

Advances in the development of thermal insulators based on natural fibers and recycled paper

Sergio Gonzalez-Serrud^{1,4}, Aristides Villarreal², Adalberto Nieto², Rolando Carvajal², José Solís², Nacarí Marín^{3,4*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Víctor Levi Sasso, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Panamá,

^{3*}Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá, nacari.marin@utp.ac.pa

⁴Research Group—Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI), Panama, Panama

Abstract— In Panama, at the Universidad Tecnológica de Panamá, as part of the research lines in Manufacturing, Materials, Energy and Environment, several projects have been developed to assess the thermal insulation potential of different materials based on ASTM C-177 standards, for thermal conductivity coefficients determination. The studied materials are rice straw (0.050 W/mK), rice husk (0.073 W/mK), cellulose (obtained from recycled newspaper) (0.041 W/mK), and coconut fiber (0.025 W/mK). The obtained results have demonstrated the potential of these materials as thermal insulators. Although there is a need to improve manufacturing processes and specimen acquisition, the conducted studies have strengthened local capacities in developing new materials from waste. Overall, these investigations lay the groundwork for the development of materials as a sustainable alternative that can be used in environmentally friendly building contexts, contributing to the reduction of carbon footprint and enhancing thermal comfort.

Keywords—Thermal insulation, natural fibers, recycled cellulose, coconut fiber, rice husk, rice straw

Advances in the development of thermal insulators based on natural fibers and recycled paper

Avances en el desarrollo de aislantes térmicos a partir de fibras naturales y papel reciclado

Sergio Gonzalez-Serrud^{1,4}, Aristides Villarreal², Adalberto Nieto², Rolando Carvajal², José Solís², Nacarí Marín^{3,4*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Víctor Levi Sasso, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Licenciatura en Ingeniería Electromecánica, Panamá,

³Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Ingeniería Mecánica, Panamá, nacari.marin@utp.ac.pa

⁴Research Group—Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI), Panama, Panama

Abstract— In Panama, at the Universidad Tecnológica de Panamá, as part of the research lines in Manufacturing, Materials, Energy and Environment, several projects have been developed to assess the thermal insulation potential of different materials based on ASTM C-177 standards, for thermal conductivity coefficients determination. The studied materials are rice straw (0.050 W/mK), rice husk (0.073 W/mK), cellulose (obtained from recycled newspaper) (0.041 W/mK), and coconut fiber (0.025 W/mK). The obtained results have demonstrated the potential of these materials as thermal insulators. Although there is a need to improve manufacturing processes and specimen acquisition, the conducted studies have strengthened local capacities in developing new materials from waste. Overall, these investigations lay the groundwork for the development of materials as a sustainable alternative that can be used in environmentally friendly building contexts, contributing to the reduction of carbon footprint and enhancing thermal comfort.

Keywords—Thermal insulation, natural fibers, recycled cellulose, coconut fiber, rice husk, rice straw

Abstracto — En la Universidad Tecnológica de Panamá, en Panamá, como parte de las líneas de investigación en Fabricación, Materiales, Energía y Medio Ambiente, se han desarrollado varios proyectos para evaluar el potencial de aislamiento térmico de diferentes materiales basados en los estándares ASTM C-177, para la determinación de los coeficientes de conductividad térmica. Los materiales estudiados son la paja de arroz (0.050 W/mK), la cascarilla de arroz (0.073 W/mK), la celulosa (obtenida de periódicos reciclados) (0.041 W/mK), y la fibra de coco (0.025 W/mK). Los resultados obtenidos han demostrado el potencial de estos materiales como aislantes térmicos. Aunque existe necesidad de mejorar los procesos de fabricación y la adquisición de muestras, los estudios realizados han fortalecido las capacidades locales en el desarrollo de nuevos materiales a partir de residuos. En general, estas investigaciones establecen las bases para el desarrollo de materiales como una alternativa sostenible que puede utilizarse en contextos de construcción amigables con el medio ambiente, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y mejorando el confort térmico.

Palabras claves—Aislante térmico, fibras naturales, celulosa reciclada, fibras de coco, cascarilla de arroz, paja de arroz

I. INTRODUCTION

El aporte total de edificios al consumo de energía en el ámbito residencial o comercial ha crecido constantemente, llegando a representar entre el 20% y el 40% en naciones desarrolladas. Este porcentaje ha superado a los sectores industriales y de transporte, consolidándose como una influencia significativa en la demanda energética global [1]. El aumento de la población, junto con una creciente demanda de servicios de construcción y expectativas elevadas de comodidad, y el aumento en el tiempo dedicado en los edificios, aseguran que la tendencia al alza en la demanda de energía persistirá en el futuro. En consecuencia, lograr la eficiencia energética en los edificios se ha convertido en un objetivo principal en las políticas energéticas a nivel regional, nacional e internacional. Entre los diversos servicios de construcción, el aumento en el consumo de energía por parte de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés) es especialmente notable, representando el 50% del consumo de edificios y el 20% del consumo total en los Estados Unidos [1,2].

