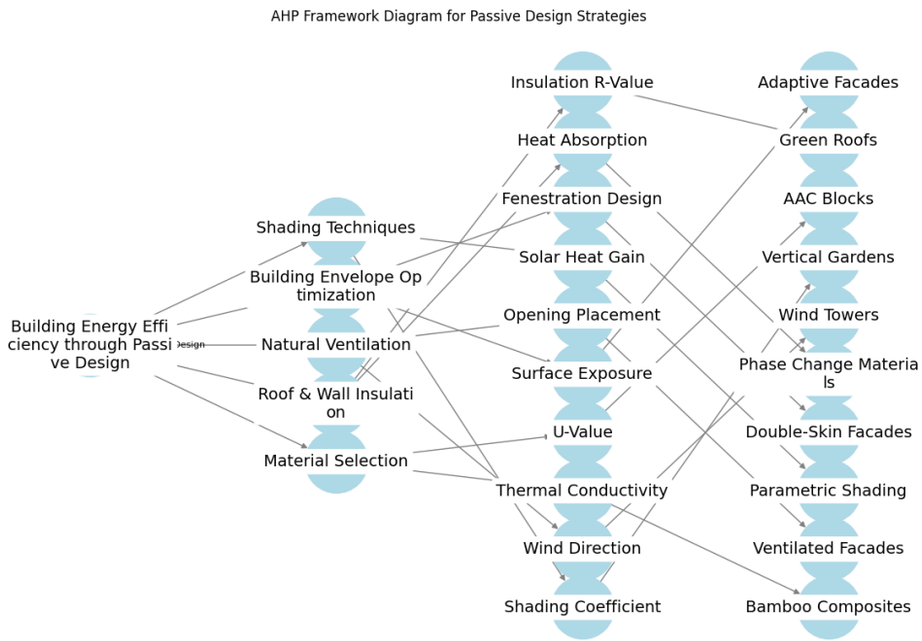

Figura 5. Malla marco de estrategias pasivas para climas cálido-húmedos a través de opiniones de expertos. Fuente: Preparado por los autores.

energía (Figura 5). Entre estos, estrategias como dispositivos de sombreado, espesor de aislación (valores U y R) y albedo del techo se cuantificaron directamente mediante análisis de regresión, lo que demostró reducciones medibles en las cargas de enfriamiento (Tabla 4). Otros, como las fachadas adaptativas y los compuestos de bambú, se incluyeron en función del juicio de expertos y de la evidencia cualitativa, lo que indica un gran potencial, pero requiere una validación empírica adicional. Así, el marco integra tanto los impactos medidos como las estrategias emergentes, reflejando la práctica actual y las trayectorias de innovación. Los temas cualitativos de las entrevistas (por ejemplo, el rol de los patios, las aberturas vernáculas, las fachadas adaptativas) se triangularon con ponderaciones cuantitativas de AHP y con resultados de regresión para refinar las categorías del marco.

El marco adopta un enfoque integral y de múltiples niveles, integrando estrategias pasivas para crear edificios energéticamente eficientes y sensibles al clima en las zonas cálido-húmedas de la India. Es importante destacar que el marco no es una lista de verificación estática, sino una herramienta ponderada para apoyar la toma de decisiones. La puntuación basada en el AHP permite clasificar cada medida según su importancia relativa, mientras que los coeficientes de regresión permiten traducir las decisiones de diseño en ahorros de energía esperados. Por ejemplo, los diseñadores pueden priorizar estrategias de alto impacto, como el sombreado y la aislación de paredes, mientras que los legisladores pueden usar ponderaciones para ajustar los créditos GBRT según la relevancia específica del clima.

EVIDENCIA DE ESTUDIOS DE CASO

Los estudios de casos de varias regiones climáticas refuerzan fuertemente la efectividad de las estrategias de diseño pasivo para mejorar el confort térmico y reducir la demanda de energía (Tablas 4 y 5). Se incluyeron cinco estudios de caso representativos y un metanálisis. Los criterios de selección fueron: (i) ubicación en regiones cálido-húmedas o de clima cálido; (ii) disponibilidad de datos cuantificables sobre el desempeño de estrategias pasivas; y (iii) diversidad de tipos de edificios (residenciales y no residenciales). En Tangerang, Indonesia, una región cálido-húmeda, la integración de aislación, ventilación y sombreado resultó en una reducción del 35% en las cargas de enfriamiento, una caída de 2,5 °C en las temperaturas interiores y una disminución del 29% en el consumo de energía, lo que demuestra el impacto combinado de múltiples técnicas pasivas.

