

CAPÍTULO 15.

ANÁLISIS DE COEFICIENTES ACÚSTICOS DE COMPUESTOS NATURALES Y SUS APLICACIONES COMO MATERIAL DE AISLAMIENTO

Julio Cesar Pareja Cabrera¹

¹: Licenciado Físico Matemático.

 <https://orcid.org/0000-0002-0837-0079>

RESUMEN

Este capítulo revisa, de forma narrativa y con base en 148 estudios publicados entre 2010-2024, los coeficientes de absorción (α), transmisión (TL) e impedancia (Z) de compuestos naturales con ≥ 50 % de contenido vegetal o proteico y su aplicación como aislantes acústicos. Se demuestra que espumas y paneles de cáñamo, coco, juta, corcho o lana de oveja alcanzan $\alpha > 0,7$ y TL 20-30 dB en configuraciones óptimas (25-40 mm, 80-120 kg m⁻³), equiparables a lana mineral en frecuencias medias-altas. La porosidad y el espesor son los principales predictores de α , mientras que la masa y el damping controlan TL. La síntesis revela que la ausencia de normas específicas, la variabilidad agrícola y la degradación higro-térmica limitan su adopción masiva; no obstante, análisis de ciclo de vida disponibles indican una reducción de 20-40 % en emisiones de CO₂-eq frente a aislamientos sintéticos. Se identifican rutas de optimización multinivel (micro-, meso- y macro-porosidad) y se proponen futuras líneas de investigación en nanofibras celulósicas, impresión 3D de espumas gradiente y híbridos natural-sintético tuneables. La integración de estos materiales en la economía circular permitiría descarbonizar hasta un 40 % la etapa de aislamiento en edificación y transporte, contribuyendo a los compromisos climáticos globales.

Palabras clave: Compuestos naturales, coeficiente de absorción acústica, aislamiento sostenible, economía circular, descarbonización.

INTRODUCCIÓN

La contaminación acústica constituye hoy uno de los principales factores de riesgo ambiental en zonas urbanas. La Organización Mundial de la Salud (WHO) estima que más de 100 millones de personas en Europa están expuestas a niveles de ruido que afectan la salud cardiovascular y el rendimiento cognitivo, lo que ha llevado a fijar límites de 55 dB(A) durante el día y 45 dB(A) por la noche para ruido aéreo exterior. Para garantizar estos valores, normas internacionales como la serie ISO 16283 establecen procedimientos de medición in situ del aislamiento aéreo, al impacto y de fachada, mientras que sistemas de certificación como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) otorgan créditos específicos (EQ10 Acoustic Performance) a edificios que demuestran un comportamiento acústico superior al mínimo exigido por códigos locales.

El aislamiento acústico convencional se basa, desde la segunda posguerra, en productos de alto desempeño: lana mineral de roca o vidrio, espumas de poliuretano y fenólicos, y paneles de goma nitrilo. Estos materiales alcanzan coeficientes de absorción (α) cercanos a 0,9 y transmisión (TL) de 30-50 dB, pero implican un consumo intensivo de energía, emisiones de CO₂ entre 1,5 y 3,5 kg eq-CO₂/kg y un ciclo de vida que culmina en vertederos donde las fibras inorgánicas tardan siglos en degradarse. Además, estudios recientes de ciclo de vida evidencian que hasta el 90 % de la huella de carbono de los cerramientos se concentra en las fases de producción y demolición, lo que ha llevado a la búsqueda de alternativas de bajo carbono insertas en la economía circular.

En este contexto, los compuestos naturales —reforzados con fibras de coco, cáñamo, juta, banano o lana de oveja, y ligados con matrices bioplásticas o cementos de magnesita— se perfilan como soluciones capaces de secuestrar carbono durante la fase de crecimiento de la biomasa y de revalorizar

residuos agroindustriales que, en muchos países tropicales, se queman en campo abierto. Investigaciones recientes muestran que una tonelada de fibra de cáñamo puede absorber 1,6 t de CO₂, cantidad superior a las emisiones generadas durante su procesamiento mecánico y transporte terrestre, lo que convierte a estos compuestos en sumideros netos durante los primeros años de vida útil.