El porcentaje del consumo energético se relaciona con el acondicionamiento de aire [3]. En los últimos años la búsqueda de alternativas al ahorro energético se ha relacionado con el rediseño y la utilización de nuevos materiales [4–6]. Existen diferentes tipos de materiales utilizados para el aislamiento en edificaciones, tales como lana mineral, poliuretano, poliestireno expandido y fibra de vidrio. Estos materiales aislantes presentan una baja conductividad térmica, que oscila entre 0.02 y 0.05 W/mK [4,7]. Sin embargo, ciertos materiales como lana de vidrio y fibra de vidrio que pueden provocar problemas respiratorios, y existen limitaciones relacionadas con su uso

durante la fase de construcción debido a sus deficientes propiedades mecánicas [8].

Actualmente, hay una creciente demanda de materiales aislantes biodegradables, no tóxicos y económicos, para evitar los altos costos y la toxicidad asociados con los materiales aislantes tradicionales [9–12]. Desarrollar tales materiales a partir de recursos renovables presenta varias ventajas. Por ejemplo, no afectan negativamente al medio ambiente durante la producción, generando un doble efecto positivo neto al maximizar el uso de recursos renovables y minimizar el consumo de energía en edificaciones aisladas, lo que reduce combustibles fósiles y aumenta la eficiencia energética [13,14]. En el caso de Panamá, en la Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, se han desarrollado prototipos de materiales a base de fibras naturales y papel periódico reciclado, con el objetivo de verificar su potencial en aplicaciones de aislamiento térmico [12,15–17]. En el presente trabajo, se presentan los avances en el desarrollo de aislantes térmicos a partir de fibras naturales, concretamente a base de paja de arroz, cascarilla de arroz y fibra de coco. También se ha desarrollado un material a base de papel periódico reciclado con cascarilla de arroz. Estos materiales han sido ensayados mediante la norma ASTM C-177 [18], que permite determinar el coeficiente de conductividad térmica del material. Este trabajo pretende mostrar una breve descripción del desarrollo de estos materiales, así como los resultados obtenidos y las líneas de trabajo futuro.

El uso de aislamiento térmicos de origen natural representa una baja energía gris o incorporada (embodied energy), lo que se traduce en un menor impacto al ambiente [19,20]. Se ha evidenciado que la energía total incorporada en los edificios construidos con mampostería tiene la posibilidad de disminuir en un 50% al emplear materiales de construcción que sean alternativos o eficientes en términos energéticos [20].

II. ANTECEDENTES

El reporte Global Risks Report [21] y el Plan Energético Nacional 2015-2050 [22] señalan los riesgos ambientales, como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad, se encuentran entre los más probables y de mayor impacto. Desarrollar aislantes térmicos eficientes puede ayudar a reducir el consumo energético de los edificios, lo que a su vez puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero [23]. Uno de los enfoques para enfrentar la crisis climática y el agotamiento de recursos es la transición hacia una economía circular [24]. Al transformar un desecho agrícola, como la cascarilla de arroz, en un material útil, se promueve la reutilización y se reduce la dependencia de recursos no renovables [25].

En el ámbito de la investigación sobre el aislamiento de recintos, se ha abordado el uso de materiales naturales mediante el diseño y la fabricación de prototipos, acompañados de análisis térmicos detallados. Entre estos materiales, se destaca el empleo de fibras de fique con una conductividad térmica entre 0.032 y 0.045 W/m°C [26]. En la literatura científica se han reportado estudios de eficiencia energética en fibras

naturales como el lino, algodón, bambú, coco, madera, lana de oveja, pluma de pato, celulosa [27], y cascarilla de arroz aglomerado con almidón, con una conductividad térmica entre 0.04 a 0.09 W/m. K [28–30].

Otros materiales naturales incluyen biomasa de bagazo, pajonal, cacao mineralizado con cemento, raquis de palma y cascarilla de café. Asimismo, se han llevado a cabo estudios sobre materiales reciclados, como lana de oveja y algodón, con resultados de conductividades térmicas entre 0.036 y 0.044 W/mK [31]. Además, la evaluación de paneles de aislamiento térmico fabricados con partículas de residuo de espumas de plástico conglomeradas con yeso ha arrojado una conductividad térmica de 0.065 W/m K [32].

