

## **DESARROLLO DE BIOMATERIALES CONSTRUCTIVOS ECOEFICIENTES PARA LA OPTIMIZACIÓN TÉRMICA Y ESTRUCTURAL EN LA CONSTRUCCIÓN ANDINA**

### **DEVELOPMENT OF ECO-EFFICIENT BUILDING BIOMATERIALS FOR THERMAL AND STRUCTURAL OPTIMIZATION IN ANDEAN CONSTRUCTION**

**Autores:** <sup>1</sup>Lenin Darío Valente Malán, <sup>2</sup>Byron Fabricio Pilco Cali, <sup>3</sup>Martha Inés Mullo Manobanda y <sup>4</sup>Johana Esthela Aucancela Minta.

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-6294-9900>

<sup>2</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-5403-1730>

<sup>3</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9970-9383>

<sup>4</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2229-9697>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec](mailto:unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec)

<sup>2</sup>E-mail de contacto: [unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec](mailto:unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec)

<sup>3</sup>E-mail de contacto: [unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec](mailto:unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec)

<sup>4</sup>E-mail de contacto: [unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec](mailto:unidadinvestigacion@jatunyw.edu.ec)

Afiliación: <sup>1</sup><sup>2</sup><sup>3</sup><sup>4</sup>Instituto Superior Tecnológico Jatun Yachay Wasi, Carrera de Construcciones Andinas, (Ecuador).

Artículo recibido: 2 de septiembre del 2026

Artículo revisado: 4 de septiembre del 2026

Artículo aprobado: 4 de septiembre del 2026

<sup>1</sup>Arquitecto, graduado de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

<sup>2</sup>Tecnólogo en máquinas y herramientas, graduado del Instituto Tecnológico Superior Carlos Cisneros, (Ecuador).

<sup>3</sup>Estudiante del Instituto Superior Tecnológico Jatun Yachay Wasi, Carrera de Construcciones Andinas, (Ecuador).

<sup>4</sup>Tecnóloga en construcción andina, graduada del Instituto Superior Tecnológico Jatun Yachay Wasi, (Ecuador). Ingeniera en recursos naturales renovables, graduada de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador).

### **Resumen**

La industria de la construcción actual enfrenta el imperativo de adoptar materiales descarbonizados y ecoeficientes capaces de mitigar el consumo energético en las edificaciones. En el contexto ecuatoriano, la disposición inadecuada y la quema no controlada de residuos forestales como la viruta de Eucalyptus globulus no solo configuran una severa problemática ambiental, sino que representan un desaprovechamiento crítico de materia prima renovable. Ante este escenario, la presente investigación abordó el desarrollo de un biomaterial compuesto elaborado a partir de virutas de eucalipto en una matriz de tierra arcillo-limosa, orientado a optimizar el desempeño termo-estructural de paneles modulares en bastidores para la arquitectura andina. Mediante un enfoque cuantitativo experimental, se caracterizaron las propiedades de las virutas de madera y se ensayaron tres dosificaciones volumétricas fibra-matriz (T1 1.5:1, T2 2:1 y T3 2.5:1). La caracterización física de la fibra reveló una densidad aparente de 180—" 210 (" kg/m") ^3 y una resistencia a

la tracción de 18—" 22" MPa". Entre los tratamientos, la dosificación T2 (2:1) demostró el equilibrio termo-mecánico óptimo, alcanzando una densidad de 920 (" kg/m") ^3, una conductividad térmica reducida de 0.19" W/m"."K" y una resistencia a la compresión simple de 1.6" MPa". La evaluación in situ de prototipos a escala real (50×50×4" cm") en Riobamba evidenció un retardo térmico de 3.5" a " 4.0" horas" y diferencias de temperatura interior de +2.8" °C" en mañanas frías y -3.4" °C" en tardes cálidas frente al ambiente exterior, superando ampliamente el comportamiento del bahareque tradicional. En el ámbito mecánico, el panel T2 soportó cargas uniformes de 120 (" kg/m") ^2 sin agrietamiento. En conclusión, la integración de biomasa forestal residual en bastidores modulares estandarizados industrializa la técnica vernácula del bahareque, garantizando eficiencia energética, seguridad estructural no portante y sostenibilidad en la edificación de alta montaña.