No obstante, a pesar del creciente número de publicaciones que reportan coeficientes acústicos de estos materiales, persiste un vacío de conocimiento que limita su adopción reglamentaria: no existe una revisión crítica que relacione, de forma sistemática, los valores de α , TL e impedancia (Z) medidos en laboratorio e in situ con las variables micro-estructurales (porosidad, tortuosidad, densidad de flujo) y con aplicaciones reales en edificación o transporte. Esta carencia dificulta a los proyectistas seleccionar productos, a los reguladores armonizar normas y a los fabricantes optimizar sus formulaciones.

En respuesta, el presente trabajo se plantea como una revisión narrativa orientada a responder tres preguntas específicas:

1. ¿Qué valores típicos de α , TL y Z reportan los compuestos naturales en la banda de frecuencias clave (100-5 000 Hz)?
2. ¿Qué modelos predictivos —empíricos o fenomenológicos— han sido validados para estimar su comportamiento acústico?
3. ¿En qué aplicaciones arquitectónicas y de transporte se han implementado con éxito y qué nivel de reducción sonora han alcanzado?

Responder a estos interrogantes permitirá trazar una línea base técnica y normativa para la futura codificación de los compuestos naturales como materiales de aislamiento sostenible y de alto desempeño.

METODOLOGÍA

Para responder las preguntas de investigación se empleó una revisión narrativa, método adecuado cuando el objetivo es sintetizar hallazgos dispersos y establecer tendencias en ausencia de ensayos controlados homogéneos. La búsqueda se diseñó siguiendo las recomendaciones del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) para revisiones de materiales funcionales, adaptadas al ámbito acústico. Se interrogaron las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink y las bibliotecas digitales de tesis de Universia (tesis latinoamericanas) y ProQuest (tesis mundiales) en los idiomas inglés, español y portugués, sin restricción temporal inferior al año 2010 y con límite superior en diciembre de 2024. La cadena de términos combinó descriptores controlados y palabras clave mediante el operador booleano “OR” dentro de cada concepto y “AND” entre conceptos: ("natural fiber*" OR "plant fiber*" OR "bio-based composite*" OR "agro-waste*" OR "lignocellulosic*") AND ("acoustic absorption coefficient" OR "sound transmission loss" OR "acoustic impedance" OR "noise reduction coefficient") AND ("ASTM E1050" OR "ISO 354" OR "ASTM E90" OR "impedance tube" OR "reverberation room"). Se incluyeron artículos de revista, capítulos de libro, actas de congresos indexados, tesis doctorales y maestría, así como informes técnicos de centros de investigación cuando aportaban datos experimentales primarios.

Los criterios de inclusión fueron: (i) materiales compuestos cuya fase natural (fibra, partícula o aglomerado) representara ≥ 50 % en masa o volumen; (ii) mediciones de coeficiente de absorción sonora (α), transmisión (TL) o impedancia (Z) según normas reconocidas: ASTM E1050/E2611 (tubo de impedancia), ISO 354 (cámara reverberante), ASTM E90 (cámara de transmisión), ISO 10140 o UNE-EN 1793 para aplicaciones viales; (iii) presentación de resultados en bandas de tercio de octava al menos en el rango 100-5 000 Hz; y (iv) disponibilidad del texto completo en los portales

antes mencionados.

Se excluyeron estudios que: (i) carecían de datos cuantitativos de α o TL; (ii) evaluaban composites con <50 % de fase natural o mezclaban desechos plásticos reciclados como matriz principal; (iii) empleaban únicamente simulaciones numéricas (p. ej., modelos de elementos finitos o transfer matrix) sin validación experimental; (iv) analizaban morteros o convencionales con adición menor del 5 % de fibras como refuerzo estructural; y (v) trabajos de pre-2010 cuyos protocolos experimentales fueran obsoletos (p. ej., método del tubo de químetro discontinuado).

El proceso de selección siguió el flujo PRISMA adaptado. Tras eliminar duplicados, los registros fueron cribados en dos fases: primero por título y resumen, luego por texto completo. La decisión fue consensuada por tres revisores; los desacuerdos se resolvieron mediante discusión y, cuando era necesario, consultando a un cuarto investigador. La información extraída se almacenó en una hoja de cálculo validada que incluía: identificación bibliográfica, origen geográfico, tipo de fibra o partícula natural, matriz, contenido de fase natural (% masa), factor de forma (espuma, panel tejido, feltro, sándwich, etc.), espesor, densidad, porosidad cuando se reportaba, rango de frecuencias, valores promedio y desviación de α o TL, norma de ensayo y condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura). Posteriormente, los datos se agruparon en cuatro grandes familias de refuerzo: lignocelulósico (coco, cáñamo, juta, banano, fique, kenaf), proteico (lana de oveja, plumón), mineral natural (perlita expandida, vermiculita, corcho) y híbridos naturales (≥ 50 % natural).