La estimación experimental de la conductividad térmica de materiales de desecho agroindustrial se ha abordado específicamente en aplicaciones de refrigeración y sistemas de acondicionamiento de aire [2]. Estos estudios y mediciones aportan valiosos antecedentes para comprender y evaluar la eficacia de diversos materiales en el ámbito del aislamiento térmico, contribuyendo al avance en la eficiencia energética y sostenibilidad en la construcción y diseño de recintos.

Materiales de construcción derivados de residuos agroindustriales son cada vez más atractivos en el sector de la construcción, debido a su sostenibilidad y menor impacto ambiental [33]. Los materiales aislantes juegan un papel importante en el diseño y construcción, concretamente en la conservación de energía y el confort térmico dentro de una edificación [34]. Los materiales provenientes de fibras naturales y a base de celulosa procedente de papel y cartón, han demostrado propiedades como aislante térmico [35]. En los últimos años a nivel mundial se ha incrementado la cantidad de investigaciones y publicaciones tendientes al desarrollo de materiales que aprovechan residuos de las actividades agroindustriales e industriales, como alternativa a los materiales comerciales de origen sintético [36].

Una de las características principales que presenta la utilización de fibras naturales y papel reciclado para el desarrollo de nuevos materiales, además de su resistencia térmica, corresponde a su baja energía gris o incorporada (del inglés embodied energy) durante su producción, transporte y disposición al final de su vida útil, lo que se traduce en un menor impacto al ambiente [19,20]. Normalmente las fibras naturales empleadas como aislante térmico se constituyen en un subproducto y en otros casos desechos de procesos agroindustriales, como es el caso de la paja de arroz, de la cascarilla de arroz y de la caña; rubros que se cultivan en grandes proporciones en nuestro país [16,25,37].

En Panamá, en la Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultades de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Eléctrica, como parte de las líneas de investigación de Manufactura, Materiales y de Energía y Ambiente, se han desarrollado proyectos en los que se verifica el potencial de aislamiento térmico de diferentes materiales, en base a la Norma ASTM C177 [18], que permite la obtención del coeficiente de conductividad térmica. Entre los materiales

estudiados se encuentran la paja de arroz (0.050 W/mK) [17], cascarilla de arroz (0.073 W/mK) [25], celulosa (papel periódico reciclado) (0.041 W/mK) [38] y fibra de coco (0.025 W/mK) [15]. Los resultados obtenidos han demostrado el potencial que poseen estos materiales como aislantes térmicos. Aunque se requiere mejorar procesos de fabricación y de obtención de probetas, los estudios realizados han fortalecido las capacidades locales en el desarrollo de nuevos materiales a partir de desechos con valor agregado y en la generación de conocimientos [12]. En general, estas investigaciones sientan las bases para desarrollar materiales, como alternativa sustentable, que puede usarse en edificaciones amigables con el medio ambiente, que contribuyan a reducir la huella de carbono y a mejorar el confort térmico [39].

III. METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

En la figura 1 se presentan los pasos generales a seguir, para la obtención de un material a base de fibra y/o papel periódico reciclado. En el caso de un material compuesto a base de fibra natural, se prepara una cantidad determinada de fibra de origen orgánico (paja de arroz, cascarilla de arroz, fibra de coco, celulosa) y se mezcla con su respectivo aglomerante. Las metodologías han sido presentadas en [6,10].

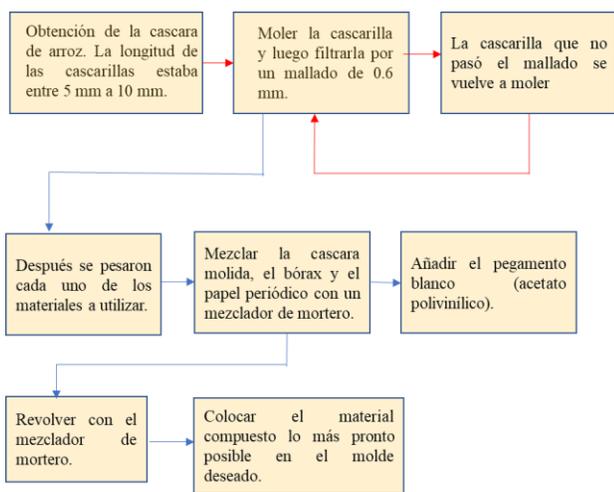


Figura 1. Metodología para la obtención de material compuesto a base de fibra de origen natural.

Para la elaboración de las distintas muestras se utilizaron los siguientes materiales de origen orgánico y respectivas proporciones másicas (tabla 1).

Tabla 2. Componentes empleados en cada uno de los materiales desarrollados.