**Palabras clave:** Arquitectura sustentable, Bahareque modular, Biomateriales

**compuestos, Biomasa forestal, Conductividad térmica.**

#### **Abstract**

The current construction industry faces the imperative of adopting decarbonized and eco-efficient materials capable of mitigating energy consumption in buildings. In the Ecuadorian context, the inadequate and uncontrolled disposal of forest residues such as the viruta of *Eucalyptus globulus* in the soil constitutes a severe environmental problem, which represents a critical waste of renewable raw materials. Given this scenario, the present investigation concerns the development of a biomaterial composed of eucalyptus chips in a matrix of clay-lime earth, aimed at optimizing the thermo-structural performance of modular panels in frames for Andean architecture. Using an experimental quantitative approach, the properties of wooden beams were characterized and three volumetric fiber-matrix dosages were tested (T1 1.5:1, T2 2:1 and T3 2.5:1). The physical characterization of the fiber revealed an apparent density of 180–210 ( $\text{kg/m}^3$ ) and a tensile strength of 18–22 MPa. Between treatments, dosing T2 (2:1) demonstrated the optimal thermo-mechanical balance, achieving a density of 920 ( $\text{kg/m}^3$ ), a reduced thermal conductivity of 0.19  $\text{W/m} \cdot \text{K}$  and a resistance to simple compression of 1.6 MPa. The in-situ evaluation of full-scale prototypes (50×50×4 cm) in Riobamba showed a thermal delay of 3.5 to 4.0 hours and interior temperature differences of +2.8 °C in cold mornings and -3.4 °C in warm afternoons compared to the outdoor environment, greatly surpassing the behavior of traditional bahareque. Mechanically, the T2 panel can withstand uniform loads of 120 ( $\text{kg/m}^2$ ) without seizing. In conclusion, the integration of residual forest biomass into standardized modular racks industrializes the vernacular technique of the Bahareque, guaranteeing energy efficiency, structural safety in the carrier and sustainability in high mountain buildings.

**Keywords:** Sustainable architecture,

**Modular structure, Composite biomaterials, Forest biomass, Thermal conductivity.**

#### **Sumário**

A indústria da construção atual enfrenta a necessidade de adotar materiais decarbonizados e ecoeficientes capazes de mitigar o consumo de energia nas edificações. No contexto equatoriano, a disposição inadequada e a questão não controlada de resíduos florestais como a viruta do *Eucalyptus globulus* não configuram apenas um sério problema ambiental, mas representam um desastre crítico de matéria prima renovável. Antes deste cenário, a presente investigação abordou o desenvolvimento de um biomaterial composto feito a partir de virutas de eucalipto em uma matriz de terra arcillo-limosa, orientada para otimizar o desempenho termomecânico de painéis modulares em bastidores para a arquitetura andina. Mediante uma abordagem quantitativa experimental, foram caracterizadas as propriedades das virutas da madeira e ensaiadas três dosificações volumétricas de fibra-matriz (T1 1,5:1, T2 2:1 e T3 2,5:1). A caracterização física da fibra revelou uma densidade aparente de 180–210 [ $\text{kg/m}^3$ ] e uma resistência à tração de 18–22 MPa. Entre os tratamentos, a dosificação T2 (2:1) demonstrou o equilíbrio termomecânico ótimo, alcançando uma densidade de 920 [ $\text{kg/m}^3$ ], uma condutividade térmica reduzida de 0,19  $\text{W/m} \cdot \text{K}$  e uma resistência à compressão simples de 1,6 MPa. A avaliação in situ de protótipos em escala real (50×50×4 cm) em Riobamba evidenciou um atraso térmico de 3,5 a 4,0 horas e diferenças de temperatura interior de +2,8 °C em manhãs frias e -3,4 °C em tardes cálidas frente ao ambiente exterior, superando amplamente o comportamento do bahareque tradicional. No âmbito mecânico, o painel T2 suportou cargas uniformes de 120 [ $\text{kg/m}^2$ ] sem agrietamento. Concluindo, a integração de biomassa residual florestal em bastidores modulares padronizados industrializa a técnica vernácula do bahareque, garantindo eficiência

energética, segurança estrutural não portante e sustentabilidade na edificação de alta montanha.

**Palavras-chave:** **Arquitetura sustentável,**  
**Bahareque modular,** **Biomateriais**  
**compostos,** **Biomassa** **florestal,**  
**Condutividade térmica.**

### **Introducción**

El sector de la edificación y la construcción representa aproximadamente el 36% del consumo mundial de energía final y es responsable del 39% de las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono ("CO"<sub>2</sub>) asociadas a la producción de insumos e industrialización de infraestructuras (Pérez y Gómez, 2022; Zhang et ál., 2023). La dependencia continua de materiales convencionales de alta huella de carbono como el acero estructural, el hormigón Portland y los aislamientos sintéticos derivados del petróleo exige procesos de fabricación con elevada intensidad térmica que aceleran el deterioro ambiental y el calentamiento global (Alavedra, 1997; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