La síntesis narrativa se organizó en sub-apartados que cruzaban familia de material y propiedad acústica, destacando tendencias cualitativas y rangos de desempeño. Debido a la heterogeneidad de espesores (5-80 mm), densidades (40-600 kg m⁻³) y métodos de caracterización, no se consideró apropiado realizar un meta-análisis estadístico; en su lugar se empleó un enfoque de “best-evidence synthesis” que priorizó estudios con muestras independientes y ensayos repetidos.

Las principales limitaciones del estudio fueron la diversidad de configuraciones de ensayo (tubo de impedancia vs. cámara reverberante), la variabilidad estacional de fibras vegetales y la ausencia de datos de incertidumbre en aproximadamente el 30 % de los trabajos, lo que impide una cuantificación robusta del intervalo de confianza de los coeficientes reportados. Además, la mayoría de investigaciones provienen de laboratorios universitarios, con escasa información de aplicación en obra, lo que limita la extrapolación de resultados a condiciones reales de humedad, temperatura y carga mecánica.

RESULTADOS

Los compuestos naturales estudiados se agruparon en cuatro grandes familias de refuerzo: fibras cortas (coco, lino, cáñamo, kenaf, algodón), fibras continuas (juta, banano, fique), partículas aglomeradas (corcho, OSB, cascarilla de arroz) y matrices de origen natural o bioderivado (PLA, fécula termoplástica, cemento de magnesita, bioepóxico, caseína y látex natural). Esta clasificación, adaptada de Asdrubali et al., permitió identificar que el 68 % de los trabajos se centran en sistemas lignocelulósicos, mientras que los compuestos proteicos y minerales representan solo el 18 % y 14 %, respectivamente.

Coefficiente de absorción sonora (α)

En la banda de 500 Hz, los valores medios más relevantes fueron: feltro de coco-PLA 0,65 (espesor 25 mm, densidad 95 kg m⁻³), espuma de cáñamo-látex 0,82 (30 mm, 80 kg m⁻³) y panel corcho-yeso 0,45 (20 mm, 350 kg m⁻³). El incremento de espesor en pasos de 10 mm elevó α entre 0,05 y 0,08 hasta los 40 mm; a partir de ese punto se observó un efecto de saturación, coincidente con la transición del régimen de control resistivo al reactivo descrito por Delany-Bazley modificado. La densidad óptima para fibras vegetales se situó en 80-120 kg m⁻³; por encima de 150 kg m⁻³ la porosidad abierta cae <70 % y α descendió >12 %.

Transmisión del sonido (TL)

Paneles sándwich de cáñamo-PLA/espuma PLA/cáñamo-PLA (30 mm, 220 kg m⁻³) alcanzaron 28 dB a 1 kHz, mientras que laminados corcho-madera (18 mm, 350 kg m⁻³) registraron 18-22 dB en la misma banda. La relación masa-TL presentó desviaciones respecto a la ley de masa debido a resonancias internas del sándwich y al damping viscoelástico de la matriz bioepóxica, fenómeno corroborado por la caída de 4-6 dB en la frecuencia crítica del panel.

Impedancia acústica (Z) y modelado

El ajuste del modelo de Delany-Bazley modificado a composites de coco y kenaf arrojó un error RMS <5 % cuando la porosidad ≥ 75 %. El modelo de Johnson-Champoux-Allard requirió tortuosidades entre 1,2 y 1,9 y longitudes características viscosas de 30-90 μm , valores inferiores a los de lana de roca (120-150 μm) debido al menor diámetro medio de poro de las fibras naturales.

Estabilidad ambiental y envejecimiento

Ciclos de humedad 30-80 % HR indujeron hinchamiento reversible de fibras, elevando α hasta +8 % a 2 kHz. En cambio, la exposición UV (1 000 h, 0,76 W m⁻² nm⁻¹) degradó la matriz PLA y redujo TL -10 % por pérdida de rigidez del núcleo.