Fibra de origen orgánica principal	Aglomerante	Fibra natural secundaria	Agente antifúngico	
Paja de arroz (66%)	Almidón de yuca (34%)	-	-	[17]
Cascarilla de arroz (33%)	Crema de arroz comercial (67%)	-	-	[25]
Celulosa (papel periódico) (14%)	Acetato polivinílico (62%)	Cascarilla de arroz molida (9%)	Bórax (15%)	[38]
Fibra de coco (14.75%)	Almidón de yuca (85.25%)	-	Vinagre (15%)	[15]

IV. METODOLOGÍA DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

En la figura 2 se presenta de forma resumida la metodología adoptada para la fabricación de las probetas a base de materiales de origen orgánico.

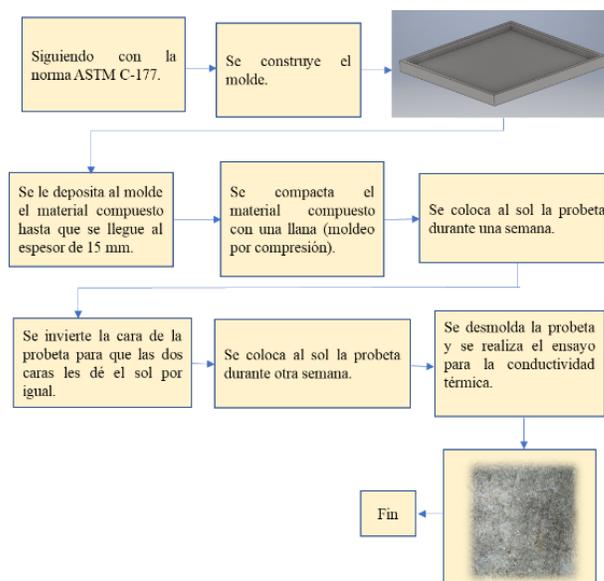


Figura 2. Pasos realizados para obtener las probetas de conductividad térmica.

En la siguiente tabla se observa el acabado final de las placas para medir la conductividad térmica, construidas en los proyectos del Centro Regional de Azuero de la Universidad Tecnológica de Panamá. Proyecto de paja de arroz y aglutinante de yuca [17]. Proyecto de cascarilla de arroz y crema de arroz

comercial [25]. Proyecto de papel periódico, cascarilla de arroz, acetato polivinílico y bórax [38]. Proyecto de fibra de coco y aglutinante de maíz [15]. Las placas construidas tuvieron dimensiones de 30 x 30 cm y un espesor nominal de 1.5 cm, siguiendo las norma ASTM C177 [40]. Las figuras mostradas en la tabla 2 fueron tomadas después del tiempo de secado del material (2 semanas).

Tabla 3. Placas obtenidas a partir de cada uno de los materiales desarrollados en el Centro Regional de Azuero, Universidad Tecnológica de Panamá.

Aislante térmico a base de fibras de origen orgánico	Figura	Referencia
Paja de arroz		[17]
Cascarilla de arroz		[25]
Celulosa (papel periódico)		[38]

Fibra de coco		[15]
---------------	---	------

IV. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El coeficiente de conductividad térmica se midió con un aparato denominado "caja caliente", según la norma ASTM-C177 [18,40]. El dispositivo "caja caliente" se basa en la Ley de Fourier de conducción del calor [41]. Consiste en una caja hecha de madera, con un lado abierto. Contiene una fuente de calor en su interior (bombilla incandescente de potencia conocida), instalada en uno de sus lados y un sensor de temperatura DHT22 con Arduino (figura 4). El material sólido para evaluar se coloca en el lado abierto. Las paredes internas del aparato están bien aisladas, para minimizar las pérdidas por conducción y producir un flujo de calor unidireccional a través del material sólido a evaluar [12,38].

El objetivo principal de este aparato es medir el gradiente de temperatura, midiendo las temperaturas dentro y fuera de la caja. Las mediciones de la temperatura exterior se realizan utilizando una cámara termográfica (FLUKE Ti 110) (figura 3B). Para mantener un estado estacionario, el sistema debe disponer de tiempo suficiente para completar la prueba o garantizar unas condiciones de prueba estacionarias [12,42]. El coeficiente de conductividad térmica (k) del panel puede calcularse mediante la siguiente ecuación (1):

$$k = \frac{L \cdot Q}{A(T_1 - T_2)} \quad (\text{W/ m}\cdot\text{K}) \quad (1)$$

Q, representa la potencia del bombillo incandescente (85 W, nominal); T₂ la temperatura dentro de la caja térmica; T₁ la temperatura en la cara de la placa que da hacia el exterior; L el espesor de la placa (0.015 m, nominal) y la A es el área perpendicular a la transferencia de calor (0.09 m², nominal).

