

ESTUDIO TÉRMICO DE MUROS VENTILADOS TRADICIONALES EN CONDICIONES CLIMÁTICAS TROPICALES DEL CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

Recibido 25/06/2024
Aceptado 16/10/2024

THERMAL STUDY OF TRADITIONAL VENTILATED WALLS IN THE TROPICAL CLIMATIC CONDITIONS OF CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA

ESTUDO TÉRMICO DE PAREDES VENTILADAS TRADICIONAIS NAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS TROPICAIS DE CATATUMBO, NORTE DE SANTANDER, COLÔMBIA

Carmen Xiomara Díaz-Fuentes

Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Estudiante de Doctorado Gestión de la Innovación Tecnológica, Nodo de Innovación (UANDES) - Docente, Departamento de Arquitectura (UFPS)

Universidad de Los Andes - Universidad Francisco de Paula Santander, Bogotá - San José de Cúcuta, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-8223-5887>

carmenxiomaradf@ufps.edu.co



RESUMEN

La propuesta de investigación está orientada a identificar una serie de tipologías de muros de cerramiento ventilados tradicionales del mercado de la construcción, como calados, celosías y paneles metálicos con el fin de desarrollar un estudio térmico bajo condiciones climáticas del Catatumbo en Norte de Santander, Colombia. La metodología es teórica a través de simulaciones de transferencia de calor bajo el método de elementos finitos en ANSYS para identificar la relación entre la permeabilidad de superficies y la incidencia en el comportamiento de temperaturas y flujos de calor. Los resultados exponen que las tipologías más permeables, como calados y celosías, registran menos transferencia de energía y temperatura a las tipologías menos permeables, como los paneles metálicos. Además, demostró que existen otros factores como forma y propiedades térmicas de los materiales que conforman las unidades constructivas. Finalmente, el estudio térmico de muros ventilados consolida información técnica de alternativas de cerramiento tradicionales como guía de diseño y planificación de viviendas y edificaciones en zonas de posconflicto, con el fin de promover el confort y la calidad del hábitat en la población mencionada.

Palabras clave

ventilación, transferencia de calor, simulación, materiales de construcción

ABSTRACT

This research proposal aims to identify a series of typologies of traditional ventilated cladding walls of the construction market, such as fretwork, lattice, and metal panels, to conduct a thermal study under the climatic conditions of Catatumbo in Norte de Santander, Colombia. The methodology is theoretical. It uses heat transfer simulations under the finite element method in ANSYS to identify the relationship between the permeability of surfaces and the impact on the behavior of temperatures and heat fluxes. The results show that the more permeable typologies, such as fretwork and lattice, register less energy and temperature transfer than the less permeable typologies, such as metallic panels. It also showed other factors, such as the shape and thermal properties of the construction units' materials. Finally, the thermal study of ventilated walls consolidates technical information on traditional enclosure alternatives as a guide for designing and planning housing and buildings in post-conflict zones to promote comfort and habitat quality in the aforementioned population.

Keywords

ventilation, heat transfer, simulation, building materials.

RESUMO

A proposta de pesquisa está orientada a identificar uma série de tipologias de paredes de revestimento ventiladas tradicionais do mercado da construção, tais como tramas, treliças e painéis metálicos, a fim de desenvolver um estudo térmico sob as condições climáticas do Catatumbo no Norte de Santander, Colômbia. A metodologia é teórica por meio de simulações de transferência de calor com o método de elementos finitos no ANSYS para identificar a relação entre a permeabilidade das superfícies e a incidência no comportamento das temperaturas e dos fluxos de calor. Os resultados mostram que as tipologias mais permeáveis, como tramas e treliças, registram menor transferência de energia e temperatura em relação às tipologias menos permeáveis, como painéis metálicos. Mostraram também que existem outros fatores, como a forma e as propriedades térmicas dos materiais que compõem as unidades construtivas. Por fim, o estudo térmico de paredes ventiladas consolida informações técnicas sobre alternativas tradicionais de fechamento como guia para o projeto e o planejamento de moradias e edifícios em áreas pós-conflito, com o objetivo de promover o conforto e a qualidade do habitat da população mencionada.

Palavras-chave:

ventilação, transferência de calor, simulação, materiais de construção

INTRODUCCIÓN

La incorporación de estrategias de ventilación natural en proyectos arquitectónicos no sólo promueve el confort y el bienestar de los ocupantes (Ji, Lomas y Cook, 2009; Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021), sino también, tiene un impacto significativo en la eficiencia energética y en la sostenibilidad de los edificios (Mercado et al., 2018; Balter, Ganem y Barea, 2020). Si bien es claro, la ventilación natural se refiere al proceso de la circulación y flujo del aire en un espacio determinado con aberturas estratégicas, condicionado por factores como el clima, la dirección del viento, la orientación de la fachada, entre otros (Giraldo y Herrera, 2017; Mercado et al., 2018; Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021).

En este orden de ideas, la optimización de la calidad del aire y el confort, a través de las renovaciones del aire interior y la regulación de la temperatura, la ventilación natural mejora aspectos como la salud física y mental de los usuarios, logrando altos niveles de productividad según las actividades de cada espacio (Pacheco Ochoa, Jiménez Pérez y Ramírez Pérez, 2021). En casos contrarios, donde no existe un diseño eficiente de sistemas de ventilación natural, surge el fenómeno del síndrome del edificio enfermo, el que, es conocido como el estado de una edificación con problemáticas en términos de confort, riesgo de ergonomía del usuario, fomento de enfermedades, entre otros (Jansz, 2017). Esto quiere decir que, el hecho de una edificación con sistemas de ventilación óptimos es una estrategia de prevención de la propagación de enfermedades virales como el coronavirus (Gómez-Porter, 2021; Álvarez Rodríguez, 2022).

No obstante, la ventilación no sólo se limita a aberturas como ventanas o puertas, ya que, existen contextos geográficos con condiciones climáticas críticas que, a pesar de contar con entradas y salidas de aire, la solución es insuficiente y, por ende, el espacio es inhabitable (Atkinson et al., 2009; Batterman et al., 2017; Vartires et al., 2018; Calama-González et al., 2019; Cedeño-Quijada et al., 2022). Ante estas situaciones, surgen múltiples estrategias de enfriamiento como la ventilación nocturna, las chimeneas solares y las envolventes ventiladas que demuestran los beneficios de confort y ahorros de consumo energético (Giraldo y Herrera, 2017; Mercado et al., 2018; Balter, Ganem y Barea, 2020).

