



Impacto en el desempeño térmico de la aplicación de celulosa en la envolvente de un aula

Impact on Thermal Performance of the Application of Cellulose in a Classroom Envelope

Elizabeth Parra Correa

Manuela Murillo Galvis

María Fernanda Aristizábal Vargas

Manuela Quintero Londoño

Laura Rivera Salazar

RESUMEN: Alcanzar temperaturas adecuadas en las aulas es crucial para el desarrollo óptimo del aprendizaje. Sin embargo, en ocasiones, las decisiones de construcción de edificios se basan únicamente en consideraciones presupuestarias, sin tener en cuenta variables como el ambiente térmico o el impacto ambiental. Esta investigación evalúa el impacto de utilizar celulosa como aislante térmico en un aula universitaria ubicada en Bello, Antioquia, Colombia. Se realizaron mediciones, un levantamiento arquitectónico y se consideraron otros factores que afectan el ambiente térmico. Posteriormente, se construyó un modelo computacional en el software Rhino y se realizaron simulaciones térmicas con Climate Studio. Los resultados indican que la celulosa puede igualar o mejorar el rendimiento térmico en comparación con el poliestireno expandido, al mismo tiempo que tiene un menor impacto ambiental. Esto plantea una discusión sobre la elección de materiales para futuras construcciones en la universidad.

PALABRAS CLAVE: aulas, desempeño térmico, material aislante, celulosa, eficiencia energética

ABSTRACT: Achieving adequate classroom temperatures is crucial for optimal learning. However, construction decisions are based solely on budgetary considerations, without considering variables such as thermal environment or environmental impact. This research evaluates the impact of using cellulose as thermal insulation in a university classroom located in Bello, Antioquia, Colombia. Measurements, an architectural survey, and other factors affecting the thermal environment were carried out. Subsequently, a computational model was built in Rhino software and thermal simulations were performed with Climate Studio. The results indicate that cellulose can match or improve thermal performance compared to expanded polystyrene, while having a lower environmental impact. This raises a discussion on the choice of materials for future construction at the university.

KEYWORDS: Classrooms, thermal performance, insulating material, cellulose, energy efficiency

RECIBIDO: 15 diciembre 2022 ACEPTADO: 15 febrero 2023

Introducción

Los espacios educativos son un factor clave para el desarrollo de las actividades de aprendizaje, la necesidad de mejoramiento de estos espacios construidos para que se adapten a las necesidades medioambientales del presente, conlleva un reto de actualidad que compromete al bienestar humano, a la comodidad ambiental y al impacto de la huella de carbono. Por tal motivo, las aulas deben responder a dos aspectos fundamentales para proveer un ambiente saludable: lograr buenas condiciones de confort y obtener un nivel de eficiencia energética óptimo que posibilite el mínimo consumo con el máximo de calidad [1]. Con respecto a las condiciones de confort, el aula debe corresponder a nivel constructivo, espacial y técnico a la actividad realizada para proporcionar un ambiente de bienestar y aumentar el rendimiento del aprendizaje y la productividad, además de la disminución de problemas fisiológicos.

De acuerdo con esto, los espacios educativos demandan calidad ambiental, lo que implica una inversión distinta que debe estar orientada al bienestar humano y del medio ambiente, con estrategias proyectuales diversas acordes con el contexto del proyecto y con la incorporación de materiales y técnicas adecuadas para un buen desempeño térmico.

Al ser un espacio de alta concentración de personas en la mayoría de los casos, y de especial atención por las metas de desarrollo de aprendizaje a alcanzar, los países cuentan con normativas para el diseño en concordancia con las requerimientos mínimos y máximos para alcanzar ciertos niveles de confort, que en Colombia es la norma NTC 4595 - Planteamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares [2]. Esta incluye los niveles de comodidad térmica, visual y auditiva de las aulas educativas. Con respecto a la comodidad térmica, la normativa se enfoca en la morfología y constitución de los edificios diferenciados por tipos de climas, ya sea frío, templado, cálido seco y cálido húmedo.

De igual forma, según el documento titulado "Confort térmico en aulas universitarias: un estudio experimental en el trópico" [1], el confort térmico es un objetivo primordial en las aulas universitarias cuando se quiere maximizar el rendimiento académico. El desafío de lograr el confort térmico en las aulas en los trópicos es aún más significativo debido a las condiciones climáticas extremas y las elevadas ganancias de calor interno y externo [3].

En algunas ciudades colombianas, al estar ubicadas en un contexto del trópico con clima templado, las estrategias están encaminadas a la protección solar en la mayoría de los casos, y a permitir ventilación con el área de aberturas efectiva para evitar la acumulación de calor al interior, entre otras estrategias. Se han implementado sistemas de ventilación mecánica y materiales aislantes en las envolventes que permiten aumentar el confort en las aulas, sin embargo, estos materiales aislantes no están pensados desde el impacto medio ambiental negativo que puedan causar, generando así, cuestionamientos acerca de materiales que permitan tener un desempeño térmico adecuado a las necesidades del espacio y que al mismo tiempo sean sostenibles.