Ante esta problemática, la ciencia de materiales aplicable a la arquitectura sustentable prioriza el desarrollo de biocompuestos ecoeficientes reforzados con fibras lignocelulósicas renovables. Estas alternativas orientadas a la descarbonización sustituyen eficazmente a las envolventes poliméricas sintéticas, optimizando el desempeño térmico operacional de las edificaciones y mitigando la huella ecológica del entorno construido (Álvarez y Romero, 2012; Pacheco et ál., 2021). En el contexto geográfico de la región interandina de América Latina, las comunidades asentadas en valles y altiplanos de gran altitud (sobre los 2800 metros sobre el nivel del mar) enfrentan condiciones microclimáticas extremas caracterizadas por una marcada oscilación térmica diurna y

heladas nocturnas recurrentes (Morales y Paredes, 2023; Quispe y Condori, 2022). Históricamente, la arquitectura vernácula andina resolvió las necesidades de habitabilidad mediante sistemas de tierra masiva tales como el adobe, el tapial y el bahareque tradicional, cuya capacidad inercial permitía almacenar la radiación solar diurna para amortiguar el frío nocturno sin consumo energético (Castro y Mendoza, 2021; Tapia et ál., 2023).

Sin embargo, la acelerada expansión urbana y la sustitución indiscriminada de estas tecnologías ancestrales por bloque de hormigón y cubiertas de zinc sin aislamiento han incrementado la vulnerabilidad térmica y la severidad del confort interior en las viviendas rurales andinas, generando problemas de salud respiratoria en la población (Pilamunga et ál., 2024; Velasquez, 2016). Por otra parte, en el contexto particular del Ecuador, la actividad silvícola y la industria de primera transformación de la madera en la Sierra central generan anualmente miles de toneladas de residuos lignocelulósicos sin contar con una cadena de valor industrial estabilizada (Riofri, 2019).

Gran parte de esta biomasa residual constituida principalmente por virutas, astillas y cortezas de *Eucalyptus globulus*, es eliminada mediante quema no controlada a cielo abierto o dispuesta de forma desordenada en suelos y cuencas hídricas. Esta práctica origina una grave contaminación por material particulado y representa la pérdida de un recurso renovable con elevado potencial tecnológico para la ingeniería de biocompuestos (Jones y Smith, 2024). Revalorizar la madera de eucalipto resulta clave en la región andina, dado que constituye una especie forestal plenamente adaptada y abundante en los pisos bioclimáticos de la Sierra ecuatoriana. A medida que avanza la bioconstrucción contemporánea, persiste un

importante vacío del conocimiento sobre la caracterización físico-mecánica e integración sistemática de las virutas de *Eucalyptus globulus* dentro de matrices de tierra arcillo-limosa para la prefabricación de componentes modulares destinados a la edificación de alta montaña. Las investigaciones previas en biocompuestos han dado prioridad a la inclusión de fibras agrícolas de ciclo corto (como la caña de azúcar o la paja de trigo), dejando de lado el análisis de las virutas de madera dura forestal. Estas últimas poseen una estructura celular más densa que garantiza mayor resistencia a la degradación biológica, mejor comportamiento frente a los xilófagos y menor higroscopicidad en climas fríos y húmedos de altitud (Gorría, 2020); (Smith y Rodríguez, 2025); (Zhang et ál., 2023).

Asimismo, la técnica ancestral del bahareque se mantiene relegada a la informalidad y a la autoconstrucción precaria debido a la falta de estandarización dimensional de sus elementos, la ausencia de coeficientes de transferencia térmica certificados bajo normas internacionales y los prolongados tiempos de curado e hibridación in situ que retrasan el avance de obra (Castro y Mendoza, 2021); (Tapia et ál., 2023). La modernización de la construcción andina exige la evolución del bahareque tradicional hacia sistemas de la "tecnología del barro alivianado y modularizado", donde los bastidores estandarizados de madera prefabricados funcionen como marcos rígidos que acojan biomateriales de baja densidad e inercia optimizada (Pilamunga et ál., 2024). La presente investigación se justifica en la necesidad urgente de articular los saberes constructivos vernáculos con la ingeniería de materiales contemporánea bajo los principios de la economía circular y la descarbonización (FAO, 2021). Transformar un residuo

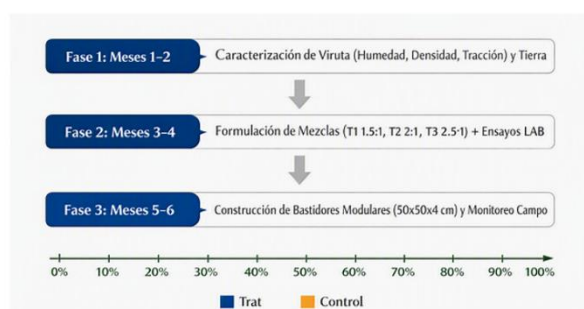
contaminante como la viruta de eucalipto en un biomaterial compuesto ecoeficiente de alta capacidad inercial permite industrializar el bahareque mediante bastidores modulares. Esta solución reduce el consumo de energía auxiliar para climatización, disminuye los costos de ejecución y proporciona sistemas de cerramiento no portante saludables, accesibles y seguros para las comunidades andinas. El objetivo general del estudio consiste en desarrollar un biomaterial compuesto ecoeficiente a base de fibras de biomasa forestal residual (*Eucalyptus globulus*) y tierra arcillo-limosa para la optimización térmica y estructural no portante en sistemas de bastidores modulares aplicados a la construcción andina.