Autores han demostrado que las ventajas varían de acuerdo a la estrategia de ventilación implementada en la edificación. Por ejemplo, la ventilación nocturna con apertura de ventanas intervenidas por el usuario logra reducciones entre 4°C y 5°C según la altura y volumen del espacio, lo que, se traduce en un 50% de ahorro energético comparado con el consumo diurno (Mercado et al., 2018). Asimismo, la rehabilitación de edificios con implementación de envolventes ventiladas en las

fachadas reduce hasta el 32% de consumo energético (Balter, Ganem y Barea, 2020). Otra solución menos convencional como las chimeneas solares en sistemas de cubierta renueva el aire y amortigua las cargas térmicas sin afectar la estructura de la vivienda tradicional (Giraldo y Herrera, 2017).

A pesar que la ventilación es una necesidad básica del habitar, existen zonas marginadas por el conflicto armado y la violencia donde prima la promoción de seguridad y la vida. Sin embargo, con el fin de velar por los derechos humanos en todo el territorio nacional, el Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia, convocó a instituciones para la construcción de paz en zonas de posconflicto (UFPS, 2017; La Opinión, 2021).

Bajo esta premisa, la Universidad Francisco de Paula Santander participó con proyectos relacionados a la vivienda social sostenible y planeación territorial. Teniendo en cuenta que, la ventilación es un componente fundamental en la composición arquitectónica y contempla factores relacionados a la función, confort, sostenibilidad y eficiencia del espacio. Esta investigación continúa el objetivo de la convocatoria para evaluar el comportamiento térmico de una serie de muros ventilados compuestos por diferentes unidades constructivas como calados, celosías y paneles a través de simulaciones de transferencia de calor bajo por medio del método de elementos finitos en el software ANSYS, en condiciones climáticas de Ocaña, ubicada en la región del Catatumbo en Norte de Santander, Colombia. Con el fin de proveer el estimado de características térmicas de soluciones constructivas ventiladas y tradicionales para diseñadores, arquitectos y demás profesionales del sector constructor. De esta manera, los resultados de la investigación son aportes teóricos para la selección de materiales en procesos de diseño y planificación de la vivienda social.

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación sobre el estudio térmico de muros ventilados en condiciones climáticas de la región del Catatumbo teórica, está dividida en 3 fases. La primera fase consiste en la identificación de tipologías de soluciones constructivas. La segunda fase ejecuta las simulaciones de transferencia de calor en ANSYS y, por último, la tercera fase desarrolla el análisis de la relación entre la permeabilidad y el rendimiento térmico de las soluciones constructivas ventiladas.

FASE I: IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Para iniciar, las unidades constructivas seleccionadas para el conjunto de tipologías de muros ventilados tradicionales de la presente investigación son el calado estrella, calado cuadrado en arcilla, calado cuadrado en concreto, celosía

con ladrillo, panel con estructura metálica y caña brava y panel con rejillas metálicas, como se muestra en la Figura 1. La selección de dichos materiales está ligada con la producción industrial cerámica y arcillera de la región de Norte de Santander, por ende, la mayoría de los productos corresponde a este material, con el fin de promover el aprovechamiento de recursos locales y la identidad de la región (Sánchez-Molina, González-Mendoza y Avendaño-Castro, 2019).

El conjunto de las tipologías de muro ventilado sometidas al análisis está constituido por 1 muro con calado en arcilla cocida llamado Estrella en la industria cerámica de Norte de Santander (VENT-1) (INDUARCILLA¹, 2020), 2 muros conformados con calado cuadrado en arcilla cocida y concreto cada uno (VENT-2, VENT-3), 3 configuraciones de celosías con ladrillo macizo (VENT-4, VENT-5, VENT-6), 1 panel ventilado con guadua, una planta nativa de Colombia similar al bambú, y marco metálico (VENT-7) y 1 panel ventilado con rejilla y marco metálico (VENT-8), como se muestra en la Figura 2. Las tipologías VENT-1, VENT-2, VENT-3, VENT-4, VENT-5 y VENT-6 son muros fijos, mientras que las configuraciones VENT-7 y VENT-8 son tipologías de cerramiento con función de acceso, es decir, son puertas tipo paneles.

Las dimensiones de los muros ventilados son 2.40m de alto y 1.24m de ancho, el espesor y el área permeable de los muros ventilados varía de acuerdo a las medidas de las unidades constructivas, la que está registrada en la Tabla 1 y la Tabla 3, respectivamente. De esta manera, se estandariza las medidas de los módulos de muros evaluados en la investigación.

FASE II: SIMULACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ANSYS

Las simulaciones de transferencia de calor determinan la distribución de temperaturas y los flujos de calor de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Los requerimientos del software ANSYS, a través del método de elementos finitos en esta segunda fase son: los modelos 3D en formato Initial Graphics Exchange Specification (IGES), como lo muestra la Figura 2, la conductividad térmica de los materiales utilizados y las condiciones climáticas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Aunque, la Fase I describe inicialmente las tipologías de muros ventilados, la Tabla 1 registra la codificación una vez más junto con el espesor y la conductividad térmica de cada elemento de estudio.

Como se mencionó anteriormente, el municipio seleccionado para la configuración de las condiciones climáticas de las simulaciones es Ocaña, Norte de Santander, Colombia. Su localización geográfica en la región del Catatumbo es ideal para configurar el entorno

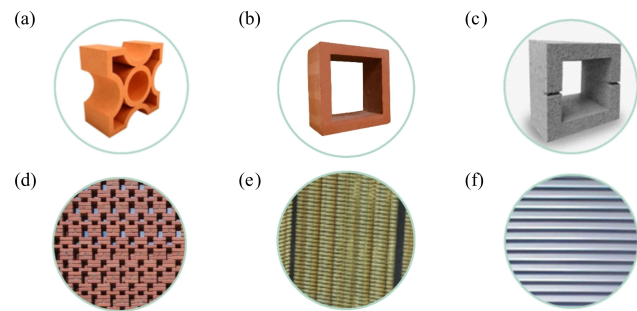


Figura 1. Tipologías de unidades constructivas seleccionadas para el diseño de muros ventilados: (a) calado estrella, (b) calado cuadrado en arcilla, (c) calado cuadrado en concreto, (d) celosía con ladrillo, (e) panel con estructura metálica y caña brava y (f) panel con rejillas metálicas Fuente: Elaboración de la Autora