Un metaanálisis más amplio de edificios de clima cálido reveló beneficios consistentes, con estrategias pasivas que condujeron a una reducción promedio del 31% en las cargas de enfriamiento y un aumento del 23% en las horas de confort térmico. En la Franja de Gaza, conocida por su clima hostil y por el acceso limitado a la energía, las intervenciones pasivas, como el diseño mejorado de la envolvente y el sombreado, lograron una reducción del 59% en la demanda de enfriamiento y una disminución de 3 °C en las temperaturas interiores. En Washington, EE.UU., el uso de acristalamiento y sombreado avanzados redujo las horas de incomodidad hasta en un 60%, mientras que los estudios de casos egipcios informaron aumentos en las horas de comodidad que oscilaron entre el 22,6% y el 46%, según la ciudad y la intervención específica.

Aunque los estudios de caso actuales se extraen de Asia, Medio Oriente y América del Norte, existen desafíos climáticos y urbanos similares en América Latina. Por ejemplo, estudios en Brasil y Colombia han documentado el papel del sombreado y la ventilación cruzada en la reducción de la demanda de enfriamiento en regiones

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 90 - 101
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.07

Tabla 4. Impacto de las estrategias pasivas en el consumo de energía de enfriamiento. Fuente: Preparado por los autores.

Variable	Coeficiente (β)	Error Estándar	Estadística t	Valor p
Intercepción (β_0)	185,4	5,2	35,65	<0,001
Dispositivos de sombreado	-18,2	3,4	-5,35	<0,001
Ventilación natural	-7,8	2,1	-3,71	0,002
Albedo del techo	-10,5	2,8	-3,75	0,001
Aislación de paredes	-12,3	3,0	-4,10	<0,001

Tabla 5. Métricas de desempeño - estudios de caso. Fuente: Preparado por los autores.

Ubicación del estudio de caso	Estrategias pasivas implementadas	Reducción de la carga de enfriamiento (%)	Reducción de la temperatura interior (°C)	Ahorro energético (%)	Mejora del confort térmico (%)
Tangerang, Indonesia (Chen et al., 2021)	Aislación mejorada, ventilación natural, sombreado	35%	2,5°C	29%	N/A
Climas cálidos (Hu et al., 2023)	Aislación de techos y paredes, sombreado de ventanas, optimización de la ventilación	31% (promedio.)	2,2°C (promedio))	29%	Aumento del 23% en las horas de confort térmico
Franja de Gaza (Mushtaha et al ., 2021)	Dispositivos de sombreado, ventilación natural, aislación térmica	59%	3,0°C	N/A	N/A
Washington, EE. UU. (Rana, 2021)	Ventanas de triple acristalamiento de baja emisividad, voladizos, persianas, aislación mejorada, ventilación natural	N/A	N/A	N/A	Reducción del 44% - 60% en horas fuera de confort
Egipto (El Gindi, S. 2023)	Intervenciones de enfriamiento pasivo	N/A	N/A	N/A	Aumento de las horas de confort: Asuán (22,6% → 33,1%), El Cairo (31,1% → 38,6%), Alejandría (36,9% → 46%)