De acuerdo con esto, debido a la demanda creciente de productos elaborados a partir de materias primas renovables y la preocupación por el cambio climático, se ha estimulado el desarrollo de distintos productos con múltiples aplicaciones. Conforme avanza la tecnología, aumenta la necesidad de encontrar alternativas a materiales derivados del petróleo, buscando que estos sean renovables y sostenibles a largo plazo. La celulosa

- [1] Montoya Florez OL, Viegas GM. Confort térmico en aulas escolares del trópico, a partir de la aplicación de estrategias de diseño bioclimáticas pasivas. Av en Energías Renov y Medio Ambient [Internet]. 2019 [consultado: 7 de abril de 2022]; 23:[01-55 pp.]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/109499>
- [2] Ministerio de Educación, Icontec. NTC 4595 Ingeniería Civil y Arquitectura. Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares Planeamiento y diseño de instalaciones y ambientes escolares. 2015. Disponible en: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articulos-355996_archivo_pdf_norma_tecnica.pdf
- [3] Guevara G, Soriano G, Mino-Rodriguez I. Thermal comfort in university classrooms: An experimental study in the tropics. Build Environ [Internet]. 2021 [consultado: 7 de abril de 2022]; 187(107430). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107430>

puede ser una opción, al ser un material renovable, natural, biodegradable y reciclable, con propiedades únicas, ya que es el polímero natural más abundante en la biósfera [4].

La celulosa es un material que posee una superficie esponjosa y porosa, y, por su origen vegetal, funciona como aislante térmico y acústico. Para su aplicación en construcciones, éste debe mezclarse con sales de bórax, que le aportan propiedades insecticidas y antifúngicas. En el mercado se pueden encontrar placas de celulosa con un espesor de 30 a 300 mm [5].

Según el Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción [6] es importante analizar los tipos de materiales a utilizar al momento de construir, pues de esto depende el impacto ambiental que se pueda generar como consecuencia del agotamiento de recursos o materias primas, así como las emisiones de gases y el consumo energético. Existe una gran variedad de materiales aislantes que se utilizan para el recubrimiento de muros, divisiones y cielo rasos, que varían según su densidad, peso, diseño y costo. Los materiales más comunes en Colombia son el *superboard*, *drywall*, *pvc* e *icopor* en forma de láminas de poliestireno expandido, que brinda beneficios en aislamiento térmico y acústico, así como la adaptabilidad de su forma y tamaño. Sin embargo, las materias primas usadas para la fabricación del poliestireno expandido no son renovables [7] y en ocasiones la manipulación de este material puede causar riesgos para la salud [8].

De acuerdo a esto, se evalúa la celulosa como alternativa sostenible. Su fabricación comienza con papel reciclado, que debe ser cargado sobre la cinta procesadora de una máquina. Inicialmente el papel pasa por una mezcladora primaria, que separa todo el papel y lo prepara para ser cortado, luego pasa a través de una zona con imanes donde se queda cualquier metal que pudiera contener, para después ser triturado y, finalmente, mezclado con ácido bórico, que actúa como retardante del fuego, ayudando también en su resistencia a las plagas, la corrosión, y la propagación de moho.

Estudios afirman que la celulosa se empezó a utilizar como material de construcción a finales del siglo XIX en América, incrementando su uso en los años 70 durante la crisis del petróleo, para luego disminuir como consecuencia a las campañas de desprestigio del material por sus propiedades ignífugas. Sin embargo, actualmente es de los aislamientos más competitivos en el mercado por cuestiones técnicas y económicas que le favorecen como materia prima, especialmente por ser abundante y barata. Además de ser un material que se aprovecha por completo, no deja residuos, y es de fácil transporte. Tiene también otras grandes ventajas como materia prima, por su bajo impacto ambiental, al ser completamente reciclable; por su ciclo de vida, que es ilimitado; y porque sus posibilidades de aislamiento permiten todo tipo de aplicaciones, tanto al ruido, al calor, a las humedades y al fuego [9].

Actualmente en la facultad de arquitectura de la Universidad de San Buenaventura, ubicada en Bello, Antioquía, se generan considerables cantidades de residuos de papel y cartón provenientes de maquetas y proyectos de los estudiantes, con tendencia al aumento, que generalmente terminan siendo desechados. Frente a este panorama, el objetivo de la investigación estuvo encaminado a fortalecer el potencial de mejora incorporando el material de la celulosa para un uso eficiente de los recursos. Se partió de considerar que la elección de este material aislante resulta beneficiosa para el confort térmico de las aulas y para el medio ambiente,