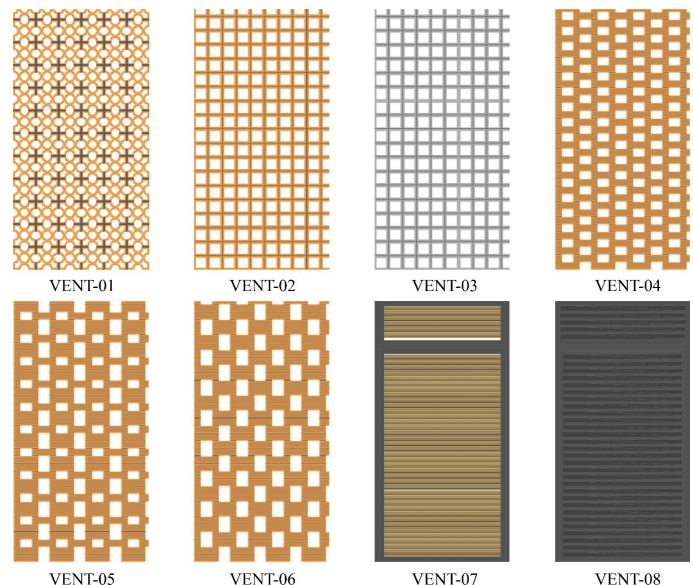


Figura 2. Tipologías de muros ventilados. Fuente: Elaboración de la Autora

y aunque existen otros municipios con condiciones climáticas con temperaturas más altas, sólo se obtuvo acceso a la data del municipio mencionado. Sin embargo, gracias a herramientas como GoogleEarth y MeteoRED es posible visibilizar las condiciones climáticas y geográficas del municipio de Ocaña y la región del Catatumbo, como se observa en la Figura 3.

A continuación, la Tabla 2 recopila los datos climáticos del municipio de Ocaña ubicado en la zona del Catatumbo en Norte de Santander. El programa requiere la temperatura del entorno, velocidad del viento y radiación solar para calcular las cargas aplicadas sobre las superficies del modelo 3D de acuerdo a las condiciones del contexto a simular.

Tabla 1. Codificación y propiedades térmicas de las tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora

Código	Tipología de muro	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)
VENT-1	Calado tradicional (estrella)	0,085	0,407 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-2	Calado cuadrado en arcilla	0,12	0,407 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-3	Calado cuadrado en concreto	0,12	0,54 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-4	Celosía con ladrillo – Configuración 1	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-5	Celosía con ladrillo – Configuración 2	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-6	Celosía con ladrillo – Configuración 3	0,1	0,437 (Vélez-Pareja, 2015)
VENT-7	Panel ventilado con caña brava	0,076	Estructura – 60,50 (Atsonios, Mandilaras y Founti, 2019) Guadua – 0,1417 (Ramírez-Sánchez, 2020)
VENT-8	Puerta con rejilla metálica	0,076	60.50 (Atsonios, Mandilaras y Founti, 2019)

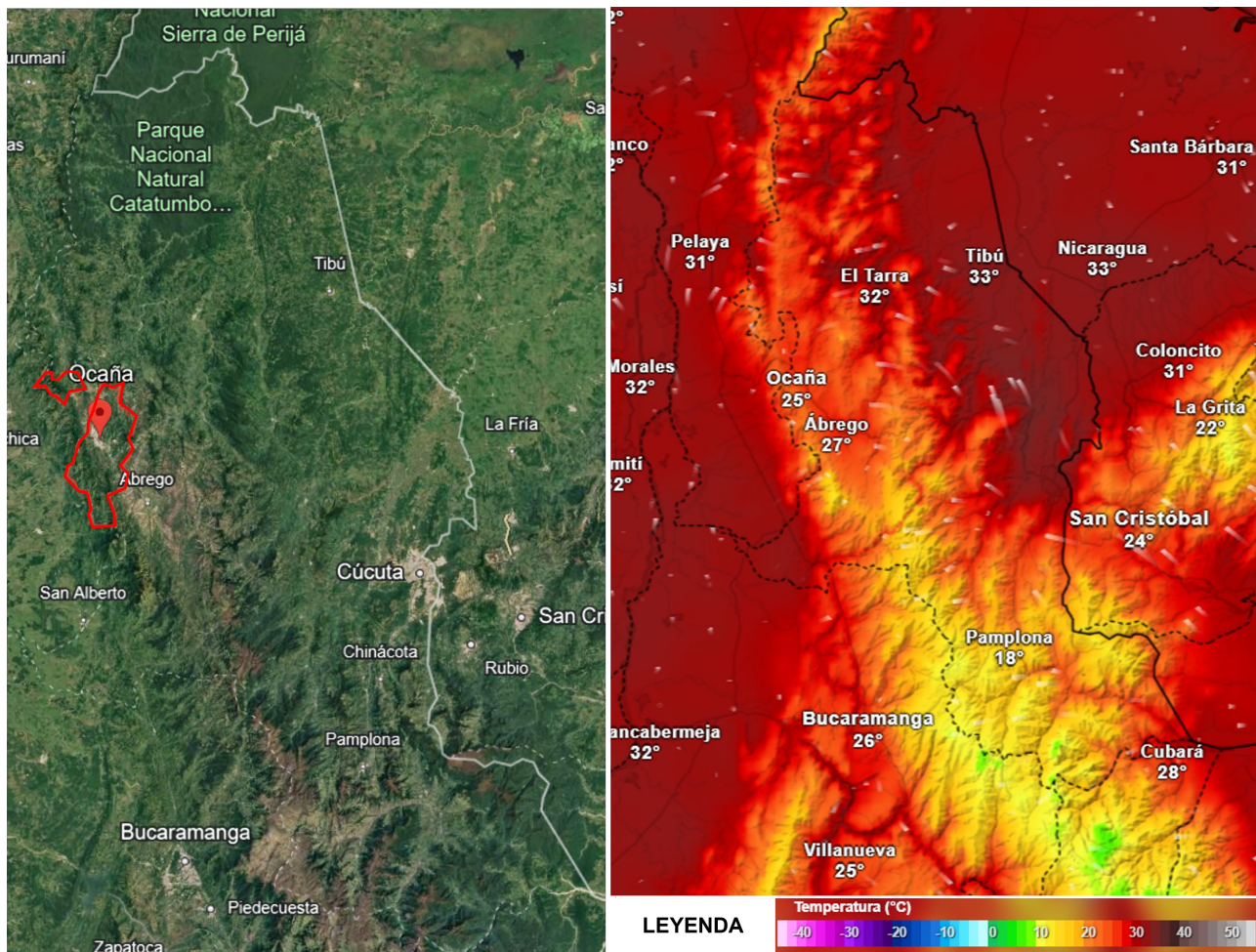


Figura 3. Localización geográfica del municipio de Ocaña en el departamento de Norte de Santander, Colombia (Izquierda) y Mapa termográfico del municipio de Ocaña y alrededores en horarios del mediodía. Fuente: Google Earth y Meteored (2023)