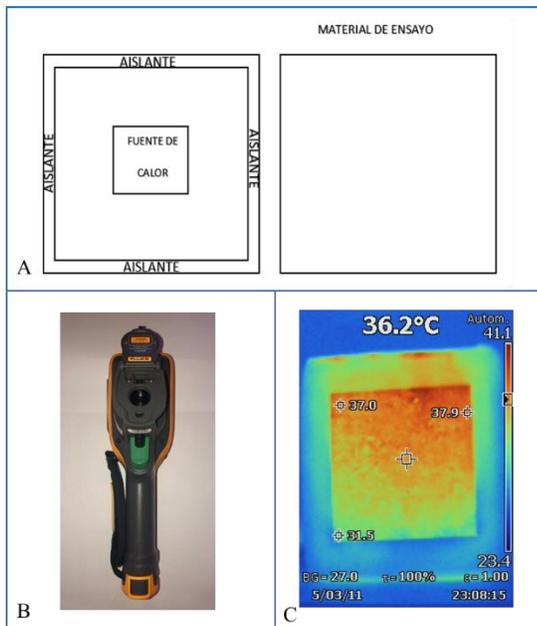


Figura 4. A. Esquema del medidor de conductividad térmica propuesto. B. Cámara de imagen térmica marca Fluke Ti110. C. Fotografía térmica de la superficie exterior de una placa de prueba.

En la figura 4 se ve la disposición de los cables y de los sensores DEHT 22 y DHT11. Dichos sensores fueron introducidos en la parte interna de la caja caliente “hot box”.

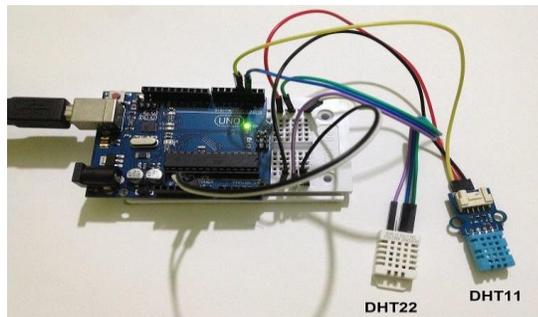


Figura 4. Conexión de DHT22 Y DHT11 en una misma placa de Arduino UNO.

IV. RESULTADOS

4.1 Ensayo de conductividad térmica

Se llevó a cabo la prueba de conductividad a las placas fabricadas con el porcentaje máxico ya mencionado anteriormente (ver Tabla 1 y 3):

Tabla 4. Propiedades térmicas de las placas construidas en la Universidad Tecnológica de Panamá.

	Paja de arroz [17]	Cascarilla de arroz [25]	Papel periódico (celulosa) [38]	Fibra de coco [15]	
Q (Potencia)	85	85	85	2	Watts
ΔT	280.2	193.7	227.8	297.7	K
X(Espesor)	0.015	0.015	0.010	0.030	m
A (área)	0.09	0.09	0.09	0.008	m ²
K (Conductividad térmica)	0.050	0.073	0.041	0.025	W/mK

V. COMPARATIVA Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para materiales tradicionales, los valores oscilan entre 0.03 y 0.06 W/mK y para materiales aislantes orgánicos, los valores oscilan entre 0.03 y 0.1 W/mK [43]. En los estudios analizados, los resultados experimentales mostraron un buen comportamiento térmico de todas las composiciones investigadas, considerando que los valores del coeficiente de conductividad térmica k varían entre 0.025 y 0.073 W/mK.

Los resultados obtenidos indican que los materiales de reciclaje y los residuos agrícolas tienen el potencial como materiales de construcción, y representan una opción de sostenibilidad ambiental y económica. Una de las principales características de los materiales presentados es su baja energía en su proceso de producción, considerando que son subproductos agrícolas y desechos con valor agregado [7].

El arroz es uno de los cultivos de mayor producción en la agricultura panameña, con una superficie sembrada de más de 95.890 hectáreas y 7.416.500 quintales en cáscara, según datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos en el año agrícola 2020-2021 [44]. La cascarilla de arroz se considera un residuo agroindustrial, que normalmente se desecha en vertederos municipales o se incinera, convirtiéndose en una importante preocupación ambiental en los países en desarrollo [45].

Por otra parte, la paja de arroz se emplea como alimento para ganado en tiempos de escasez, y en la mayoría de los casos se desecha [46].

Los resultados obtenidos han demostrado el potencial de estos materiales como aislantes térmicos. Aunque existe necesidad de mejorar los procesos de fabricación y la adquisición de muestras, los estudios realizados han fortalecido las capacidades locales en el desarrollo de nuevos materiales a partir de residuos. En general, estas investigaciones establecen las bases para el desarrollo de materiales como una alternativa sostenible que puede utilizarse en contextos de construcción

amigables con el medio ambiente, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y mejorando el confort térmico.