- [4] Vidal T, Torres AL, Valls C, Cusola O, López JA, Fernández J, et al. Potencial de la celulosa en la construcción de nuevos materiales. *Jorn Recer EGE-UPC* [Internet]. 2019 [consultado: 7 de abril de 2022]. 147–55 pp. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/129131>
- [5] Cuba Córdoba A, Garzón Bernal LD. Paneles tipo sandwich a base de celulosa reciclada para fachadas [trabajo de grado]. Bogotá: Facultad de Arquitectura, Universidad La Gran Colombia; 2020. Disponible en: <https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5883/Paneles%20tipo%20sandwich%20a%20base%20de%20celulosa%20reciclada%20para%20fachadas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] DEGREM Design & Green Engineering. Guía para la selección de materiales de construcción sostenible. Cáceres: INTROMAC, Instituto Tecnológico de Rocas Ornamentales y Materiales de Construcción; 2019. Disponible en: <http://www.degrem.eu/wp-content/uploads/2020/05/DEGREM-SMCS.pdf>
- [7] Palomo M. Aislantes térmicos: criterios de selección por requisitos energéticos [proyecto de fin de carrera]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2017. Disponible en: http://oa.upm.es/47071/1/TFG_Palomo_Cano_Marta.pdf
- [8] Madurwar MV, Ralegaonkar RV, Mandavgane SA. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Constr Build Mater* [Internet]. 2013 [consultado: 7 de abril de 2022]; 38(October):[872–8 pp.]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011>
- [9] Rodríguez Gálvez H. Aislamientos Naturales II: La celulosa [Internet]. Disponible en: <http://www.mimbrea.com/aislamientos-naturales-ii-la-celulosa/>

al superar la variante que actualmente se utiliza de poliestireno expandido, que tiene un impacto negativo en relación con la huella de carbono. La innovación en el proceso de toma de decisiones supone un conocimiento de las implicaciones ambientales de los materiales y las soluciones constructivas que permiten elevar la eficiencia de los recursos y la sostenibilidad del medio ambiente construido.

Materiales y método

Caso de estudio

La presente investigación propuso analizar el impacto que tiene la aplicación de celulosa en la envolvente de un aula, sobre su desempeño térmico. Como caso de estudio se analizó el Aula-taller 2D de la Universidad de San Buenaventura, localizada en el municipio de Bello, Antioquia, Colombia. Este es uno de los municipios que conforman el área metropolitana del Valle de Aburrá. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) este lugar presenta un clima tropical y una temperatura promedio entre 17° y 28°C anual.

Con el objetivo de conocer el desempeño térmico del aula en su estado actual y poder calibrar posteriormente el modelo computacional, se instaló un sensor de temperatura de referencia HOB0 U12 al interior del aula. El sensor registró datos de temperatura cada 10 minutos durante un mes, entre el 24 de febrero del 2022 al 24 de marzo del 2022. En la Figura 1 se grafican los resultados obtenidos.

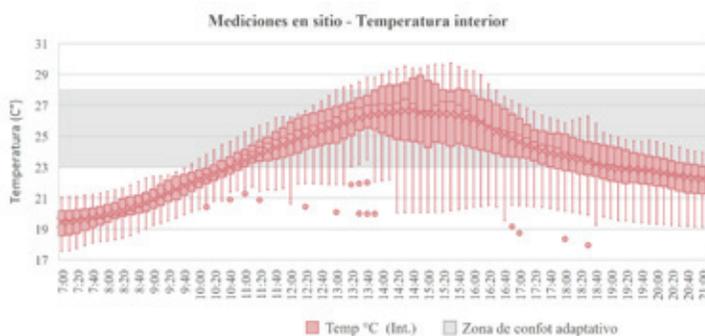


Figura 1. Temperatura exterior medida en sitio. Fuente: Elaboración propia.

El espacio tiene un equipo de aire acondicionado referencia AUUQ18GH1 que es operado a voluntad de los docentes o estudiantes presentes en el aula. Se debe aclarar que las mediciones interiores registraron la temperatura en diferentes escenarios de operación y ocupación del espacio, variando el número de personas, el horario, la apertura o cierre de las ventanas y la operación del equipo de aire acondicionado. Como se

mencionó anteriormente, estas gráficas permitirán posteriormente calibrar el modelo computacional de simulación del desempeño térmico con respecto a la realidad, dando la posibilidad de realizar predicciones más confiables.

La metodología implementada es de tipo cuantitativo, y se basa principalmente en simulaciones computacionales y análisis de datos. En la Figura 2 se presenta un esquema resumen de la metodología aplicada indicando características del espacio, herramientas, *software*, escenarios y resultados.

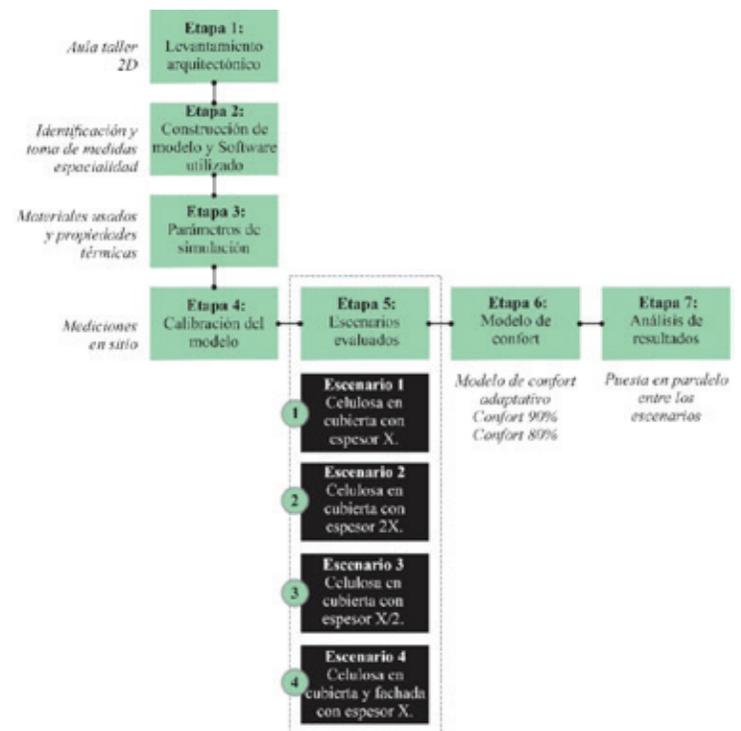


Figura 2. Esquema metodológico. Fuente: Elaboración propia.