tropicales (por ejemplo, el marco GBC Brasil CASA). Vincular estos hallazgos regionales demuestra la transferibilidad de nuestro marco propuesto a contextos latinoamericanos, donde las zonas cálido-húmedas, como la cuenca del Amazonas, enfrentan desafíos paralelos. Las cifras informadas representan promedios de estudios de simulación (Hu et al., 2023) o de evaluaciones realizadas posteriormente a la ocupación (Chen et al., 2021). Cuando las fuentes informaron un rango, se usó la media. El ahorro de energía se compara con el de edificios de referencia convencionales en el mismo clima y tipo de uso. Si bien estos hallazgos demuestran un sólido desempeño técnico, su adopción está determinada por las prácticas culturales locales (por ejemplo, los patios vernáculos en Gaza), la viabilidad económica (por ejemplo, el alto costo del triple acristalamiento en el contexto de los EE. UU.) y los incentivos regulatorios (por ejemplo, los códigos energéticos en evolución de Egipto). Esto indica que la efectividad del diseño pasivo no solo depende del clima, sino también de factores socioeconómicos y políticos. Esto significa que, colectivamente, aunque estos hallazgos resaltan la versatilidad, resiliencia y efectividad del diseño pasivo cuando se adapta a los contextos climáticos y culturales locales, también enfatizan

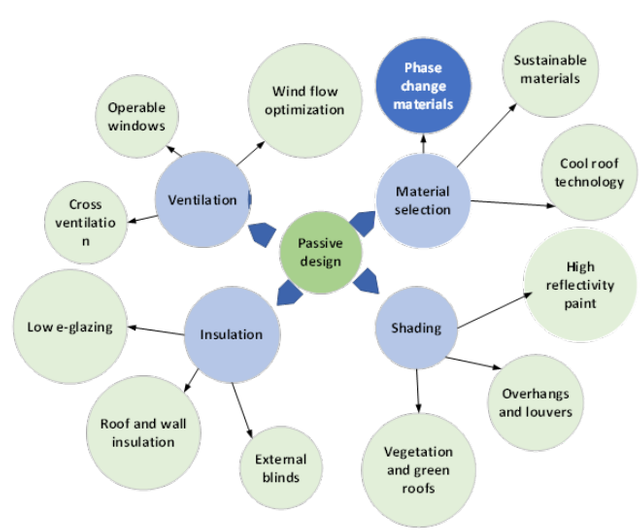

Figura 6. Marco basado en hallazgos de estudios de casos y entrevistas con expertos. Fuente: Preparado por los autores.

la necesidad de pautas específicas para el clima y de puntos de referencia basados en el desempeño en los marcos de construcción ecológica para incorporar estas estrategias a nivel mundial.

SÍNTESIS: HACIA UN MARCO HOLÍSTICO DE DISEÑO PASIVO

El estudio culmina proponiendo un marco de diseño pasivo sensible al clima (Figura 6) que integra estrategias clave identificadas en todos los métodos analíticos. El marco está estructurado para guiar tanto el diseño como la evaluación, categorizando las estrategias pasivas en cinco grupos: envolvente (aislación, sombreado, acristalamiento), ventilación (ventilación cruzada, efecto de apilamiento), iluminación natural (control del deslumbramiento, colocación de ventanas), planificación espacial (zonificación, orientación) y materialidad (masa térmica, reflectancia superficial) .

La combinación de PCA, AHP y regresión ofrece, por lo tanto, una comprensión triangulada. El PCA revela la representación estructural de las estrategias pasivas, AHP contextualiza las percepciones de importancia de los expertos y la regresión valida sus impactos en el desempeño en el mundo real. Juntos, estos métodos revelan tanto brechas (subrepresentación de LEED/GRIHA a pesar del fuerte reconocimiento por parte de expertos) como sinergias (alta alineación entre PCA y AHP en ARZ y HPI) en los sistemas de calificación actuales. Este marco no solo cierra la brecha entre estrategia y calificación, sino que también aborda la adaptabilidad contextual, que actualmente está ausente en las GBRT. Las perspectivas acumulativas sugieren que los sistemas de calificación existentes, aunque expansivos, no promueven lo suficiente la excelencia del diseño pasivo, especialmente en regiones cálido-húmedas.