VI. TRABAJOS FUTUROS

Hay ciertas consideraciones que deben tenerse en cuenta durante el proceso de fabricación de materiales de base orgánica:

- Los aisladores de fibras naturales absorben agua en grandes cantidades, condición que permite el crecimiento de hongos y reducen su vida útil.
- Los paneles investigados podrían ser una solución válida en sustitución de los clásicos sistemas de aislamiento, aunque queda la línea de investigación abierta para la realización de pruebas adicionales al material.
- Realizar ensayos acústicos de aislamiento sonoro a los materiales presentados en este artículo.
- Los autores están evaluando la degradación del material desarrollado, en condiciones ambientales controladas. Optimización del proceso de fabricación, considerando el tamaño de las partículas.

VII. CONCLUSIONES

Con el comportamiento térmico que presentó el material estudiado, se puede considerar su uso para mejorar la temperatura interior en recintos, aplicándolo en techos, paredes y ventanas de recintos. Realizando esto también se aportaría en la mejora de la eficiencia energética, disminuyendo el consumo eléctrico de equipos al trabajar a temperaturas más bajas y evitando pérdidas considerables de energía en cableados, esto, tomando en cuenta el clima en Panamá, caracterizado por altas temperaturas y humedades relativas durante el día.

Se requiere mejorar procesos de fabricación de paneles y de obtención de probetas. Los materiales podrían tener utilidad en varios dominios de la ingeniería, incluida la producción de componentes livianos, paneles de construcción, empaques sustentables, disipación de energía, aislamiento térmico, entre otros. Los estudios realizados han fortalecido las capacidades locales en el desarrollo de nuevos materiales con valor agregado y en la generación de conocimientos, es imprescindible realizar más investigaciones y pruebas para evaluar su viabilidad y rendimiento en cada aplicación específica. En general, estas investigaciones sientan las bases para desarrollar materiales, como alternativa sustentable, que puede emplearse en edificaciones amigables con el medio ambiente, que contribuyan a reducir la huella de carbono y a mejorar el confort térmico.

Finalmente, se considera que se cumplió con los objetivos de este estudio, el cual era mostrar una descripción de la metodología y desarrollo de los materiales aislantes térmicos construidos en el Centro Regional de Azuero, Universidad Tecnológica de Panamá, así como los resultados obtenidos y las líneas de trabajo futuro. Se obtuvieron resultados positivos en cuanto a aislamiento térmico, por lo que la aplicación en

recintos de estos materiales puede beneficiar en la generación de confort térmico, disminuir la necesidad de utilizar aire acondicionado y reducir costos al momento de comprar los aislamientos térmicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Grupo de Investigación-Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI), Facultad de Ingeniería Mecánica (<https://fim.utp.ac.pa/>, consultado el 31 de enero de 2024), Centro Regional de Azuero, Universidad Tecnológica de Panamá (<https://ls.utp.ac.pa/>, consultado el 31 de enero de 2024), por su colaboración.

REFERENCIAS

1. Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. A Review on Buildings Energy Consumption Information. *Energy Build* **2008**, *40*, 394–398, doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
2. Wang, Q.; Su, M.; Li, R.; Ponce, P. The Effects of Energy Prices, Urbanization and Economic Growth on Energy Consumption per Capita in 186 Countries. *J Clean Prod* **2019**, *225*, 1017–1032, doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.008.
3. Lei, L.; Chen, W.; Wu, B.; Chen, C.; Liu, W. A Building Energy Consumption Prediction Model Based on Rough Set Theory and Deep Learning Algorithms. *Energy Build* **2021**, *240*, 110886.
4. Abu-Jdayil, B.; Barkhad, M.S.; Mourad, A.-H.I.; Iqbal, M.Z. Date Palm Wood Waste-Based Composites for Green Thermal Insulation Boards. *Journal of Building Engineering* **2021**, *43*, 103224, doi:10.1016/j.job.2021.103224.
5. Lopez Hurtado, P.; Rouilly, A.; Raynaud, C.; Vandenbossche, V. The Properties of Cellulose Insulation Applied via the Wet Spray Process. *Build Environ* **2016**, *107*, 43–51, doi:10.1016/j.buildenv.2016.07.017.
6. Muthuraj, R.; Lacoste, C.; Lacroix, P.; Bergeret, A. Sustainable Thermal Insulation Biocomposites from Rice Husk, Wheat Husk, Wood Fibers and Textile Waste Fibers: Elaboration and Performances Evaluation. *Ind Crops Prod* **2019**, *135*, 238–245, doi:10.1016/j.indcrop.2019.04.053.
7. Chikhi, M.; Agoudjil, B.; Boudenne, A.; Gherabli, A. Experimental Investigation of New Biocomposite with Low Cost for Thermal Insulation. *Energy Build* **2013**, *66*, 267–273, doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.019.
8. Saboktakin, M.; Saboktakin, A. Natural Aerogels as Thermal Insulators. In *Bio Monomers for Green Polymeric Composite Materials*; Wiley, 2019; pp. 201–225.
9. Gonzalez-Serrud, S.; Saavedra, D.; Marín, N. Development of a New Cellulose-Based Thermal Insulating Material Desarrollo de Un Nuevo Material Aislante Térmico a Base de Celulosa. In Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology ; January 2023.
10. Gonzalez-Serrud, S.; Saavedra, D.; Marín, N. Caracterización Mecánica y Térmica de Un Compuesto a Base de Celulosa. In Proceedings of the Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica-CIBIM 2022; Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), 2022.
11. González-Serrud, S.; Bernal, A.; Chung, A.; Marín, N. Fabricación de Láminas Construidas a Base de Fibras