Tabla 2. Datos climáticos del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Fuente: Elaboración de la Autora

Dato	Valor
Coordenadas	73°19'20.0"W; 8°14'16.0"N
Temperatura media	21.8°C (IDEAM ² , 2010)
Velocidad del viento	3 – 3.5 m/s (SUE, 2018)
Conductividad del viento	0.26 W/mK (Çengel, 2007)
Radiación solar incidente	539.3 W/m ² (Fuentes-Freixanet, 2013)

Tabla 3. Permeabilidad de las tipologías de muro ventilados tradicionales seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora

Código	Tipología de muro	Superficie no permeable (m ²)	Superficie permeable (m ²)
VENT-1	Calado tradicional (estrella)	0,3245	0,6755
VENT-2	Calado cuadrado en arcilla	0,3916	0,6084
VENT-3	Calado cuadrado en concreto	0,3916	0,6084
VENT-4	Celosía con ladrillo – Configuración 1	0,6175	0,3825
VENT-5	Celosía con ladrillo – Configuración 2	0,6365	0,3635
VENT-6	Celosía con ladrillo – Configuración 3	0,6667	0,3333
VENT-7	Panel ventilado con caña brava	0,84	0,16
VENT-8	Puerta con rejilla metálica	0,76	0,24

Una vez definidos los parámetros formales (modelos 3D), las características térmicas de los materiales y las condiciones climáticas del entorno, se configuran en ANSYS a través del método de elementos finitos, que sigue la metodología de Colmenares-Uribe et al. (2023) que empieza con tipo de sistema de análisis, seguido por datos de ingeniería, geometría, modelo, configuración, solución y finaliza con los resultados de las simulaciones.

FASE III: ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS.

El análisis de la relación entre la permeabilidad y el rendimiento térmico de las soluciones constructivas ventiladas es una discusión sobre el impacto de la ventilación natural en la transferencia de calor de tipologías de muro diseñadas para permitir el flujo del aire. Se realiza el comparativo entre permeabilidad, flujos de calor y distribución de temperaturas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados registran características formales y técnicas relacionadas a la permeabilidad de las superficies, comportamiento térmico y flujos de calor de las tipologías de muros ventilados tradicionales seleccionados para la investigación.

PERMEABILIDAD DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

La Tabla 3 recopila las áreas de las superficies permeables y no permeables de las tipologías de muros ventilados tradicionales a partir de un metro cuadrado configurado con cada unidad constructiva. De acuerdo a las características formales y los datos de la Tabla 3, la superficie con mayor flujo de aire es VENT-1, la que alcanza hasta 67.55% de permeabilidad. Seguido por VENT-2 y VENT-3, con porcentajes de 60.84%. En menor medida, continúan las configuraciones de celosías con ladrillo (VENT-3, VENT-4 y VENT-5) con permeabilidades entre 36.35% y 38.25%. Por último, los paneles ventilados con rejillas metálicas (VENT-8) permiten el flujo de aire

Tabla 4. Registro de temperaturas máximas, mínimas y promedio de las superficies exteriores e interiores de tipologías de muros ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora

Código	Temperatura Exterior (°C)			Temperatura Interior (°C)		
		Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
VENT-1	43.54	38.80	43.58	26.95	22.21	26.71
VENT-2	44.16	41.75	44.16	24.85	22.44	24.42
VENT-3	43.16	40.90	43.16	25.08	22.82	24.72
VENT-4	50.89	45.25	50.89	31.15	25.51	32.40
VENT-5	54.38	44.60	54.38	34.83	25.05	35.53
VENT-6	54.40	44.60	54.40	31.53	24.99	35.56
VENT-7	59.59	42.57	59.59	42.56	28.94	50.75
VENT-8	51.75	49.18	50.41	50.03	44.05	51.73

en un 25% mientras que el peor de los casos es el panel ventilado con caña brava (VENT-7) que sólo deja un margen de 16% de ventilación.

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Los resultados de distribución de temperaturas arrojan valores de temperaturas exteriores e interiores máximas, mínimas y promedio, como lo registra la Tabla 4 y lo ilustra la Figura 4 y Figura 5. En el caso de las temperaturas de las superficies exteriores, los valores máximos coinciden con los promedios, mientras que, los valores promedios de las temperaturas interiores superan los valores máximos en la mayoría de los casos, con excepción en VENT-1, VENT-2 y VENT-3.

El análisis individual del comportamiento térmico examina las diferencias de temperatura exterior e interior máxima, mínima y promedio. Dentro del análisis individual, se observa que VENT-6 es la tipología con mayor diferencia de temperatura entre el exterior e interior, con un rango entre 19.60°C hasta 22.86°C. En segundo lugar, VENT-4 registra una diferencia de 19.74°C, seguido por VENT-5 y VENT-2 con 19.55°C y 19.31°C, respectivamente. En quinto lugar, VENT-3 y VENT-1 difieren 18.08°C y 16.59°C, cada uno. Mientras que, VENT-7 registra diferencias de temperaturas entre 13.62°C hasta 17.03°C. En último lugar, VENT-8 registra los valores más bajos de todas las tipologías entre el exterior e interior, la diferencia solamente varía entre 1.73°C hasta 5.12°C.

Por otra parte, el análisis comparativo está enfocado en identificar los mejores rendimientos térmicos interiores. Las tipologías de muro ventilado con los valores más bajos en las superficies interiores son VENT-1 y VENT-2. Los beneficios térmicos que ofrece VENT-1 van desde 0.23°C hasta 21.84°C. Las tipologías con menor desventaja frente a VENT-1 son los calados cuadrados en arcilla y concreto (VENT-2, VENT-3), porque la diferencia de temperaturas interiores mínimas no alcanza 1°C. Por otra parte, las

tipologías de celosías configuradas con ladrillo macizo registran entre 2.79°C (VENT-6), 2.84°C (VENT-5) y 3.80°C (VENT-4) más que VENT-1. Sin embargo, las tipologías con mayor desventaja frente a VENT-1 son VENT-7 y VENT-8, debido a que las temperaturas interiores aumentan 6.73°C y 21.84°C, respectivamente.