CONCLUSIÓN

El estudio logró sus objetivos al (i) comparar sistemáticamente las GBRT con las ponderaciones de la estrategia pasiva utilizando PCA, AHP y análisis de regresión; (ii) integrar entrevistas con expertos para capturar conocimientos específicos del contexto; y (iii) desarrollar un marco ponderado de apoyo a la toma de decisiones que cuantifique las contribuciones medidas y percibidas de las estrategias pasivas. Este estudio desarrolló un marco basado en datos que integra estrategias de diseño pasivo adaptadas a los climas cálido-húmedos de la India. El marco enfatiza un enfoque basado en sistemas frente a intervenciones aisladas y aborda la necesidad de adaptabilidad regional. Su importancia radica en unir estrategias teóricas con aplicaciones en el mundo real, ofreciendo una guía escalable tanto para contextos urbanos como rurales. Una contribución clave de esta investigación es la integración de múltiples métodos analíticos (PCA, AHP, regresión) con conocimientos codificados por expertos, que, en conjunto, van más allá de las listas descriptivas de estrategias hacia un modelo de priorización cuantificado y específico para el clima. Los hallazgos comparativos, como la subrepresentación de estrategias pasivas en LEED y GRIHA, en contraste con un desempeño más sólido en ARZ y HPI, ofrecen puntos de referencia basados en evidencia que no estaban consolidados previamente en la literatura. Sin embargo, las limitaciones incluyen la necesidad de una validación geográfica más amplia, la adaptabilidad en áreas urbanas densas y la viabilidad financiera de algunas intervenciones.

Para la práctica profesional, el marco proporciona una guía práctica: se debe priorizar el sombreado y la aislación de paredes como intervenciones de alto impacto y bajo costo, mientras que se deben buscar materiales innovadores, como PCM y fachadas adaptativas, donde los presupuestos lo permitan. Para las políticas, los gobiernos pueden acelerar la adopción incorporando medidas pasivas, como requisitos previos obligatorios en las GBRT, y vinculándolas con incentivos financieros, como reembolsos de impuestos o aprobaciones aceleradas. Los organismos de certificación también deben recalibrar su calificación para reflejar las prioridades sensibles al clima, asegurando que las estrategias críticas para las regiones cálido-húmedas reciban el peso adecuado.

La investigación futura debería centrarse en estudios de desempeño a largo plazo, en la integración de herramientas de diseño basadas en IA y en modelos de evaluación basados en el desempeño. El apoyo político, los incentivos financieros y la educación son fundamentales para una adopción generalizada. Este estudio contribuye con un paso fundamental hacia una arquitectura centrada en el ocupante y sensible al clima en los sistemas de certificación verde.

CONTRIBUCIÓN DEL AUTOR CRediT

Conceptualización, K. C.; Curación de Datos, K. C.; Análisis Formal, K. C.; Adquisición de Financiamiento, K. C.; Investigación, K. C.; Metodología, K. C. y K. K. M.; Gestión de Proyectos, K. K. M. y S. D.; Recursos, K. C.; Software. K. C.; Supervisión, K. K. M y S. D.; Validación, K. C.; Visualización, K. C.; Escritura-borrador original, K. C.; Escritura-revisión y edición, K. K. M y S. D.; Escritura-revisión y edición, K. C., K. K. M. y S. D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aksamija, A. (2013). *Sustainable facades: Design methods for high-performance building envelopes*. John Wiley & Sons.

Alaidroos, A., & Krarti, M. (2016). Numerical modeling of ventilated wall cavities with spray evaporative cooling system. *Energy and Buildings*, *130*, 350–365. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.046

Altan, H., Hajibandeh, M., Tabet Aoul, K. A., & Deep, A. (2016). Passive design in M. Noguchi (Ed.) *ZEMCH: Toward the delivery of zero energy mass custom homes* (pp. 209-236). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31967-4_8

Atampugre, G., Mensah, E., Mabhaudhi, T., & Cofie, O. (2022). *Towards a framework for assessing the sustainability of social-ecological landscapes*. IWMI.

Berardi, U. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, *123*, 230-241. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014

BRE Global. (2016). *BREEAM New Construction Manual*. Building Research Establishment.