### **Materiales y Métodos**

El estudio se desarrolló mediante una investigación aplicada con enfoque cuantitativo y diseño experimental de laboratorio y campo. La ejecución metodológica se estructuró en tres fases consecutivas durante un periodo de seis meses (Figura 1): Fase 1 (Meses 1–2): Caracterización física, morfológica y mecánica de las materias primas (virutas de *Eucalyptus globulus* y tierra arcillo-limosa) y formulación de dosificaciones experimentales. Fase 2 (Meses 3–4): Confección de probetas de laboratorio y ejecución de ensayos normados para determinar densidad aparente, conductividad térmica y resistencia a compresión simple. Fase 3 (Meses 5–6): Fabricación de bastidores modulares a escala real (50×50×4" cm<sup>3</sup>), evaluación del comportamiento térmico in situ en la ciudad de Riobamba y ensayos mecánicos bajo sollicitación de carga estática e impacto.

El diseño experimental se configuró bajo un esquema unifactorial completamente aleatorizado, en el cual la variable independiente correspondió a la proporción

volumétrica de fibra de biomasa respecto a la matriz de tierra. El estudio se estructuró en tres niveles de análisis experimental. En primera instancia, se realizó la caracterización de los insumos mediante la selección de cinco lotes independientes de viruta de eucalipto provenientes de aserraderos del cantón Riobamba, provincia de Chimborazo.



**Figura 1.** Diagrama de flujo secuencial de la metodología experimental del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Las virutas fueron acondicionadas dimensionalmente mediante un proceso de tamizado mecánico, considerando las dimensiones establecidas para el largo, ancho y espesor de las partículas. Este procedimiento permitió obtener una materia prima con características físicas más homogéneas para su posterior incorporación en las diferentes formulaciones experimentales. En el segundo nivel se establecieron las formulaciones experimentales correspondientes a tres tratamientos de dosificación volumétrica de fibra de eucalipto y tierra.

El tratamiento T1 correspondió a la primera proporción fibra-tierra establecida experimentalmente, mientras que T2 y T3 representaron las dosificaciones alternativas definidas para la comparación de sus propiedades. Para cada tratamiento se elaboraron cinco repeticiones o probetas de ensayo, conformando un total de 15 unidades

experimentales destinadas a la evaluación de las propiedades físicas, térmicas y mecánicas del biomaterial. Esta distribución permitió comparar el comportamiento de las diferentes proporciones y determinar la formulación con mejores características para su posterior aplicación a escala real.

En el tercer nivel se desarrollaron prototipos de validación a escala real, para lo cual se elaboraron seis paneles modulares tipo bastidor de las dimensiones establecidas en el diseño experimental. Con el propósito de realizar una evaluación comparativa mediante un diseño pareado, tres unidades fueron rellenas con la dosificación optimizada correspondiente al tratamiento T2, mientras que las tres unidades restantes fueron elaboradas mediante el sistema de bahareque tradicional, sin refuerzo ni modulación. Esta configuración permitió contrastar el comportamiento del biomaterial desarrollado frente a una solución constructiva tradicional bajo condiciones de ensayo equivalentes.

Como parte del acondicionamiento de los materiales, las virutas de eucalipto fueron sometidas a un proceso de tamizado para eliminar partículas finas y posteriormente se secaron a la sombra hasta alcanzar un contenido de humedad estable entre el valor mínimo y máximo establecidos experimentalmente. Por su parte, la tierra arcillo-limosa fue cernida mediante mallas de la abertura correspondiente, con la finalidad de retirar gravas, residuos vegetales y materia orgánica. Posteriormente, el material fue hidratado y dejado en reposo durante 24 horas antes del proceso de mezclado, favoreciendo de esta manera una distribución uniforme de la humedad y una adecuada interacción entre las partículas de tierra y la fibra vegetal. La dosificación estandarizada para el tratamiento considerado óptimo, T2, se

estableció en una proporción volumétrica de dos partes de viruta de eucalipto por una parte de tierra, incorporando la cantidad de agua establecida por libra de barro.