Levantamiento arquitectónico

Se realizó el levantamiento arquitectónico del aula seleccionada, tomando las dimensiones en planta, fachadas y cubierta necesarias para construir posteriormente el modelo digital tridimensional. En el levantamiento arquitectónico de las fachadas se identificaron las áreas de ventana, el porcentaje de abertura y el sistema de las mismas. Adicionalmente se identificaron las capas, materiales y espesores que conforman los sistemas constructivos del espacio, con el objetivo de calcular las propiedades térmicas que alimentarán el modelo computacional.

Construcción del modelo y *software* utilizados

Con base en el levantamiento arquitectónico realizado, se construyó un modelo computacional en el *software* Rhino, y las simulaciones de desempeño térmico se realizaron a través del *plugin* Climate Studio. Esta herramienta permite analizar el desempeño térmico y la eficiencia energética de un espacio arquitectónico, basados en archivos climáticos y en las especificaciones de uso, materialidad y cargas de ocupación, y operación de ventanas, entre otros.

Parámetros de simulación

A continuación, en la Tabla 1, se describen los parámetros ingresados al modelo computacional sobre el estado actual del aula, para realizar la simulación del caso base, y la calibración con respecto a las mediciones tomadas en el sitio.

Tabla 1. Configuración caso base simulación.

Descripción	Parámetros de simulación del Caso base			
Archivo climático	COL ANT Medellín-Olaya.Herrera.AP.801100 TMYx.2007-2021			
Tipo de edificio	Educativo			
Envolvente exterior	Fachada Occidental y cubierta			
Cubierta	Material	Steel deck	Icopor	Steel deck
	Espesor (m ²)	0,001	0,05	0,001
	Conductividad	45	0,033	45
	Valor-R	1,66		
	Valor-U	0,6		
Muro oriental y norte	Material	Revoque	Ladrillo	Revoque
	Espesor (m ²)	0,01	0,15	0,01
	Conductividad	0,65	0,48	0,65
	Valor-R	0,51		
	Valor-U	1,95		
Muro sur	Material	Drywall	Aire	Drywall
	Espesor (m ²)	0,01	0,05	0,01
	Conductividad	0,58	0,02	0,58
	Valor-R	0,77		
	Valor-U	1,29		
Losa	Material	Steel deck	Concreto	
	Espesor (m ²)	0,001	0,1	
	Conductividad	45	2	
	Valor-R	0,26		
	Valor-U	3,85		

Rutinas Aula taller															
Hora	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Ocupación	80%	80%	100%	100%	100%	50%	20%	80%	80%	100%	100%	100%	100%	80%	50%
Equipos	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
Iluminación	80%	80%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Elaboración propia.

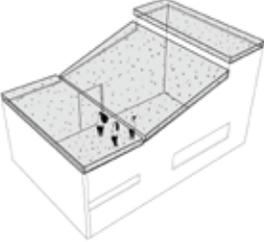
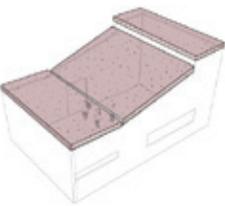
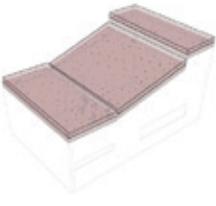
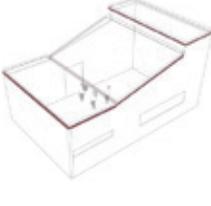
Calibración

Para la construcción del modelo del aula en el *software* se utilizaron los datos obtenidos en las mediciones en el sitio. Los resultados de la temperatura exterior se compararon con el archivo climático con el objetivo de analizar si éste permitía un acercamiento real a la temperatura del espacio según el microclima y el contexto específico en el que se encuentra el aula, para utilizarlo en las simulaciones. Adicionalmente, los resultados de las simulaciones del caso base del modelo del aula en el *software* se compararon con los resultados de las mediciones interiores, y se evaluó la semejanza entre ambas, obteniendo resultados del desempeño térmico según el comportamiento real del aula en los diferentes momentos del día. Las rutinas identificadas de ocupación del espacio como la utilización de equipos e iluminación, la operación de las ventanas y las propiedades térmicas de los materiales también fueron cargadas en el modelo según lo identificado, permitiendo la calibración de este de acuerdo con lo construido.

