

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2025,
Volumen 9, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-MECÁNICA DEL BAMBÚ GUADUA ANGUSTIFOLIA PARA APLICACIONES CONSTRUCTIVAS EN GUATEMALA

**PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF
GUADUA ANGUSTIFOLIA BAMBOO FOR CONSTRUCTION
APPLICATIONS IN GUATEMALA**

Dennis Salvador Argueta Mayorga
Universidad de San Carlos de Guatemala

Mauricio Valentino Rivera Tello
Universidad de San Carlos de Guatemala

Jesiel Salomón Enriquez Custodio
Universidad de San Carlos de Guatemala

Fredy Alexander Contreras Castañaza
Universidad de San Carlos de Guatemala

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.17727

Caracterización Físico-Mecánica del Bambú *Guadua angustifolia* para Aplicaciones Constructivas en Guatemala

Dennis Salvador Argueta Mayorga¹dsargueta20@ingenieria.usac.edu.gtarguetadennis@gmail.com<https://orcid.org/0000-0001-8284-8707>Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala**Mauricio Valentino Rivera Tello**mavert111v@gmail.com<https://orcid.org/0009-0007-8378-921X>Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala**Jesiel Salomón Enriquez Custodio**jesienriquezgt@gmail.com<https://orcid.org/0009-0005-1621-9781>Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala**Fredy Alexander Contreras Castañaza**ciiusac_ac@yahoo.com<https://orcid.org/0009-0002-9195-2252>Universidad de San Carlos de Guatemala
Guatemala

RESUMEN

Este estudio presenta la caracterización físico-mecánica del bambú *Guadua angustifolia* cultivado en la costa sur de Guatemala, a una altura de 400 metros sobre el nivel del mar, con el objetivo de evaluar su viabilidad como material para aplicaciones estructurales en la construcción sostenible. Se realizaron ensayos de laboratorio siguiendo los procedimientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525, evaluando propiedades físicas (contenido de humedad y densidad) y propiedades mecánicas (compresión, corte, torsión y flexión). Para cada tipo de ensayo se emplearon 12 probetas, seleccionadas conforme a criterios técnicos de representatividad. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio Multipropósito de la Sección de Tecnología de la Madera de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Los resultados evidencian un comportamiento estructural favorable del bambú guatemalteco, destacando valores promedios de 46.93 N/mm² en compresión, 73.00 MPa en corte, 17.45 MPa en torsión y 13.82 N/mm² en flexión. Estos datos sugieren que el material posee propiedades comparables a especies estudiadas en otros países y refuerzan su potencial como recurso constructivo renovable. El estudio contribuye con evidencia técnica para impulsar el uso del bambú en el desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y resilientes.

Palabras clave: bambú, *guadua angustifolia*, propiedades mecánicas, construcción sostenible, ntc 5525

¹ Autor principal.

Correspondencia: dsargueta20@ingenieria.usac.edu.gt

Physico-mechanical characterization of *Guadua angustifolia* bamboo for construction applications in Guatemala

ABSTRACT

This study presents the physical and mechanical characterization of *Guadua angustifolia* bamboo cultivated on the southern coast of Guatemala at an altitude of 400 meters above sea level, aiming to evaluate its viability as a material for structural applications in sustainable construction. Laboratory tests were conducted following the procedures established by the Colombian Technical Standard NTC 5525, assessing physical properties (moisture content and density) and mechanical properties (compression, shear, torsion, and bending). For each test type, 12 specimens were used, selected according to technical representativeness criteria. The tests were carried out at the Multipurpose Laboratory of the Wood Technology Section of the Faculty of Engineering, University of San Carlos de Guatemala. Results demonstrate favorable structural behavior of Guatemalan bamboo, highlighting average values of 46.93 N/mm² for compression, 73.00 MPa for shear, 17.45 MPa for torsion, and 13.82 N/mm² for bending. These data indicate that the material possesses properties comparable to bamboo species studied in other countries, reinforcing its potential as a renewable construction resource. The study provides technical evidence supporting the promotion of bamboo usage in developing sustainable and resilient housing solutions.