La segunda tipología con mejor rendimiento térmico es VENT-2, ya que el análisis comparativo de las temperaturas máximas y promedios con las demás tipologías superan entre 0.23°C hasta 27.31°C. Al igual que en el caso anterior, VENT-3 registra una diferencia mínima entre 0.23°C y 0.29°C, la similitud del comportamiento tiene relación con la forma de las unidades constructivas que componen los muros. En segundo lugar, el calado estrella registra un aumento entre 2.10°C y 2.29°C en las temperaturas interiores. Las configuraciones de celosías con ladrillo macizo varían los incrementos de temperatura entre 6.30°C y 7.98°C (VEN-4), 9.97°C y 11.10°C (VENT-5), y entre 6.68°C y 11.13°C (VENT-6). Finalmente, los paneles con marco metálico son los menos aventajados frente a los muros calados y con celosías. No obstante, VENT-7 registra menos diferencia de temperaturas (17.71°C y 26.33°C) que VENT-8 (25.18°C y 27.31°C).

FLUJOS DE CALOR DE TIPOLOGÍAS DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

Las simulaciones de flujos de calor de muros ventilados para mampostería exponen la concentración de energía en los muros conformados con calados, celosías y rejillas que permiten el paso del aire. La Figura 4 ilustra los flujos de calor obtenidos. Además, la Tabla 5 registra los valores máximos y mínimos de las superficies exteriores e interiores.

Los autores deben discutir los resultados y cómo pueden interpretarse en relación a estudios previos. Los hallazgos y sus implicaciones tienen que discutirse en el contexto más amplio posible.

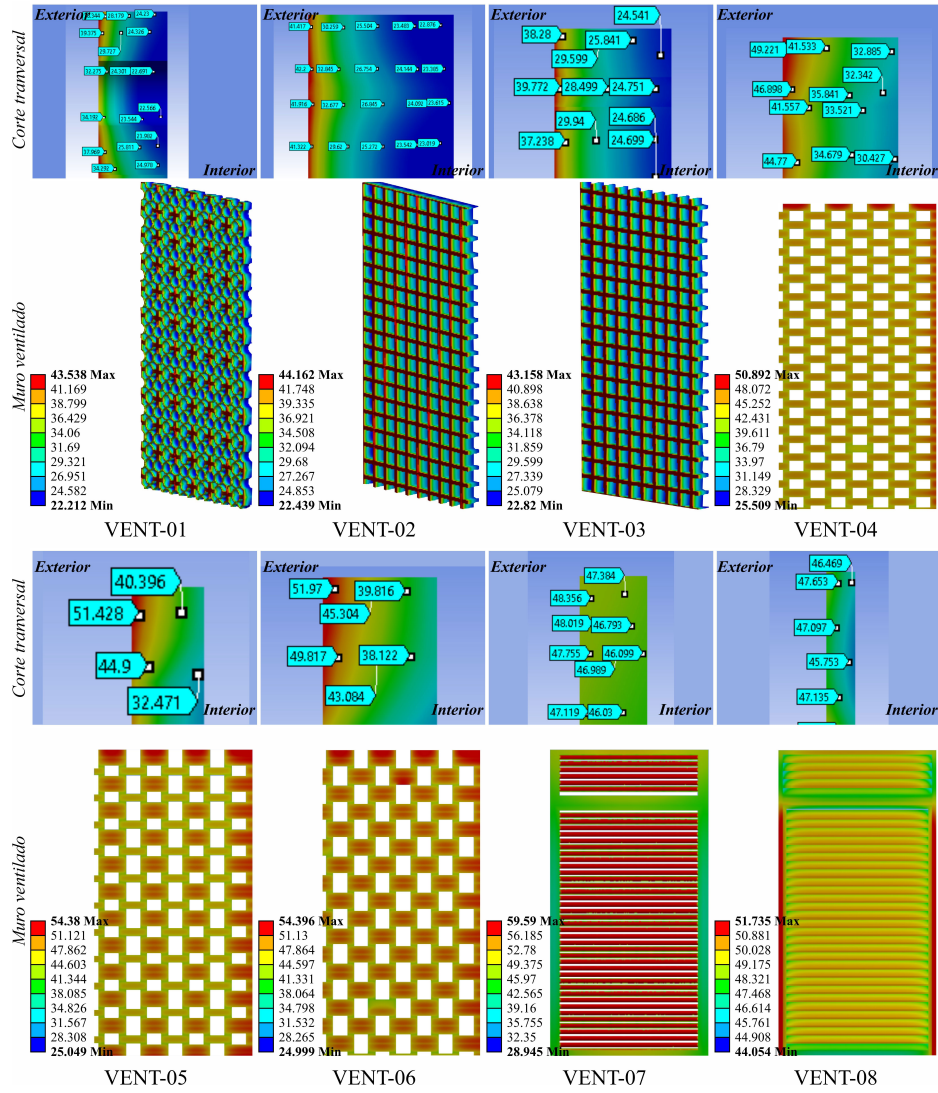


Figura 4. Distribución de temperaturas (°C) de tipologías de muros ventilados tradicionales seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora

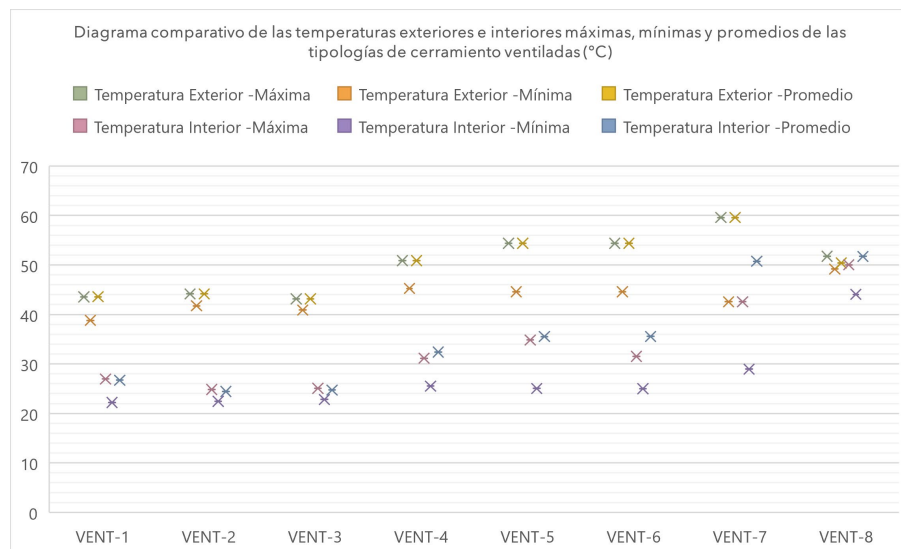


Figura 5. Diagrama comparativo de las temperaturas exteriores e interiores máximas, mínimas y promedios de las tipologías de cerramiento ventiladas (°C). Fuente: Elaboración de la Autora