Escenarios evaluados

Se planteó la evaluación de cuatro (4) escenarios distintos con respecto al caso base, realizando variaciones en el tipo de material aislante aplicado, el espesor y la ubicación en la envolvente. Se inició con el caso base para identificar el desempeño térmico actual del espacio con el poliestireno expandido de un espesor de $X = 5$ cm, como escenario 0, y posterior a este se analizaron los escenarios adicionales como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2: Escenarios analizados

 <p>Escenario 0 Estado actual del aula poliestireno expandido en cubierta con espesor $X =$ cm</p>			
			
<p>Escenario 1 Celulosa en cubierta con espesor X</p>	<p>Escenario 2 Celulosa en cubierta con espesor $2X$</p>	<p>Escenario 3 Celulosa en cubierta con espesor $X/2$</p>	<p>Escenario 4 Celulosa en cubierta y fachada con espesor X</p>

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de confort

Con base en la temperatura de bulbo seco tomada del archivo climático se calculó la zona de confort para el sitio a través del modelo adaptativo propuesto por la ASHRAE 55 – 2010. Este modelo considera que los seres humanos son capaces de adaptarse al entorno que habitan y desarrollar diferentes niveles

de tolerancia al frío o al calor. La zona de confort adaptativo se calcula con la ecuación (1), donde T_c es la temperatura de confort y T_m la temperatura media exterior del lugar.

$$T_c = 17,8 + (0,31 \times T_m) \quad (1)$$

En el caso del presente proyecto, la temperatura media del lugar es de 24°C, por tanto, la temperatura de confort sería 25,2°C. A partir de esto, se definieron dos tipos de zona: la zona de confort 90% y la de 80% o permisible. En el primer caso se considera que dentro de esas temperaturas el 90% de los usuarios que habitan ese espacio van a sentir satisfacción con el ambiente térmico. En el segundo caso se considera un rango más amplio en el que se asume que los usuarios pueden ajustar su sensación térmica a través del cambio de la vestimenta, la actividad metabólica o la operación de ventanas. En la presente investigación, se consideró la zona de confort 90%, que para el clima del lugar donde se implanta el proyecto se ubica entre los 22,7°C y los 27,7°C, lo cual se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. Definición zona de confort.

Tipo de zona de confort	90%	80% o permisible
Fórmula	$Z_c = T_c \pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$Z_c = T_c \pm 3,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
Rango de temperaturas	$Z_c = 22,7 - 27,7^\circ\text{C}$	$Z_c = 21,7 - 28,7^\circ\text{C}$

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de resultados

El análisis de los resultados de las simulaciones se realizó por medio de diagramas de cajas y bigotes. Las gráficas ilustran el desempeño térmico del aula en los distintos escenarios para las 5 475 horas analizadas del año. Cada una de las cajas y bigotes representan los 365 días de una (1) hora durante la jornada educativa desarrollada entre las 7:00 y las 21:00 horas.

De esta forma, es posible visualizar los datos anuales en una sola gráfica sin realizar promedios. Este tipo de gráficas permite mostrar visualmente un grupo de datos numéricos a través de sus cuartiles, identificar valores clave como el promedio, la media, identificar la variabilidad de los datos superiores e inferiores, y los valores atípicos.

Resultados

En primer lugar, se realizó una puesta en paralelo entre los datos obtenidos del sensor ubicado al interior del aula y los datos resultantes de la simulación del escenario 0 (caso base). Lo anterior tuvo el objetivo de calibrar la simulación computacional con respecto a la realidad actual del espacio. Como se puede observar en la Figura 3, se alcanzaron grandes similitudes entre las 13:00 y las 21:00 horas. Mientras que entre las 7:00 y las 12:00 horas la simulación computacional muestra temperaturas significativamente mayores que la medición en sitio. Esto se debe a que actualmente el aula solo se usa en las horas de la tarde y la noche, permaneciendo vacía y cerrada durante las mañanas. Mientras que en las

rutinas ingresadas al modelo computacional se asume que el aula va a ser usada durante todo el día y por tanto va a tener mayores cargas internas en este periodo de tiempo.

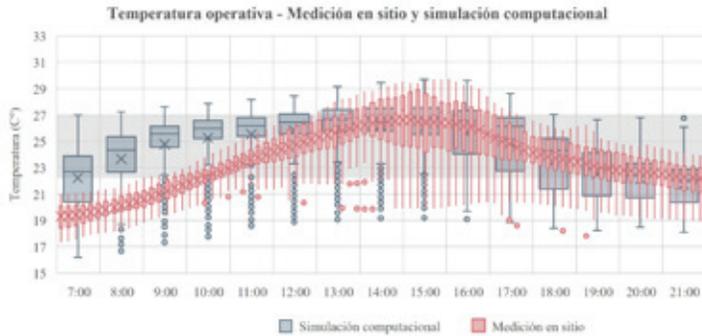


Figura 3. Calibración del modelo computacional. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones computacionales de desempeño térmico realizadas para el estado actual del aula y los escenarios planteados.