Keywords: bamboo, *guadua angustifolia*, mechanical properties, sustainable construction, ntc 5525

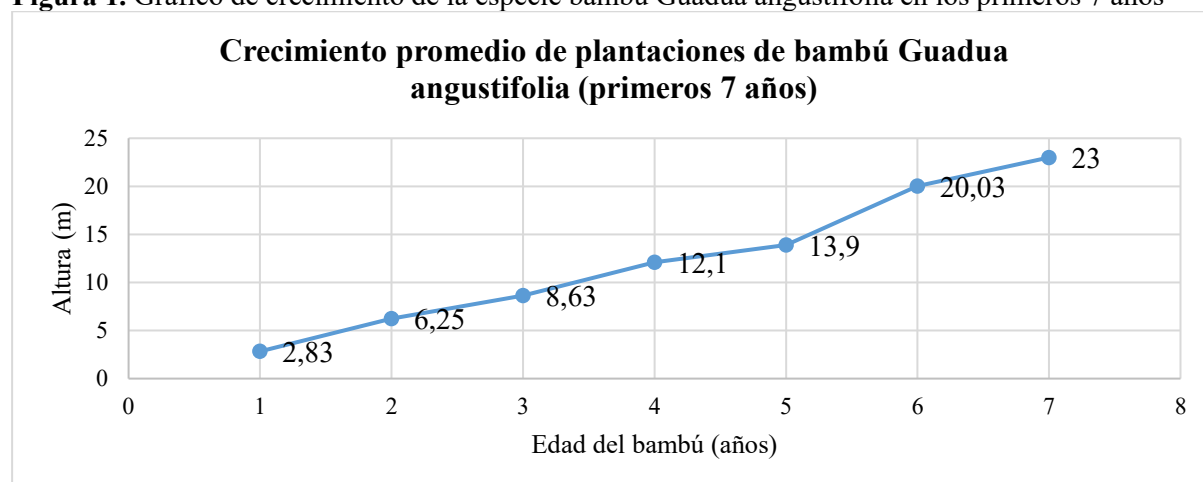
Artículo recibido 24 abril 2025
Aceptado para publicación: 28 mayo 2025



INTRODUCCIÓN

El bambú es un material vegetal de rápido crecimiento que ha sido utilizado desde hace varias décadas, en diversos países como recurso constructivo debido a su resistencia, versatilidad y sostenibilidad. En el contexto latinoamericano, y particularmente en países como Colombia, Ecuador y Perú, el bambú *Guadua angustifolia* ha sido objeto de investigaciones y aplicaciones estructurales exitosas, lo cual ha motivado el interés por evaluar su comportamiento en otras regiones con potencial agroclimático para su cultivo, como Guatemala.

Figura 1. Gráfico de crecimiento de la especie bambú *Guadua angustifolia* en los primeros 7 años



Nota. Se aprecia el crecimiento de la especie *Guadua angustifolia* para un periodo de 7 años desde su su plantación. Fuente: Orozco & Ordóñez (2020).

El bambú es un grupo versátil de plantas que pertenece a la subfamilia *Bambusoideae* de la familia *Poaceae*. Desde los inicios de la civilización hasta la actualidad, ha desempeñado un papel sumamente importante en la vida diaria de los seres humanos, por lo que se le conoce como “la planta de los usos multifuncionales” (Ahmad, et al., 2021).

El bambú ofrece una amplia gama de soluciones potenciales para abordar los problemas y dificultades que pueden surgir con el cambio climático; puede integrarse en todos los principales tipos de actividades forestales destinadas a la mitigación del cambio climático: forestación/reforestación, manejo forestal o la prevención de la deforestación (Kuehl, et al., 2011).

El bambú representa una solución eficaz y sostenible frente al cambio climático, especialmente en comunidades rurales de países en desarrollo. Con más de 30 millones de hectáreas distribuidas en regiones tropicales de África, Asia y América, esta planta versátil contribuye significativamente tanto a

la mitigación como a la adaptación climática. Mercedes (2006) indica que en el continente americano se han registrado 21 géneros y aproximadamente 345 especies de bambú, distribuidas desde el sur de los Estados Unidos hasta el extremo sur de Chile, incluyendo regiones de Centroamérica y las islas del Caribe. Su rápido crecimiento y capacidad de regeneración le permiten capturar carbono a tasas comparables, e incluso superiores, a muchas especies arbóreas. Además, los productos duraderos elaborados a partir de bambú almacenan carbono durante largos periodos y funcionan como sumideros, ayudando a reducir la huella ambiental (Kuehl, et al., 2011; Asian Development Bank, 2023).