Tabla 5. Registro de flujos de calor (W/m²) máximo y mínimo de tipologías de muro ventilados seleccionados. Fuente: Elaboración de la Autora

Código	Flujo de calor máximo (W/m ²)	Flujo de calor mínimo (W/m ²)
VENT-1	325.78 – 365.78	1.91 – 42.34
VENT-2	267.55 – 343.03	3.38 – 22.25
VENT-3	290.35 – 325.98	5.32 – 23.1346
VENT-4	218.46 – 379.48	17.18 – 37.31
VENT-5	165.41 – 352.17	25.05 – 31.57
VENT-6	204.06 – 297.18	17.81 – 64.37
VENT-7	1231.20 – 3689.20	2.24 – 22.00
VENT-8	2105.50 – 3508.50	354.12 – 1405.60

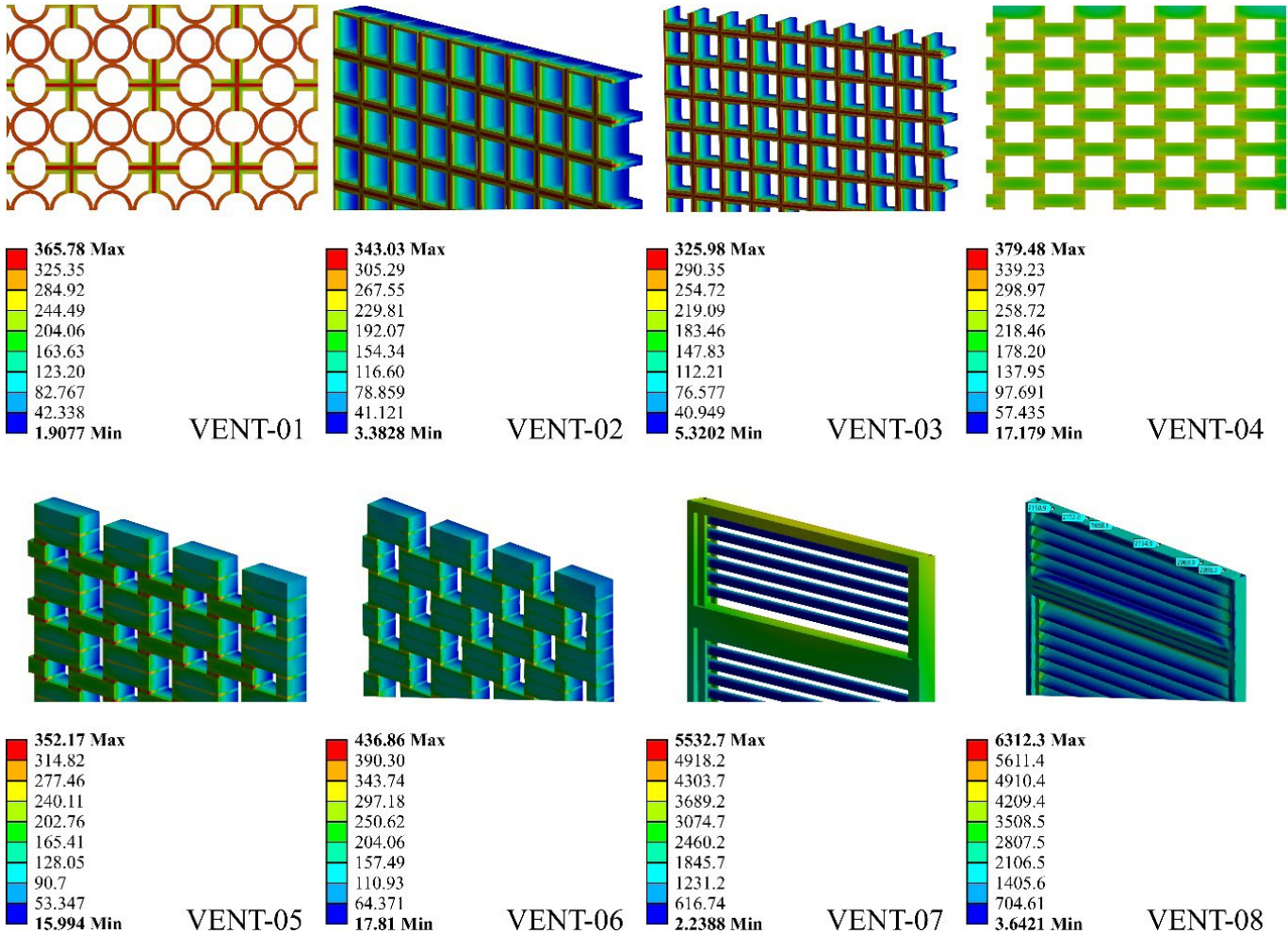


Figura 6. Flujos de calor (W/m²) de tipologías de muro ventilados tradicionales. Fuente: Elaboración de la Autora

El análisis de los flujos de calor, por medio de la Figura 6 y la Tabla 5 coincide que los flujos de mayor concentración son las zonas correspondientes a las juntas de mortero y superficies exteriores, por el contrario, los flujos de calor están concentrados en las superficies interiores de las unidades constructivas, principalmente.

El análisis de los flujos de calor máximo concuerda que las zonas con materiales como mortero en las juntas y acero en los marcos metálicos concentran entre 297.18 W/m² y 379.48 W/m², y entre 1231 W/m² y 3689 W/m², respectivamente. Mientras que, las superficies exteriores con materialidad arcillosa concentran entre 10.93% hasta un 53% menos que las zonas con mayor energía.

A pesar que, las tipologías de muros ventilados tienen en común áreas permeables para la circulación del aire, este estudio observa 3 tipos de comportamientos de flujos de calor que varían según la forma de las unidades constructivas. Como se mencionó anteriormente, los flujos de calor mínimo están ubicados en las superficies interiores, no obstante, la composición formal y material de las tipologías varía de la siguiente manera: El caso de los muros calados VENT-1, VENT-2 y VENT-3, las superficies de las paredes que conectan entre el exterior e interior disipan el calor entre el 88.43% y 93.51%, mientras que las superficies interiores, disipan casi la totalidad de la energía entre 98.37% hasta 99.48%.