Escenario 0 - Estado actual del aula

Como se puede observar en la Figura 4, el aula en su estado actual se encuentra 3 654 horas del año dentro de la zona de confort del periodo analizado, 276 por encima y 1 545 por debajo, equivalente a un 66,7%, un 5% y un 28,2% respectivamente. Los periodos del día con mayores niveles de confort a lo largo del año se ubican entre las 9:00 y las 12:00 horas, alcanzando casi un 100% del tiempo dentro de la zona de confort adaptativo. Entre las 18:00 y las 10:00 horas el espacio se encuentra dentro o por debajo de la zona de confort, es decir que las personas podrían sentirse en confort o tener estrés térmico por frío, y entre las 13:00 y las 16:00 horas se podría presentar en algunos días del año un ligero sobrecalentamiento del espacio, requiriendo el uso de sistemas de aire acondicionado. La temperatura interior con respecto a la exterior es más estable.

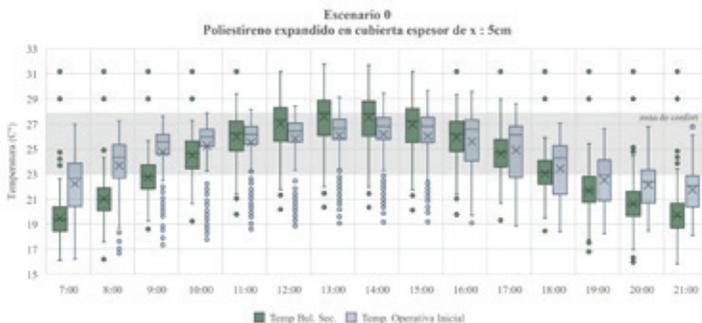


Figura 4. Escenario 0 y Temperatura exterior. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 1

El aula en el primer escenario de simulación, utilizando paneles de celulosa de 5cm en cubierta, se encuentra 3 597 horas del año dentro de la zona de confort del periodo analizado, 336 por encima y 1 542 por debajo, equivalente a un 65,7%, un 6,1% y un 28,2% respectivamente. (Figura 5). Los resultados son muy semejantes con los del caso base. En el escenario 1, el tiempo dentro de la zona de confort disminuye 1% con respecto al caso base, con una diferencia de 57 horas al año.

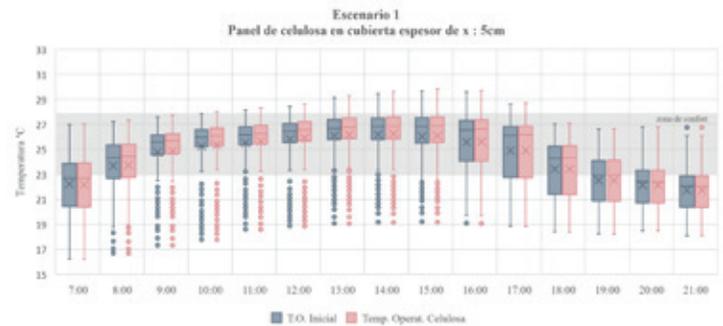


Figura 5. Escenario 1 y Escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 2

El aula en el segundo escenario de simulación, utilizando paneles de celulosa de 10 cm en cubierta, se encuentra 3 711 horas del año dentro de la zona de confort del periodo analizado, 230 por encima y 1 534 por debajo, lo que equivale a un 67,8%, un 4,2% y un 28,0% respectivamente (Figura 6). Los resultados son muy semejantes con los del caso base. Sin embargo, se puede observar que entre las 7:00 y las 13:00 horas, las temperaturas son ligeramente menores, pero entre las 18:00 y las 21:00 son ligeramente mayores. En el escenario 2, el tiempo dentro de la zona de confort aumenta un 1% con respecto al caso base, con una diferencia de 66 horas al año y un 2% con respecto al escenario 1.

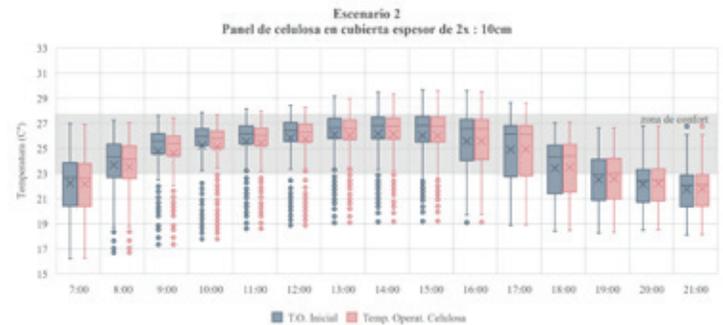


Figura 6. Escenario 2 y Escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 3

El aula en el tercer escenario de simulación, utilizando paneles de celulosa de 2,5 cm en cubierta, se encuentra 3 420 horas del año dentro de la zona de confort del periodo analizado, 522 por encima y 1 533 por debajo, equivalente a un 62,5%, un 9,5% y un 28,0% respectivamente (Figura 7). Se puede observar que en general, el escenario 3 presenta más altas temperaturas que el escenario 0, y mayores variaciones durante el año. El escenario 0 se encuentra 225 horas más que el escenario 3 dentro de la zona de confort, equivalente a un 4,3%.