- Naturales Que Absorben Humedad Relativa Del Entorno. *Revista de Iniciación Científica* **2022**, *8*, 7–16, doi:10.33412/REV-RIC.V8.2.3664.
12. Marín-Calvo, N.; González-Serrud, S.; James-Rivas, A. Thermal Insulation Material Produced from Recycled Materials for Building Applications: Cellulose and Rice Husk-Based Material. *Front Built Environ* **2023**, *9*, doi:10.3389/fbuil.2023.1271317.
 13. Beasley, J.; Georgeson, R.; Ardit, S.; Barczak, P. Advancing Resource Efficiency in Europe: Indicators and Waste Policy Scenarios to Deliver a Resource Efficient and Sustainable Europe. *Brussels: European Environmental Bureau (EEB)* **2014**.
 14. Pedroso, M.; de Brito, J.; Silvestre, J.D. Characterization of Eco-Efficient Acoustic Insulation Materials (Traditional and Innovative). *Constr Build Mater* **2017**, *140*, 221–228, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.02.132.
 15. Quintero, A.; Nieto, A. Evaluación Del Potencial de Acondicionamiento Termoacústico a Base de Fibra de Coco, Como Material de Desecho Con Valor Agregado, Universidad Tecnológica de Panamá: Panamá, 2023.
 16. Cigarruista, L.; Marín, N. Elaboración de Paneles Para Aislante Térmico a Base de Cascarilla de Arroz. In Proceedings of the IX Simposio Iberoamericano de Ingeniería Residuos; Universidad Tecnológica de Panamá, Ed.; <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/15246>, 2021.
 17. Carvajal, R.; Solís, J. Evaluación y Análisis Térmico y Energético de Distintos Tipos de Materiales Para Aislamiento Térmico Dentro de Un Recinto, Universidad Tecnológica de Panamá: Panamá, 2019.
 18. American Society for Testing and Materials-ASTM Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus ASTM C177.
 19. Venkatarama Reddy, B.V.; Jagadish, K.S. Embodied Energy of Common and Alternative Building Materials and Technologies. *Energy Build* **2003**, *35*, 129–137, doi:10.1016/S0378-7788(01)00141-4.
 20. Grazieschi, G.; Asdrubali, F.; Thomas, G. Embodied Energy and Carbon of Building Insulating Materials: A Critical Review. *Cleaner Environmental Systems* **2021**, *2*, 100032.
 21. Markovitz, G.; Heading, S. Global Risks Report 2023: We Know What the Risks Are-Here's What Experts Say We Can Do about It 2023.
 22. Secretaría Nacional de Energía <https://www.senacyt.gob.pa/wp-content/uploads/2018/12/3.-Plan-Energetico-Nacional-2015-2050-1.pdf>. Panama April 5 2016,.
 23. Palomo Cano, M. Aislantes Térmicos: Criterios de Selección Por Requisitos Energéticos. **2017**.
 24. Foster, G. Circular Economy Strategies for Adaptive Reuse of Cultural Heritage Buildings to Reduce Environmental Impacts. *Resour Conserv Recycl* **2020**, *152*, 104507, doi:10.1016/j.resconrec.2019.104507.
 25. Cigarruista, L. Evaluación Del Potencial Térmico de La Cascarilla de Arroz Como Aislante Aplicado En Los Techos Residenciales, Universidad Tecnológica de Panamá: Panamá, 2021.
 26. Muñoz, D.M.; Cifuentes, G.C. El Figue Como Aislante Térmico. *Biotechnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* **2007**, *5*, 9–16.
 27. Mercier, D.; Dutil, Y.; Rousse, D.; Pronovost, F.; Boudreau, D.; Hudon, N.; Castonguay, M. Los Aislamientos Térmicos Naturales: Construcción Ecológica y Eficiencia Energética. *Ponencia presentada en el Coloquio Universitario Franco-Québécois, Saguenay* **2011**.
 28. García Sánchez, G.F.; Guzmán López, R.E.; Gonzalez-Lezcano, R.A. Figue as a Sustainable Material and Thermal Insulation for Buildings: Study of Its Decomposition and Thermal Conductivity. *Sustainability* **2021**, *13*, 7484, doi:10.3390/su13137484.