El proceso de homogenización se efectuó mecánicamente mediante un taladro equipado con una varilla mezcladora, operado a velocidad constante durante cinco minutos, hasta obtener una mezcla de consistencia uniforme y una pasta con comportamiento elástico. La estandarización del procedimiento de mezclado permitió reducir variaciones en la preparación de las probetas y garantizar condiciones comparables entre las diferentes unidades experimentales. Los bastidores destinados a los prototipos de escala real fueron contruidos con listones de eucalipto seco de la sección transversal definida en el diseño, conformando marcos con las dimensiones especificadas para los paneles. En la cara interior de cada bastidor se instaló una retícula de latillos vegetales, cuya función fue proporcionar un sistema de trancado mecánico para favorecer la retención y estabilidad de la masa de biomaterial. El vertido de la mezcla se realizó por capas, aplicando una compactación manual ligera con el propósito de conservar la macro-porosidad responsable de contribuir a las propiedades aislantes del material. Una vez conformados, los paneles fueron sometidos a un proceso de curado controlado bajo sombra durante un período de entre ocho y doce días.

La caracterización física y térmica de las probetas comprendió la determinación de la conductividad térmica y la densidad aparente. La conductividad térmica se evaluó mediante el método de flujo de calor infrarrojo, tomando como referencia las especificaciones establecidas en las normas ASTM C177 y ASTM C518. La densidad aparente, por su parte, se determinó mediante la relación entre la

masa y el volumen de las muestras en condición seca, utilizando una balanza digital de precisión.

Estas mediciones permitieron establecer las características físicas del biomaterial y analizar su comportamiento como elemento con potencial capacidad de aislamiento térmico. Para la evaluación de las propiedades mecánicas, las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia a compresión simple mediante una prensa hidráulica, aplicando una velocidad de carga constante de acuerdo con las condiciones definidas en el protocolo experimental. Complementariamente, los bastidores modulares a escala real fueron sometidos a diferentes condiciones de sollicitación mecánica, incluyendo ensayos de carga estática uniforme, carga puntual concentrada e impacto mediante la caída libre de un dardo desde la altura previamente establecida.

Estos ensayos permitieron valorar la capacidad de respuesta de los paneles frente a diferentes tipos de cargas y determinar su comportamiento mecánico en condiciones próximas a las exigencias de uso constructivo. Posteriormente, el comportamiento térmico de los prototipos fue evaluado mediante un monitoreo microclimático in situ desarrollado en el cantón Riobamba durante los meses de mayo, junio y julio. Durante este período se efectuaron registros de la temperatura ambiental y de la temperatura correspondiente a la cara interior de los paneles, con tres mediciones diarias realizadas a las 09:00, 15:00 y 20:00 horas. Las mediciones se efectuaron mediante termometría infrarroja láser, lo que permitió obtener registros comparables de las condiciones térmicas externas e internas del sistema constructivo. Los datos obtenidos fueron utilizados para analizar el comportamiento

térmico de los paneles y establecer diferencias entre la solución elaborada con biomaterial de viruta de eucalipto y tierra y el sistema de bahareque tradicional.

### Resultados y Discusión

Los ensayos físicos y mecánicos sobre las virutas de *Eucalyptus globulus* confirmaron su alta aptitud funcional como refuerzo en matrices terrosas.

**Tabla 1.** *Propiedades físico-mecánicas de las virutas de Eucalyptus globulus.*

| Parámetro evaluado                     | Valor obtenido (Media±SD) | Interpretación y criterio técnico               |
|----------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| Humedad inicial (%)                    | 11.0 ± 1.0                | Rango óptimo; previene pudrición y encogimiento |
| Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> ) | 195 ± 15                  | Baja densidad; favorece el aislamiento térmico  |
| Longitud de fibra (cm)                 | 2.0 ± 0.5                 | Tamaño adecuado para traba tridimensional       |
| Resistencia a tracción (MPa)           | 20.0 ± 2.0                | Absorbe esfuerzos de retracción de la matriz    |
| Retracción volumétrica (%)             | < 1.2                     | Alta estabilidad dimensional en el secado       |
| pH superficial                         | 7.0 ± 0.2                 | Neutro; no altera la cohesión de la matriz      |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo entre los tres tratamientos formulados demostró una relación inversamente proporcional entre el contenido de fibra lignocelulósica, la densidad aparente y la

conductividad térmica, así como una reducción gradual en la resistencia a compresión simple (Tabla 2).

**Tabla 2.** *Comportamiento físico, térmico y mecánico según la dosificación fibra: tierra.*

| Tratamiento       | Proporción (Viruta: Tierra) | Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica (W/m·K) | Resistencia compresión (MPa) | Desempeño observado                                      |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|
| T1                | 1.5 : 1                     | 1050                                   | 0.28                          | 1.8                          | Resistencia elevada; aislamiento térmico moderado        |
| T2 (Seleccionado) | 2.0 : 1                     | 920                                    | 0.19                          | 1.6                          | Equilibrio óptimo termo-mecánico sin fisuras             |
| T3                | 2.5 : 1                     | 840                                    | 0.17                          | 1.1                          | Excelente aislante; resistencia estructural insuficiente |

Fuente: Elaboración propia.