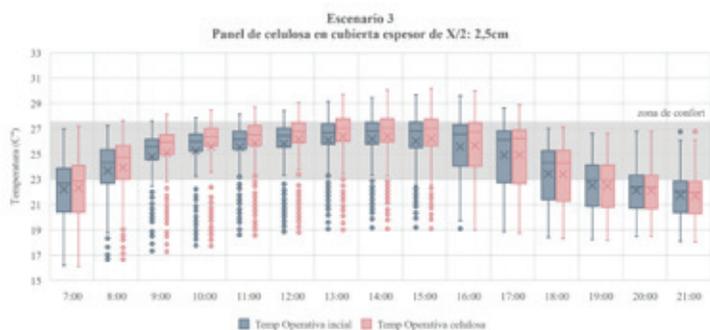


Figura 7. Escenario 3 y Escenario 0. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 4

Como se puede observar en la Figura 8, El aula en el cuarto escenario de simulación, utilizando paneles de celulosa de 5 cm en cubierta y 5 cm en fachada, se encuentra 3 964 horas del año dentro de la zona de confort del periodo analizado, 7 por encima y 1 504 por debajo, equivalente a un 72,4%, un 0,1% y un 27,4% respectivamente.

El escenario 4 presenta temperaturas más estables que el escenario 0 entre las 7:00 y las 17:00 horas, y presenta temperaturas más bajas en general. Entre las 18:00 y las 21:00 horas, cuando la temperatura exterior desciende, este escenario presenta temperaturas ligeramente más altas. Es decir, que esta configuración tiene más inercia térmica que las demás.

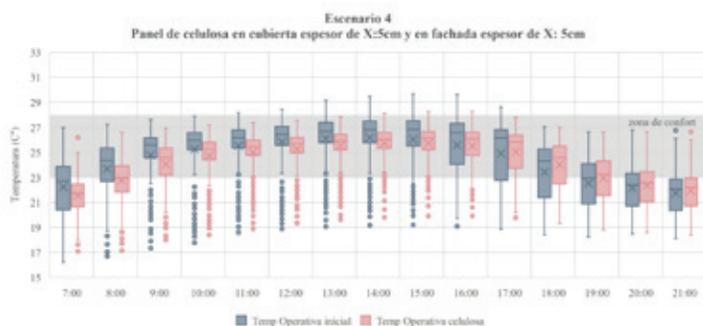


Figura 8. Escenario 4 y Escenario. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 4, se presenta un resumen de los porcentajes de tiempo alcanzados dentro, por encima y por debajo de la zona de confort de los diferentes escenarios. El escenario con el menor desempeño es el 3, en el que el espesor del material aislante se reduce a la mitad, permitiendo el paso del calor durante el día y aumentando el porcentaje de horas superiores a 27,7°C. El escenario con el mejor desempeño es el 4, al reducir casi a 0 el porcentaje de horas con posibilidad de calor, y aumentar las horas dentro de la zona de confort, con un descenso máximo de la temperatura, que puede alcanzar los 18°C, lo que en esta zona climática puede ser mitigada reduciendo la abertura de ventanas y aumentando el nivel de arropamiento de las personas.

Tabla 4. Porcentajes de tiempo dentro, por encima o por debajo de la zona de confort.

	Rangos de temperatura		
	>27,7°C	22,7 - 27,7°C	<22,7°C
Temperatura Bulbo Seco	11,9%	47,1%	41,1%
Escenario 0	5,0%	66,7%	28,2%
Escenario 1	6,1%	65,7%	28,2%
Escenario 2	4,2%	67,8%	28,0%
Escenario 3	9,5%	62,5%	28,0%
Escenario 4	0,1%	72,4%	27,5%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se expone un paralelo entre los escenarios evaluados, en este caso los diagramas de cajas y sesgos indican el comportamiento global de los escenarios y no se discriminan por horas. Se puede observar que el escenario 4 es el que logra un ambiente térmico más estable, oscilando entre los 18 y los 28°C, mientras que en el exterior pueden presentarse temperaturas entre los 14 y los 32°C.

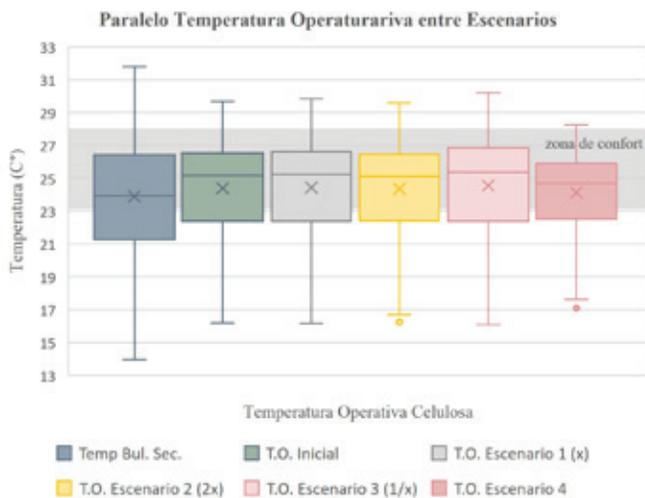


Figura 9. Paralelo de la temperatura operativa entre escenarios. Fuente: Elaboración propia.