 29. Velasco, L.; Goyos, L.; Nicolás, F.; Naranjo, C.; Ecuador, S. Investigación y Desarrollo de Aislantes Térmicos Naturales Basados En Residuos de Biomasa Para Su Aplicación En La Mejora de La Eficiencia Energética de Las Edificaciones En América Latina. *Ingeniería y Sociedad UC* **2015**, *10*, 8–21.
 30. Javier, G.M.F.; Alberto, R.S.L.; Macià, L. Algunos Antecedentes a La Propuesta y Evaluación de Paneles Aislantes Térmicos Para La Construcción, Fabricados Con Partículas de Residuos de Espumas de Plástico y Conglomerados Con Yeso. Una Aportación Para Recuperar Plásticos Espumados de Desechos.
 31. Wadel, G. Aislamientos Térmicos Renovables y Reciclados de Lana de Oveja y Algodón: Un Aporte a La Construcción Sostenible. *Revista de Arquitectura* **2009**, *15*, ág-27.
 32. Muñoz, A.; Chejne, F.; Espinel, J.; Londoño, C. Evaluación de La Celulosa de Papel y de Las Cenizas de Carbón, Como Materiales Aislantes Alternativos. *Dyna (Medellin)* **2006**, *73*, 1–8.
 33. Ramesh, T.; Prakash, R.; Shukla, K.K. Life Cycle Energy Analysis of Buildings: An Overview. *Energy Build* **2010**, *42*, 1592–1600, doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007.
 34. Ajabli, H.; Zoubir, A.; Elotmani, R.; Louzazni, M.; Kandoussi, K.; Daya, A. Review on Eco-Friendly Insulation Material Used for Indoor Comfort in Building. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2023**, *185*, 113609.
 35. Miron, I.O.; Manea, D.L.; (Andreeș), D.M.C.; Aciu, C. Organic Thermal Insulation Based on Wheat Straw. *Procedia Eng* **2017**, *181*, 674–681, doi:10.1016/j.proeng.2017.02.449.
 36. Asdrubali, F.; D'Alessandro, F.; Schiavoni, S. A Review of Unconventional Sustainable Building Insulation Materials. *Sustainable Materials and Technologies* **2015**, *4*, 1–17, doi:10.1016/j.susmat.2015.05.002.
 37. Dirección de Agricultura - Ministerio de Desarrollo Agropecuario Cierre Agrícola, Año Agrícola 2022-2023.
 38. Gonzalez-Serrud, S. Evaluación de Un Material Compuesto a Base de Cascarilla de Arroz, Papel Periódico y Pegamento Blanco, Universidad Tecnológica de Panamá: Panamá, 2023.
 39. Shekar, H.S.S.; Ramachandra, M. Green Composites: A Review. *Mater Today Proc* **2018**, *5*, 2518–2526, doi:10.1016/j.matpr.2017.11.034.
 40. Carvajal, R.; Solís, J.; Marín, N. Prototipo de Medida de Conductividad Térmica de Materiales Basado En La Norma ASTM C177.
 41. Cengel, Y.A.; Ghajar, A.J. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*; 6th ed.; McGraw-Hill Professional: New York, 2020;
 42. Bergman, T.L.; Lavine, A.S.; Incropera, F.P.; DeWitt, D.P. *Introduction to Heat Transfer*; John Wiley & Sons, 2011; ISBN 0470501960.
 43. Ighalo, J.O.; Adeniyi, A.G.; Owolabi, O.O.; Abdulkareem, S.A. Moisture Absorption, Thermal and Microstructural Properties of Polymer Composites Developed from Rice

Husk and Polystyrene Wastes. *International Journal of Sustainable Engineering* **2021**, *14*, 1049–1058, doi:10.1080/19397038.2021.1892234.

44. Ministerio de Desarrollo Agropecuario de Panamá Cierre 2020-2021.
45. Carlos Javier, R.H.; Karin, R.N.; Juan Pablo, C.-R. Valorization of Wheat Crop Waste in Araucanía, Chile: Development of Prototype of Thermal Insulation Material for Blowing Technique and Geographical Analysis. *Buildings* **2023**, *13*, 1152, doi:10.3390/buildings13051152.
46. Carvajal, R.; Robles, J.; Solís, J.; Vargas, J.; Marín, N. Sistema de Análisis Energético y de Temperatura de Las Ventanas de Un Aula de Clase Con y Sin Aislamiento Térmico. *Revista de Iniciación Científica* **2018**, *4*, 26–30.