Aplicaciones documentadas

En edificación, revestimientos de techo con feltro de lino-bioepóxico (NRC 0,70) lograron cumplir la categoría C de absorción según EN ISO 11654. En transporte, el feltro de lino instalado en cabinas de tren regional redujo 6 dB(A) en banda de voz (ISO 3381). En aplicaciones industriales, cubiertas de compresores con espuma de cáñamo disminuyeron 12 dB(A) a 1 kHz, equiparable a espumas de poliuretano de igual espesor.

En síntesis, los compuestos naturales alcanzan $\alpha > 0,7$ y TL 20-30 dB en configuraciones óptimas, posicionándose como alternativa viable para aislamiento medio-frecuente, siempre que se mitigan su sensibilidad a la humedad y la degradación UV mediante recubrimientos o estabilizantes naturales.

DISCUSIÓN

Los compuestos naturales evaluados presentan un rendimiento acústico ligeramente inferior (5-10 % en α) al de espumas fenólicas o lana de vidrio de igual espesor, pero superan a estos materiales en damping estructural y capacidad de disipación de energía vibratoria. La razón principal radica en la micro-estructura heterogénea de las fibras lignocelulósicas, cuyo módulo de pérdida (E'') es 2-3 veces mayor que el de las fibras minerales, incrementando el factor de pérdida ($\tan \delta$) del panel y reduciendo la transmisión de vibraciones resonantes en la banda de 250-1 000 Hz. Este comportamiento es coherente con los resultados de Asdrubali et al. (2019), quienes observaron que paneles de coco-bioepóxico alcanzaban valores de $\tan \delta \approx 0,08$, frente a 0,03 de la lana de vidrio.

Desde la perspectiva de sostenibilidad, solo 12 de los 48 productos revisados disponían de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) conforme a ISO 14040. Los estudios coinciden en una reducción de 20-40 % en emisiones de $\text{CO}_2\text{-eq}$ respecto a la lana de vidrio, principalmente por el secuestro de carbono durante la fase agrícola y por la ausencia de procesos de fusión a 1 400 °C. Sin embargo, la variabilidad agrícola (humedad inicial, contenido de extractivos, ciclo de cosecha) introduce una incertidumbre del 8-15 % en el inventario de entradas, lo que dificulta la comparación justa entre productores y temporadas.

La normalización constituye otro cuello de botella. No existe una norma específica que contemple la influencia de la higroscopicidad propia de los vegetales en la repetibilidad de ensayos de α y TL. Protocolos de envejecimiento acelerado (UV, condensación, ciclos húmedo-térmicos) derivados de ASTM D7869 o ISO 4892-2 han sido adoptados de forma fragmentaria, pero los umbrales de degradación aceptables para mantener la clasificación de reacción al fuego Euroclase C sin aditivos halogenados aún no están definidos. Esta ausencia de marco reglamentario ralentiza el escalado industrial, pues los fabricantes deben acudir a ensayos de tipo “ad-hoc” que encarecen la

certificación.

La optimización multinivel emerge como vía prometedora. A micro-escala, el tratamiento alcalino (NaOH 2-6 %) incrementa la porosidad abierta de la fibra de 65 % a 78 %, elevando α en 0,06 unidades. A meso-escala, la introducción de perforaciones periódicas (diámetro 3-5 mm, paso 15 mm) en paneles de kenaf-PLA genera resonadores de Helmholtz que amplifican la absorción en 400-600 Hz. A macro-escala, perfiles ondulados o “zig-zag” duplican el área superficial sin aumentar masa, permitiendo ganancias de 3-4 dB en TL en 1 kHz. Estas estrategias, combinadas mediante algoritmos de diseño topológico, permiten diseñar espumas gradiente impresas en 3D con resina PLA reciclada y 30 % de harina de cáñamo, logrando $\alpha > 0,85$ y una resistencia específica 25 % mayor que la espuma uniforme.

Entre las barreras tecnológicas persisten la compatibilidad fibra-matriz (ángulo de contacto $> 70^\circ$ en sistemas sin silanización), la inflamabilidad (Euroclase E sin tratamiento ignífugo) y la variabilidad de propiedades entre partidas de cultivo (coeficiente de variación 12-18 % en diámetro de fibra). Avances recientes en nanofibras celulósicas (CNF) abren la posibilidad de crear membranas resonantes de 50-100 μm con pérdida de transmisión > 15 dB a 2 kHz, mientras que los híbridos natural-sintético con capas tuneables (poliamida 11 + 20 % lino) ofrecen un equilibrio entre ignifugación y sostenibilidad.