También se puede observar que es mucho más efectivo aplicar un panel de 5 cm de celulosa en cubierta y otro de 5 cm en fachada que aplicar uno solo de 10 cm en la cubierta. Por otro lado, sustituir el material aplicado actualmente (poliestireno expandido) por el mismo espesor de celulosa presenta un desempeño térmico muy semejante con la diferencia de que este segundo tiene un menor impacto ambiental y también tiene propiedades acústicas.

Discusión

Una vez conocida la influencia sobre el desempeño térmico que tiene la aplicación de la celulosa en la envolvente del aula, y concluyendo que esta puede fácilmente igualar o mejorar el desempeño del material actual que es poliestireno expandido, se propone realizar un paralelo entre los dos materiales desde el punto de vista del impacto ambiental.

Para esto, se construyó un indicador de huella de carbono considerando el impacto ambiental generado por el material antes, durante y después de la vida útil de la edificación. Se tomaron 5 grandes ítems: 1. Las materias primas, 2. El transporte, 3. El montaje en obra, 4. El uso y mantenimiento y 5. El ciclo de vida. Posteriormente, se identificaron aspectos positivos y negativos en cada uno de esos procesos, para a través de un sistema cualitativo comparar los dos materiales.

Como se puede ver en la Figura 10, la celulosa tiene cinco aspectos positivos mientras que el poliestireno expandido solo tiene tres. La mayor diferencia es que la materia prima para fabricar la celulosa no es un derivado del petróleo y puede ser generada con los

residuos de maquetas, planos, libretas, entre otros instrumentos utilizados y descartados cada año en la facultad de artes integradas a la que pertenece el aula analizada en la presente investigación.



Figura 10. Puesta en paralelo del impacto ambiental de la celulosa y el poliestireno expandido. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, teniendo en cuenta los resultados alentadores obtenidos en esta primera aproximación al uso de la celulosa, parece oportuno continuar el proceso investigativo con estudios formales prácticos a través de ensayos de laboratorio, evaluación de resistencia del material y demás acciones que permitan confirmar los resultados teóricos a los que se han arribado.

Se valora así mismo la posibilidad de explorar el uso de otros materiales de desecho reciclados que pudieran mejorar las propiedades de la mezcla utilizada en esta fase de investigación en cuanto a maleabilidad, aglutinamiento, resistencia física, dureza, tenacidad, y elasticidad, entre otros.

Se considera también importante para futuras investigaciones, el análisis del desempeño acústico del material, tanto en relación con el aislamiento, como al acondicionamiento, y sus implicaciones sobre la modificación de las condiciones ambientales de los espacios educativos.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados, se concluye que el desempeño térmico de la celulosa aplicada como aislante en la cubierta del aula, puede alcanzar el mismo desempeño del material actual, poliestireno expandido, destacando que el primero tendría un menor impacto ambiental, debido al proceso de reciclaje para la obtención de la materia prima y su fabricación en el sitio.

A su vez, el proceso productivo podría convertirse en un elemento pedagógico importante dentro de la institución universitaria, incitando a toda la comunidad educativa a ser consciente de la forma en que se disponen los residuos de papel y cartón para su posterior clasificación.

Adicionalmente, se generaría un beneficio social, al producir un material de construcción asequible económicamente y renovable, el cual sería provechoso no solo para la universidad sino también para las comunidades cercanas y la población que posteriormente reciba el conocimiento adquirido por los estudiantes en esta práctica.

Desde el punto de vista metodológico, se concluye que las simulaciones a través del *software* Rhino, son una herramienta eficaz, que permitió realizar las predicciones necesarias, obteniendo unos resultados muy cercanos a la situación real.



Elizabeth Parra Correa
Arquitecta. Docente de la Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.
E-mail: elizabethparra.arq@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0644-0886>



Manuela Murillo Galvis
Arquitecta. Estudiante de Maestría. Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.
E-mail: manuela.murillo@tau.usbmed.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-0654-9825>



María Fernanda Aristizábal Vargas
Estudiante de arquitectura, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.
E-mail: maria.aristizabal17@tau.usbmed.edu.co
<https://orcid.org/0009-0000-6778-8195>



Manuela Quintero Londoño
Estudiante de arquitectura, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.
E-mail: manuela.quintero@tau.usbmed.edu.co
<https://orcid.org/0009-0001-8102-8739>



Laura Rivera Salazar
Estudiante de arquitectura, Facultad de Artes Integradas, Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.
E-mail: Laura.rivera17@tau.usbmed.edu.co
<https://orcid.org/0009-0008-7132-6653>

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Las autoras declaran que no existen conflictos de intereses que pudieran representar un riesgo para la publicación del artículo.

DECLARACIÓN DE DE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Elizabeth Parra Correa: Administración y supervisión del proyecto de investigación, desarrollo de la investigación y redacción del manuscrito.

Manuela Murillo Galvis: Desarrollo de la investigación, diseño de la metodología y redacción del manuscrito.

María Fernanda Aristizábal Vargas: Desarrollo de la investigación y redacción del manuscrito.

Manuela Quintero Londoño: Desarrollo de la investigación, diseño de la metodología y redacción del manuscrito.

Laura Rivera Salazar: Desarrollo de la investigación y redacción del manuscrito.



[Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional \[CC BY-NC-ND 4.0\]](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)