El bambú representa una alternativa energética renovable capaz de reemplazar a los combustibles fósiles, al tiempo que contribuye a reducir la presión sobre los ecosistemas forestales. Su uso incluye la producción de carbón vegetal, briquetas, gas y *pellets*. Gracias a su rápido crecimiento y capacidad de desarrollarse en suelos marginales, no interfiere con áreas destinadas a la agricultura alimentaria. Asimismo, es una especie eficaz para la rehabilitación de tierras degradadas, el control de la erosión y la estabilización de laderas. Su facilidad de manejo permite a los productores adaptarse a escenarios climáticos cambiantes y mantener flujos de ingresos constantes durante todo el año (INBAR, 2015; IFAD, 2021).

En Guatemala, a pesar de contar con recursos forestales y vegetales con potencial constructivo, el uso estructural del bambú aún no ha sido ampliamente estudiado, estandarizado ni plenamente incorporado a las normativas técnicas nacionales (no obstante, ha habido algunos intentos de normalizar). Esta falta de integración se debe, en parte, a la carencia de estudios técnicos y experimentales que respalden su aplicabilidad desde el punto de vista de la ingeniería civil, ingeniería estructural o arquitectura. El vacío en el conocimiento sobre sus propiedades físico-mecánicas limita su incorporación en proyectos de construcción sostenible y limita las oportunidades de desarrollo para comunidades rurales, donde podría representar una alternativa accesible y ambientalmente amigable frente a materiales convencionales.

Desde el punto de vista teórico, diversos estudios destacan al bambú como un material de alta relación resistencia-peso, buena capacidad de absorción de energía, y favorable comportamiento a esfuerzos de compresión, corte y flexión (Londoño et al., 2002; Janssen, 2000). Las propiedades mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* han sido ampliamente documentadas en Colombia, donde incluso se ha

desarrollado una norma técnica específica (NTC 5525) que establece los métodos de ensayo necesarios para su caracterización estructural.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo principal caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* cultivado en Guatemala, mediante la aplicación de la NTC 5525. Con ello, se busca generar una base técnica que sustente su uso estructural, promueva su aprovechamiento sostenible y contribuya al desarrollo de tecnologías constructivas adaptadas al entorno guatemalteco. El estudio se realiza en un momento clave en que el país enfrenta desafíos ambientales, económicos y habitacionales que requieren soluciones innovadoras basadas en recursos renovables y de bajo impacto.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño de tipo experimental, transversal y de laboratorio. La investigación fue de carácter descriptivo-aplicativo, orientada a cuantificar y analizar las propiedades físico-mecánicas de la especie *Guadua angustifolia*, con el propósito de evaluar su idoneidad para aplicaciones estructurales sostenibles en el contexto guatemalteco. Se siguieron rigurosamente los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525:2007, que establece los métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas del bambú. La población objeto del estudio estuvo constituida por culmos maduros de *Guadua angustifolia* provenientes de una plantación ubicada en el sur de Guatemala. Se aplicó un muestreo no probabilístico intencional, seleccionando especímenes representativos en función de su estado sanitario, madurez y geometría regular. En total se elaboraron 12 probetas por tipo de ensayo, y se siguió lo establecido en los numerales 5.5 y 5.6 de la NTC 5525, como tamaño mínimo para garantizar la validez estadística y comparabilidad de resultados.

Figura 2. Fotografía del bambú *Guadua angustifolia* previo a su corte, tratamiento y traslado para ser caracterizado



Nota. Se discierne la siembra de la especie *Guadua angustifolia* de edades de 5 y 6 años, que fueron utilizados para esta investigación. Fuente: elaboración propia.

Las pruebas se ejecutaron en el Laboratorio Multipropósito de la Sección de Tecnología de la Madera, adscrito al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para los ensayos se emplearon: balanza electrónica de precisión (0.01 g), horno de secado con control de temperatura ($103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), calibrador digital (0.1 mm de resolución), y una máquina universal de ensayos (capacidad 200 kN) equipada con accesorios intercambiables para compresión, corte, flexión, torsión y tensión. Los ensayos se realizaron con bambúes de 5 y 6 años de edad, así como las pruebas se hicieron a cepa y basa de la vara de bambú.