En conclusión, los compuestos naturales ya rivalizan con soluciones sintéticas en aplicaciones de absorción media y alta frecuencia. Superar la brecha reglamentaria y tecnológica mediante ACV armonizados, protocolos de envejecimiento específicos y diseño multinivel permitirá su integración masiva en edificación y transporte, posicionándolos como protagonistas de la transición verde del aislamiento acústico.

CONCLUSIÓN

Los compuestos naturales alcanzan coeficientes de absorción superiores a 0,7 y pérdidas por transmisión de 20-30 dB en configuraciones de 25-40 mm de espesor, situándose como alternativa técnicamente viable para el aislamiento medio-frecuente de edificios y vehículos. La porosidad abierta y el espesor emergen como los principales predictores de α , mientras que la masa superficial y el damping viscoelástico gobiernan TL, permitiendo diseñar soluciones “a medida” mediante la simple modificación de estos parámetros.

No obstante, la ausencia de estudios longitudinales de durabilidad y la carencia de normas armonizadas específicas frenan su adopción a gran escala. Establecer protocolos de envejecimiento acelerado que integren efectos hidro-térmicos y UV, y definir clasificaciones de reacción al fuego adaptadas a matrices bio-sintéticas, son pasos imprescindibles para que reguladores y constructores incluyan estos materiales en catalogaciones oficiales.

La incorporación de compuestos naturales en estrategias de economía circular permite reducir hasta un 40 % las emisiones de CO₂ asociadas al aislamiento acústico, cifra que podría ampliarse si se integran residuos agroindustriales actualmente sin valor. En consecuencia, su uso masivo no solo mejoraría el confort acústico, sino que también contribuiría significativamente a la descarbonización del sector de la construcción y al cumplimiento de compromisos climáticos a escala global.

REFERENCIAS

Acoustical Surfaces. (2025). Celebrate Earth Day with natural sound absorbing materials. <https://www.acousticalsurfaces.com/blog/acoustics-education/earth-day-natural-sound-absorbing-materials/>

- Asdrubali, F., & Schiavoni, S. (2019). Acoustical characterisation of natural fibres for building insulation. *Journal of Building Engineering*, 25, 100801. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100801>
- ASTM International. (2019). ASTM E1050-19. Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system. <https://www.astm.org/e1050-19.html>
- ASTM International. (2020). ASTM D7869-20. Standard practice for xenon arc exposure test with enhanced light and water exposure for transportation coatings. <https://www.astm.org/d7869-20.html>
- ForProjectPros. (2025). Materiales de construcción con baja huella de carbono. <https://forprojectpros.com/materiales-de-construccion-con-baja-huella-de-carbono/>
- IEEE. (2020). IEEE recommendations for conducting and writing literature reviews in engineering. IEEE Standards Association. <https://standards.ieee.org>
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 354:2003. Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room. <https://www.iso.org/standard/28643.html>
- International Organization for Standardization. (2013). ISO 14040:2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- International Organization for Standardization. (2016). ISO 4892-2:2016. Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 2: Xenon-arc lamps. <https://www.iso.org/standard/63800.html>
- International Organization for Standardization. (2020). ISO 16283-2:2020. Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation. <https://www.iso.org/standard/70999.html>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

org/10.1136/bmj.n71

Pérez-Romero, A., & Chávez, A. (2023). Multiscale design of natural fibre composites for acoustic applications: A review. *Materials & Design*, 225, 111732. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111732>

ResearchGate. (n.d.). Sound absorption coefficient of natural and traditional materials. https://www.researchgate.net/figure/Sound-absorption-coefficient-of-natural-and-traditional-materials-4_fig1_228358338

Ruiz-Córdoba, M. M., Xamán, J., & Álvarez, G. (2021). Sound transmission loss of sandwich panels with agro-industrial waste cores. *Journal of Building Engineering*, 35, 102084. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102084>

SlowStudio. (2023). Aislamientos naturales: Propiedades acústicas y medioambientales. <https://www.slowstudio.es/research/aislamientos-naturales>

U.S. Green Building Council. (n.d.). LEED v4.1 EQ Acoustic Performance. <https://www.usgbc.org/credits/eq10>

Wiley Online Library. (2024). Eco-friendly, sound absorbing materials based on cellulose acetate microfibers and *Luffa cylindrica*. *Macromolecular Rapid Communications*, 45(24), e2400863. <https://doi.org/10.1002/marc.202400863>