Bureau of Indian Standards. (2016). *National Building Code of India 2016 (Vol. 2)*. https://dn790000.ca.archive.org/0/items/nationalbuilding02/in.gov.nbc.2016.vol2.digital.pdf

Chen, X., Yang, H., & Lu, L. (2015). A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 1425–1436. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.003

Chen, Y., Mae, M., Taniguchi, K., Kojima, T., Mori, H., Trihamdani, A. R., Morita, K., & Sasajima, Y. (2021). Performance of passive design strategies in hot and humid regions. Case study: Tangerang, Indonesia. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *20*(4), 458-476. https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1798775

Chenvidyakarn, T. (2018). Passive design for thermal comfort in hot humid climates. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, *5*(1), 1-28. https://doi.org/10.56261/jars.v5i1.169198

El Gindi, S. (2023). Evaluation of the effectiveness of passive design strategies in achieving thermal comfort in residential buildings in Egypt. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1283*(1), 012011. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1283/1/012011

Hu, M., Zhang, K., Nguyen, Q., & Tasdizen, T. (2023). The effects of passive design on indoor thermal comfort and energy savings for residential buildings in hot climates: A systematic review. *Urban Climate*, 49, 101466. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101466

International Energy Agency [IEA]. (2020). *Energy Efficiency 2020*. OECD Publishing, Paris. https://doi.org/10.1787/dfd85134-en

Jadhav, L., Lokhande, S., Tupe, A., Bade, A., Tupe, A., & Sankpal, A. (2020). Comparative study of LEED, BREEAM and GRIHA rating system. *International Journal of Engineering Research and Technology,* 8(12), 1235–1238. https://doi.org/10.17577/IJERTV8IS120305

Jega, A. I., & Muhy Al-Din, S. S. (2023). Implication of shading passive strategies in buildings of hot and humid climates for energy optimization: Lessons from vernacular dwellings in Nigeria. *Journal of Salutogenic Architecture*, *2*(1), 50-69. https://doi.org/10.38027/jsalutogenic_vol2no1_4

Kent, M. G., Parkinson, T., & Schiavon, S. (2024). Indoor environmental quality in WELL-certified and LEED-certified buildings. *Scientific Reports*, *14*(1), 15120. https://doi.org/10.1038/s41598-024-65768-w

Kochhar, P., Mahal, N., Seth, S., & Singh, M. (2022). Green Rating for Integrated Habitat Assessment—A green-building rating system for catalysing climate-change mitigation/adaptation in India. *F1000Research*, *11*, 153. https://doi.org/10.12688/f1000research.108826.1

Legg, S. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021 – the Physical Science basis. *Interaction*, *49*(4), 44-45. https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.315096509383738

Mushtaha, E., Salameh, T., Kharrufa, S., Mori, T., Aldawoud, A., Hamad, R., & Nemer, T. (2021). The impact of passive design strategies on cooling loads of buildings in temperate climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, *28*, 101588. https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101588

Rana, K. (2021). Towards passive design strategies for improving thermal comfort performance in a naturally ventilated residence. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, *29*(2), 150-174. https://doi.org/10.5755/j01.sace.29.2.29256

Shan, M., & Hwang, B.-G. (2018). Green building rating systems: Global reviews of practices and research efforts. *Sustainable cities and society*, *39*, 172-180. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.034

Sosa-Castro, M. B., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2017). Influence of urban morphology on outdoor thermal habitability in an arid city. *Sustainable Habitat, 7*(1), 44–53. https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2616

Steemers, K. (2003). Energy and the city: Density, buildings, and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), 3–14. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00075-0

Szokolay, S. V. (2012). *Introduction to architectural science: The basis of sustainable design*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780080473130

Tang, K. H. D., Foo, C. Y. H., & Tan, I. S. (2020). A review of the green building rating systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *943*, 012060. https://doi.org/10.1088/1757-899X/943/1/012060

USGBC. (2019). *LEED v4 for Building Design and Construction*. U.S. Green Building Council. https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC_07.25.19_current.pdf

United Nations Environment Program [UNEP]. (2020). *Emissions Gap Report 2020*. United Nations Environment Programme, Nairobi. https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020

Zahiri, S., & Altan, H. (2016). The effect of passive design strategies on thermal performance of female secondary school buildings during warm season in a hot and dry climate. *Frontiers in Built Environment*, *2*. https://doi.org/10.3389/fbuil.2016.00003