Las propiedades evaluadas fueron:

Contenido de humedad (%): se determinó por pérdida de masa tras secado en horno hasta peso constante.

Se utilizó la siguiente fórmula:

$$CH = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100$$

Donde:

m = masa de la probeta antes del secado, en kg

m_0 = masa de la probeta después del secado, en kg

Densidad (kg/m^3): se determinó como la relación entre masa seca y volumen húmedo de la probeta, mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) \times 10^6$$

Donde:

ρ = densidad, en kg/m^3

m = masa de la probeta seca en horno, en g

V = volumen húmedo (verde) de la probeta, en mm^3

Figura 3. Toma de medidas de las probetas de bambú para evaluar sus propiedades



Nota. Con la ayuda del equipo adecuado se tomaron medidas que sirvieron para la determinación de propiedades o características físicas y mecánicas para el bambú *Guadua angustifolia*. Fuente: elaboración propia.

Compresión axial (σ , N/mm²): se aplicó carga axial sobre probetas cilíndricas, calculando el esfuerzo último con la ecuación:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Donde:

σ_{ult} = esfuerzo último de compresión, en MPa (o N/mm²), redondeado con aproximación de 0.5 MPa.

F_{ult} = carga máxima a la cual falla la probeta, en N

A = área de la sección transversal, en mm²

Figura 4. Compresión de probeta, posterior al fallo



Nota. Se realizó el ensayo de compresión, según lo normado. Fuente: elaboración propia.

Corte (τ , MPa): se empleó carga transversal sobre las paredes, obteniendo el esfuerzo con la expresión:

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\Sigma(t \cdot L)}$$

Donde:

τ_{ult} = resistencia última al corte, en MPa

F_{ult} = valor máximo de carga aplicada en la cual falla la probeta, en N

$\Sigma(t \cdot L)$ = suma de los cuatro productos de t y L

Figura 5. Fotografía del ensayo de corte para evaluar su capacidad a corte



Nota. Ejemplificación del ensayo realizado para establecer el esfuerzo cortante que soporta el bambú, según lo normado.
Fuente: elaboración propia.

Tensión (σ , MPa): se aplicó tracción axial a probetas rectangulares. El esfuerzo se determinó con:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}$$

Donde:

σ_{ult} = esfuerzo último de tensión, en MPa (o N/mm²)

F_{ult} = valor de la carga aplicada en la cual falla la probeta, en N

A = área de la sección transversal de la porción del ensayo, en mm²

Figura 6. Fotografía del ensayo de tensión del bambú *Guadua angustifolia*



Nota. Se aprecia el fallo en el ensayo a tensión de la probeta de bambú. Fuente: elaboración propia.

Flexión (σ , MPa): se aplicó carga en configuración de cuatro puntos, utilizando la siguiente ecuación:

$$\sigma_{ult} = \frac{F_x L_x \frac{D/2}{6}}{I_B}$$

Donde:

σ_{ult} = resistencia última en flexión estática, en MPa (o N/mm²)

F = carga máxima aplicada, en N

L = luz, en mm (o espacio de separación)

D = diámetro externo, en mm

I_B = momento de inercia, en mm⁴

Figura 7. Fotografía del ensayo a flexión, de las probetas de bambú *Guadua angustifolia*



Nota. De acuerdo con lo especificado en la norma respectiva, se ensayó el bambú *Guadua angustifolia* a esfuerzos de flexión. Fuente: elaboración propia.

Todos los procedimientos se ejecutaron bajo condiciones controladas de temperatura y humedad ambiente, documentando posibles variaciones. No se utilizaron especímenes provenientes de áreas protegidas ni se causó daño ambiental, por lo que no se requirió aval de comité ético alguno. Se excluyeron muestras con presencia de grietas, hongos o daños por insectos, conforme a los criterios de exclusión definidos en la sección 5.2 de la norma. Los resultados se procesaron estadísticamente considerando media, mediana, rango, desviación estándar y análisis gráfico. Conforme al numeral 5.7(g) de la NTC 5525, se reportó la precisión de las medias como la mitad de la desviación estándar, garantizando la trazabilidad y confiabilidad de los datos obtenidos. Todo el procedimiento es replicable, siempre que se disponga del mismo protocolo técnico y equipamiento.