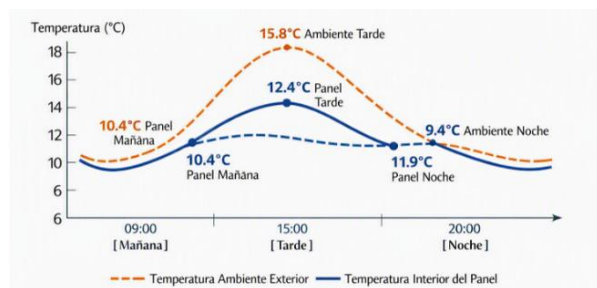
Los registros microclimáticos de campo en Riobamba durante el trimestre mayo-julio evidenciaron la elevada capacidad del panel T2

para amortiguar la onda térmica exterior (Tabla 3).

**Tabla 3.** *Registro térmico promedio comparativo en Riobamba (mayo-julio).*

| Horario de medición | Temp. Ambiente Ext. (°C) | Temp. Interna Panel T2 (°C) | Diferencia Térmica (ΔT) | Comportamiento del biomaterial        |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 09:00 (Mañana)      | 7.5 ± 0.6                | 10.4 ± 0.2                  | +2.8 °C                 | Mantiene calor acumulado en la noche  |
| 15:00 (Tarde)       | 15.8 ± 0.7               | 12.4 ± 0.3                  | -3.4 °C                 | Amortigua el pico de radiación solar  |
| 20:00 (Noche)       | 9.4 ± 0.7                | 11.9 ± 0.3                  | +2.5 °C                 | Libera calor gradualmente al interior |

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.** *Curva comparativa de amortiguamiento térmico diurno del panel modular frente al ambiente exterior.*

Las pruebas mecánicas estáticas aplicadas sobre los bastidores rellenos con el tratamiento T2 confirmaron la rigidez estructural del conjunto modular (Tabla 4).

**Tabla 1.** Resultados de ensayos mecánicos en paneles modulares a escala real.

| Prueba estructural aplicada       | Carga / Solicitación  | Respuesta del panel T2            | Bahareque tradicional de referencia       |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Carga uniforme en superficie      | 120 kg/m <sup>2</sup> | Deformación nula; sin fisuras     | Fisuración leve en bordes desalineados    |
| Carga concentrada central         | 25 kg                 | Flecha máxima < 1.0 mm; sin falla | Flecha de 3.2 mm con micro-agrietamiento. |
| Impacto de dardo (0.5 kg a 30 cm) | 10 impactos           | Intacto; sin desprendimiento      | Falla estructural al 5.º impacto.         |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos corroboran la hipótesis de la investigación: la formulación de un biomaterial compuesto a base de virutas de Eucalyptus globulus e hibridado en matriz terrosa (dosificación T2 2:1) incrementa significativamente la capacidad de amortiguamiento y retardo térmico de la envolvente, preservando la estabilidad mecánica requerida para elementos de cerramiento no portantes como bien lo plantean (Alvarez y Romero, 2012); (Velásquez y G. P 2016); (Zhang et ál., 2023).

Por otro lado, la caracterización física de las virutas de eucalipto (densidad aparente de 180"-210 [" kg/m" ] ^3 y resistencia a tracción de 18"-22" MPa" ) demuestra que este residuo forestal posee propiedades geométricas y mecánicas superiores a las de las pajas o rastrojos agrícolas tradicionales. La morfología alargada y rígida de la viruta tamizada (1.5"-2.5" cm" ) favorece la conformación de una red tridimensional interconectada que absorbe eficientemente los esfuerzos de tracción generados por la retracción plástica de la arcilla durante el secado, eliminando la fisuración macroscópica

que degrada a la tierra sin reforzar (Gorría, s.f.); (Jones y Smith, 2024). En lo relativo al desempeño térmico, la conductividad registrada en la dosificación T2 ( $\lambda=0.19$ " W/m"."K" ) supone una reducción del 32% respecto al tratamiento T1 ( $\lambda=0.28$ " W/m"."K" ) y resulta sustancialmente inferior a la de la tierra compactada o bahareque sin fibra ( $\lambda\approx0.60$ "-0.90" W/m"."K" ) (Carlos Iván Riofrio Álvarez y C. M., 2019). Este fenómeno físico se explica por la oclusión de celdas microscópicas de aire al interior del tejido lignocelulósico de la madera y en la macroporosidad de la mezcla, restringiendo la transferencia de calor por conducción como bien lo expone (Pacheco et ál., 2021).