El segundo caso registrado en los flujos de calor mínimo son los muros con celosías configurados con ladrillo macizo VENT-4, VENT-5 y VENT-6. Estas tipologías registran dos zonas con valores mínimos ubicados en las juntas de mortero y las superficies interiores de las unidades constructivas. Aunque, las juntas de mortero concentran los flujos de calor de mayor concentración en el exterior, en el interior se refleja el comportamiento disipado entre 78.34% y 91.04%. Mientras que las superficies interiores aumentan el amortiguamiento de calor entre el 92.89% y 95.47%.

Por último, las tipologías de paneles VENT-7 y VENT-8 exponen que la estructura metálica concentra los mayores flujos de calor, sin duda alguna. Sin embargo, las superficies interiores de los marcos disipan la energía entre 59.94% y 89.91%. Por el contrario, los elementos horizontales de guadua disipan por completo la concentración de calor (99.41% y 99.34%).

RELACIÓN ENTRE LA PERMEABILIDAD DEL AIRE Y EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS VENTILADAS

El estudio térmico de muros ventilados de las tipologías seleccionadas demuestra que existe una relación inversamente proporcional entre la permeabilidad y el comportamiento térmico de las tipologías investigadas. Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 3 y Tabla 4, el porcentaje de superficie permeable incide en

la disminución de la temperatura de las superficies interiores.

El primer ejemplo en demostrar este planteamiento es la tipología VENT-1, la que presenta el mayor porcentaje de permeabilidad (67.55%) y a su vez, registra las temperaturas de las superficies interiores más bajas (entre 22.21°C y 26.95 °C). Por el contrario, uno de los paneles ventilados con menor superficie permeada, como VENT-8 (24%), duplica las temperaturas mínimas de VENT-1.

En el mismo sentido, los calados cuadrados en arcilla y concreto (VENT-2 y VENT-3) también demuestran que la permeabilidad influye en los beneficios térmicos que puede obtener una superficie ventilada. De hecho, con un rango inferior de permeabilidad alcanza temperaturas mínimas similares a VENT-1 e incluso, temperaturas interiores máximas y promedios inferiores a VENT-1.

Aunque la tipología menos permeable es VENT-7, con tan sólo 16%, demuestra que existen otros factores en el rendimiento térmico como la composición material y sus propiedades conductivas. De acuerdo a las propiedades de los materiales (Tabla 1) y el análisis de flujos de calor (Figura 4), la conductividad de los materiales que conforman las unidades constructivas también inciden en el comportamiento térmico, porque la capacidad de la guadua para disipar hasta el 99% de la energía concentrada en las superficies interiores, le permite lograr temperaturas mínimas similares a las temperaturas mínimas y promedios de las tipologías con el doble (VENT-4, VENT-5, VENT-6) y hasta el cuádruple (VENT-1) de permeabilidad.

Asimismo, las configuraciones de celosías (VENT-4, VENT-5, VENT-6) reflejan otro factor a considerar en el diseño del muro y el rendimiento térmico. A diferencia de VENT-1, VENT-2 y VENT-3, las celosías están conformadas por un conjunto de ladrillos macizos en arcilla cocida unidos por juntas de mortero, lo que implica que el ladrillo, al ser un volumen compacto, concentre mayor flujo de energía. Por el contrario, los calados son unidades constructivas diseñadas exclusivamente para permitir el flujo de aire y la entrada de luz, su volumen está compuesto por paredes que generan la forma de los huecos o perforaciones y por ende, el volumen por donde se conduce la energía se reduce significativamente. Por esta razón, las configuraciones con celosías solamente disminuyen la transferencia de calor en las superficies interiores entre el 92.89% y 95.47%, mientras que, las tipologías de calados disipan los flujos de calor entre 98.37% hasta 99.48%, comparados con las superficies expuestas a la radiación solar.

CONCLUSIONES

En conclusión, la incorporación de estrategias de ventilación natural en proyectos arquitectónicos tiene múltiples beneficios. Además de promover el confort y el bienestar de los ocupantes, la ventilación natural

también tiene un impacto significativo en la eficiencia energética y la sostenibilidad de los edificios. La optimización de la calidad del aire y el confort, a través de la ventilación natural mejora la salud física y mental de los usuarios.

La iniciativa del Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia para la construcción de paz en zonas de posconflicto, es un acelerador para el planteamiento de investigaciones orientadas a resolver problemáticas sociales. La pertinencia de la investigación es la apuesta a establecer un precedente para explorar nuevas tipologías de cerramiento ventilados y evaluar el comportamiento térmico de diferentes unidades constructivas desde un contexto específico, con el fin de proveer información técnica que sirva de base para la selección de sistemas acordes a las necesidades de los usuarios.

Gracias a las simulaciones, es posible entender el comportamiento de la transferencia de calor mediante la forma de unidades constructivas. De acuerdo a la relación del diagrama comparativo entre temperaturas exteriores e interiores de la Figura 5, las tipologías con mejor rendimiento térmico son los calados VENT-1, VENT-2 y VENT-3, seguido por las celosías configuradas con ladrillo macizo que aumentan sus temperaturas interiores entre 2.79°C hasta 3.80 °C, en comparación con los calados VENT-1. No obstante, las tipologías con marcos metálicos aumentan las temperaturas de las superficies interiores entre 6.73°C y 21.84°C comparado con VENT-1 debido a la alta conductividad de las estructuras.

Las tipologías de muros ventilados seleccionados con mayor porcentaje de permeabilidad tienden a mostrar un mejor comportamiento térmico y una disipación más eficiente del calor entre el exterior e interior, es decir, los muros calados y las configuraciones con celosías. Sin embargo, es importante considerar otros factores, como la forma y los materiales utilizados, para comprender completamente el impacto del porcentaje de permeabilidad en el comportamiento térmico de los muros ventilados.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRedit

Conceptualización, C.X.D.F.; Curación de datos, C.X.D.F.; Análisis formal, C.X.D.F.; Adquisición de financiación C.X.D.F.; Investigación, C.X.D.F.; Metodología, C.X.D.F.; Administración de proyecto, C.X.D.F.; Recursos, C.X.D.F.; Software, C.X.D.F.; Supervisión, C.X.D.F.; Validación, C.X.D.F.; Visualización, C.X.D.F.; Escritura – borrador original, C.X.D.F.; Escritura – revisión y edición, C.X.D.F.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Universidad Francisco de Paula Santander, al Grupo de Investigación en Arquitectura y Materiales Alternativos (GRAMA) por apoyar la propuesta de soluciones constructivas para Viviendas Rurales en el Catatumbo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez Rodríguez, M. de la O. (2022). Actuaciones para la mejora de la ventilación de espacios públicos en la Comunidad de Madrid. *Revista de Salud Ambiental*, 22(Especial Congreso), 70-73. <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1189>

Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C. L., Jensen, P., Li, Y., y Seto, W.-H. (2009). *Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings*. Editorial World Health Organization (WHO), https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44167/9789241547857_eng.pdf?sequence=1

Atsonios, I., Mandilaras, I. y Founti, M. (2019). Thermal assessment of a novel drywall system insulated with VIPs. *Energies*, 12(12), 2373. <https://doi.org/10.3390/en12122373>

Balter, J., Ganem, C., y Barea, G. (2020). Mejoras en el desempeño energético de edificios en verano mediante la integración de envolventes ventiladas en fachadas norte y cubiertas. El caso de Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 94-105. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.07>

Batterman, S., Su, F.-C., Wald, A., Watkins, F., Godwin, C., y Thun, G. (2017). Ventilation rates in recently constructed U.S. school classrooms. *Indoor Air*, 27(5), 880–890. <https://doi.org/10.1111/ina.12384>

Calama-González, C. M., León-Rodríguez, Á. L., y Suárez, R. (2019). Indoor Air Quality Assessment: Comparison of Ventilation Scenarios for Retrofitting Classrooms in a Hot Climate. *Energies*, 12(24), 4607. <https://doi.org/10.3390/en12244607>

Cedeño Quijada, M., Solano, T., Mora, D., y Chen Austin, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. *Novasinerгия*, 5(1), 100-127. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.07>

Çengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa, un Enfoque Práctico*. McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. <https://blogs.ugto.mx/wp-content/uploads/sites/71/2022/01/Transferencia-de-calor-y-masa.-Un-enfoque-practico-paginas-111-y-112.pdf>

Colmenares-Urbe, A. P., Sánchez Molina, J., Díaz Fuentes, C. X., y Sánchez Zúñiga, J. V. (2023). El diseño de producto cerámico como estrategia de mitigación de transferencia de calor en envolventes arquitectónicas. *Eco Ediciones S.A.S.* <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6714>

Fuentes-Freixanet, V. A. (2013). Estimación de la radiación solar incidente. Universidad Autónoma Metropolitana: Unidad Azcapotzalco. México.

Giraldo, W., y Herrera, C. A. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y desarrollo*, 35(1), 77-101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85248898006>

Gómez-Porter, P. F. (2021). La vivienda colectiva de la modernidad en tiempos de COVID19 aportaciones del paradigma habitacional. *Arquitecturas del Sur*, 39(59), 28-43. <http://dx.doi.org/10.22320/07196466.2021.39.059.02>

GoogleEarth. (2023). Localización geográfica del municipio de Ocaña en el departamento de Norte de Santander, Colombia. <https://earth.google.com/earth/d/1S7XJoqbNWkhLDRPfiICKrTI7RJUJwAyM?usp=sharing>

INDUARCILLA. (2020). Catálogo de Productos en Gres del Área Metropolitana de San José de Cúcuta, Colombia.

IDEAM (2010). Promedio climatológico de Colombia 1981-2010 (Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). URL: <http://www.ideam.gov.co/>

Jansz, J. (2017). Sick building syndrome en S. R. Quah (Ed.), *International Encyclopedia of Public Health (Second Edition)*. Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00407-0>

Ji, Y., Lomas, K. J. y Cook, M. J. (2009). Hybrid ventilation for low energy building design in south China. *Building and Environment*, 44(11), 2245-2255. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.015>

La Opinión (2021). *Obtiene su primer patente, el programa de Arquitectura de la UFPS*. (Cúcuta: La Opinión). <https://www.laopinion.co/cucuta/obtiene-su-primer-patente-el-programa-de-arquitectura-de-la-ufps>

Mercado, M. V., Barea-Paci, G. J., Esteves, A., y Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Hábitat Sustentable*, 8(1), 54-67. <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>

METEORED (2023). Meteored: Weather forecast – Temperature. Tiempo. <https://www.meteored.com/>

Pacheco Ochoa, V., Jiménez Pérez, A.L., y Ramírez Pérez, J. (2021). Impacto de la luz y la ventilación natural en el ambiente laboral sobre el síndrome del edificio enfermo y la productividad. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(4), 97-108. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v5.n4.2021.581>

Ramírez-Sánchez, D. O. (2020). *Aprovechamiento de propiedades térmicas de materiales ancestrales usados en la construcción de edificios en Ecuador (adobe y caña guadua)* [Tesis de licenciatura]. Universidad Central del Ecuador.

Sánchez-Molina, J., González-Mendoza, J. A., y Avendaño-Castro, W. R. (2019). *El Clúster cerámico apuesta de desarrollo socioeconómico de Norte de Santander*. Bogotá-Ecoe Ediciones. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6502>

UFPS. Sistema Universitario Estatal – SUE del Ministerio de Educación en Colombia, 2017 (2018). Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas no Interconectadas IPSE, Unidad de Planeación Minero Energética

UPME. Plan De Energización Rural Sostenible Departamento Norte de Santander PERS: Mapa velocidad media del viento en superficie del departamento Norte de Santander. https://sig.upme.gov.co/SIGPERS/Files/Nortesantander/oe/18_MAPA_VELOCIDAD%20DEL%20VIENTO.pdf

Universidad Francisco de Paula Santander UFPS (2017). *La UFPS presentó 43 iniciativas al Taller Banco de Proyectos – SUE en el marco del posconflicto y la construcción de Paz*. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. <https://ww2.ufps.edu.co/unoticia/la-ufps-presento-iniciativas-al-sue->

Vartires, A., Damian, A., Olariu, A., Istrate, A., Catalina, T. y Zorilă, E. (2018). Challenges in achieving a high indoor air quality in an educational building. *Revista Română de Inginerie Civilă*, 9(1), 28-42. <https://www.rric.ro/reviste/articole/vol9nr1art3.pdf>

Vélez-Pareja, E. A. (2015). Caracterización del comportamiento térmico de materiales constructivos usados comúnmente en Colombia para la construcción de envolventes de edificaciones [Tesis de Magíster]. Universidad del Norte de Colombia. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/9023#page=1>