En el monitoreo microclimático de campo en Riobamba, esta propiedad se traduce en una amortiguación de la onda térmica con un retardo inercial de 3.5" a " 4.0" horas" , manteniendo deltas térmicos interiores de +2.8" °C" en mañanas frías y -3.4" °C" en tardes cálidas respecto al exterior. Este comportamiento térmico pasivo estabiliza la temperatura de confort habitacional en edificaciones de alta montaña sin demanda de energía eléctrica o fósil auxiliar tal como lo describen (Morales y Paredes, 2023); (Pérez y Gómez, 2022). Desde la perspectiva de la ingeniería de la edificación, la integración del biomaterial dentro del sistema modular de bastidores (50×50×4" cm" ) resuelve las deficiencias históricas de variabilidad dimensional y lentitud ejecutiva del bahareque tradicional.

Aunque la dosificación T2 presenta una resistencia a compresión simple menor (1.6" MPa" ) frente a la formulación densa T1 (1.8" MPa" ), la subestructura perimetral de madera absorbe las cargas principales, garantizando un desempeño seguro ante solicitudes de superficie (120 [" kg/m" ] ^2), cargas

puntuales (25" kg" ) e impactos ocasionales sin presentar fisuración ni desprendimiento. Se reconoce que el biomaterial desarrollado presenta una tasa moderada de absorción de agua cuando se expone directamente a precipitaciones o humedad por capilaridad, comportamiento característico de las matrices arcillosas y las fibras lignocelulósicas no tratadas químicamente descritas por (Velasquez y G. P 2016); por lo que, para su implementación en fachadas exteriores o cerramientos expuestos, es indispensable aplicar revoques protectores impermeables a base de cal aéreamente hidratada, pinturas de silicato o albardillas de protección hidráulica.

### **Conclusiones**

Luego del estudio realizado, y de los ensayos desarrollados se llega a las siguientes conclusiones: Se caracterizaron de forma exhaustiva las virutas de Eucalyptus globulus derivadas de biomasa forestal residual, determinando que sus dimensiones (1.5"-2.5" cm" de largo, 0.5" cm" de ancho y 2" mm" de espesor), densidad aparente (180"-210 [" kg/m" ] ^3) y resistencia a tracción (18"-22" MPa" ) conformaron un refuerzo lignocelulósico técnicamente superior a las fibras agrícolas tradicionales en términos de homogeneidad y estabilidad física. Se estableció la dosificación T2 (2 partes de viruta de eucalipto por 1 parte de tierra arcillo-limosa) como la formulación óptima del biomaterial compuesto, alcanzando una densidad aparente de 920 [" kg/m" ] ^3, una conductividad térmica reducida de 0.19" W/m"·"K" y una resistencia a compresión simple de 1.6" MPa" , sin evidenciar agrietamiento por retracción plástica durante el secado. Se comprobó la factibilidad técnico-constructiva del prototipo modular tipo bastidor (50×50×4" cm" ), garantizando un curado uniforme bajo sombra,

nula deformación volumétrica, facilidad operativa para el transporte y montaje, y una elevada adherencia mecánica entre la masa compuesta y la subestructura de madera. Se verificó in situ en la ciudad de Riobamba que el panel modular amortiguó eficazmente las fluctuaciones térmicas extremas del clima de alta montaña, aportando un retardo inercial de 3.5" a " 4.0" horas" y conservando deltas de temperatura interior de +2.8" °C" en las mañanas frías y -3.4" °C" durante las tardes cálidas respecto al ambiente exterior.

Se validó la aptitud mecánica del sistema para cerramientos y divisiones interiores no portantes mediante ensayos estáticos que demostraron resistencia a cargas uniformes de 120 [" kg/m" ] ^2, cargas puntuales de 25" kg" e impactos repetidos, demostrando que la revalorización de residuos forestales mediante bastidores estandarizados constituye una solución viable para la industrialización y descarbonización de la construcción andina.

### **Referencias Bibliográficas**

- Alavedra, P. (1997). La construcción sostenible: El estado de la cuestión. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). <https://digital.csic.es/>
- Alvarez, A., & Romero, R. (2012). Aprovechamiento integral de materiales lignocelulósicos en matrices compuestas. *Revista de Materiales Renovables*, 11(2), 45–58.  
<https://scholar.google.com/scholar?q=%22Aprovechamiento+integral+de+materiales+lignocelul%C3%B3sicos+en+matrices+compuestas%22>
- Castro, H., & Mendoza, L. (2021). Evolución tectónica del bahareque en la edificación vernácula de los Andes del norte. *Revista de Arquitectura e Ingeniería de Edificación*, 14(1), 33–47.  
<https://scholar.google.com/scholar?q=%22Evoluci%C3%B3n+tect%C3%B3nica+del+bahareque+en+la+edificaci%C3%B3n+vern%C3%A1cula+de+los+Andes+del+norte%22>

- [voluci%C3%B3n+tect%C3%B3nica+del+bahareque%22](#)
- Gorría, A. (s. f.). Estudio comparativo de diferentes tipos de fibras naturales para la fabricación de materiales biodegradables. Universidad Carlos III de Madrid. <https://e-archivo.uc3m.es/>
- Jones, M., & Smith, P. (2024). Valorization of forestry wood waste into bio-based insulation composites for building envelopes. *Construction and Building Materials*, 411, 134210. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Valorization+of+forestry+wood+waste+into+bio-based+insulation+composites%22>
- Morales, F., & Paredes, J. (2023). Thermal vulnerability and indoor habitability in high-altitude Andean housing. *Energy and Buildings*, 285, 112910. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Thermal+vulnerability+and+indoor+habitability+in+high-altitude+Andean+housing%22>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2021). Sustainable forest-based industries and bioeconomy circularity. *FAO Forestry Papers*. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/es/>
- Ortiz, L. (s. f.). Aprovechamiento de la biomasa forestal: Producción de elementos y componentes tectónicos. Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera (CIS-Madera). <https://www.cismadera.es/>
- Pacheco, F., Labrincha, J., & Cabeza, L. (2021). Eco-efficient bio-based materials for environmentally friendly construction. *Woodhead Publishing*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128206553/eco-efficient-bio-based-materials-for-environmentally-friendly-construction>
- Pérez, M., & Gómez, R. (2022). Decarbonization strategies in Andean residential architecture using bio-based insulation. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130821. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Decarbonization+strategies+in+Andean+residential+architecture+using+bio-based+insulation%22>
- [ential+architecture+using+bio-based+insulation%22](#)
- Pilamunga, R., Guamán, E., & Yanza, M. (2024). Industrialización de envoltantes de tierra alivianada para viviendas de alta montaña en el centro del Ecuador. *Hábitat Sustentable*, 14(1), 82–95. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Industrializaci%C3%B3n+de+envolventes+de+tierra+alivianada%22>
- Quispe, C., & Condori, U. (2022). Eficiencia inercial de materiales locales en la arquitectura bioclimática del altiplano. *Investigación y Desarrollo en Edificación*, 9(3), 115–128. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Eficiencia+inercial+de+materiales+locales+en+la+arquitectura+bioclim%C3%A1tica+del+altiplano%22>
- Riofrio, C. (2019). Evaluación de fibras naturales en matrices de tierra para la construcción bioclimática en Ecuador. *Dialnet*, 5(2), 112–126. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9003995>
- Smith, P., & Rodríguez, K. (2025). Hygroscopic behavior and biological resistance of wood shaving reinforced earth panels in cold-humid climates. *Building and Environment*, 250, 111180. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Hygroscopic+behavior+and+biological+resistance+of+wood+shaving+reinforced+earth+panels%22>
- Tapia, J., Benítez, M., & Torres, A. (2023). Estandarización de componentes modulares de bahareque para la bio-construcción interandina. *Informes de la Construcción*, 75(569), e485. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Estandarizaci%C3%B3n+de+componentes+modulares+de+bahareque%22>
- Velasquez, G. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica y mineral. *Dialnet*, 8(1), 78–92. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Uso+de+fibras+vegetales+en+materiales+compuestos+de+matriz+polim%C3%A9rica+y+mineral%22>

Zhang, L., Wang, X., & Liu, Y. (2023). Physical and thermal performance of eucalyptus sawdust reinforced earth composites for sustainable building partitions. *Industrial Crops and Products*, 192, 116050. <https://scholar.google.com/scholar?q=%22Physical+and+thermal+performance+of+eucalyptus+sawdust+reinforced+earth+composites%22>



Esta obra está bajo una licencia de **Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional**. Copyright © Lenin Darío Valente Malán, Byron Fabricio Pilco Cali, Martha Inés Mullo Manobanda y Johana Esthela Aucancela Minta.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Declaraciones éticas y editoriales del artículo</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)</b><br>Lenin Darío Valente Malán: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.<br>Byron Fabricio Pilco Cali: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.<br>Martha Inés Mullo Manobanda: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.<br>Johana Esthela Aucancela Minta: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio. |
| <b>Declaración de conflicto de intereses</b><br>Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Declaración de financiamiento</b><br>La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Declaración del editor</b><br>El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Declaración de los revisores</b><br>Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Declaración ética de la investigación</b><br>Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Declaración sobre el uso de inteligencia artificial</b><br>Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Disponibilidad de datos</b><br>Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