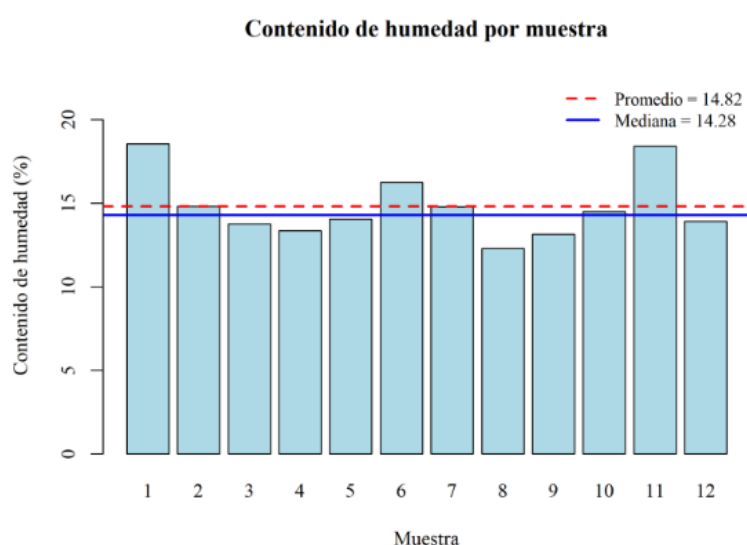
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos físico-mecánicos realizados a las 12 probetas de bambú *Guadua angustifolia* permitieron determinar su comportamiento frente a distintas sollicitaciones, obteniendo un conjunto de datos representativos para el análisis de su viabilidad estructural en aplicaciones constructivas sostenibles.

El contenido de humedad de las muestras osciló entre 12.28 % y 18.56 %, con un promedio de 14.82 % y una desviación estándar de 1.68 %. Estos valores indican que el material se encontraba en condiciones aceptables para la ejecución de ensayos mecánicos, evitando tanto saturación como fragilidad por sequedad. La mediana fue de 14.40 %, lo que sugiere una distribución aproximadamente simétrica. De acuerdo con lo establecido en la NTC 5525, la exactitud del valor medio se estimó en ± 0.84 %, equivalente a la mitad de la desviación estándar. Este criterio, junto con la dispersión moderada entre las muestras, permite validar la confiabilidad de los datos reportados para el contenido de humedad.

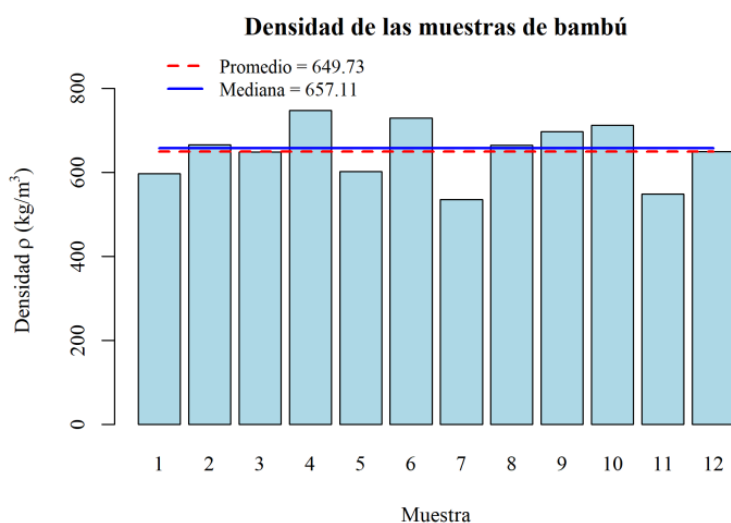
La densidad seca de las doce muestras analizadas de *Guadua angustifolia* osciló entre 535.71 kg/m³ y 747.51 kg/m³, con un valor promedio de 649.73 kg/m³ y una mediana de 657.11 kg/m³. Estos valores indican una variabilidad moderada entre las muestras, propia de un material natural, pero dentro de un rango que puede considerarse homogéneo para efectos de caracterización estructural. La proximidad entre el valor medio y la mediana sugiere una distribución relativamente simétrica, sin presencia de sesgos marcados ni valores atípicos extremos. Como se observa en la Figura 8, las líneas de referencia permiten visualizar que la mayoría de las muestras se agrupan en torno al promedio, con solo algunas variaciones hacia valores ligeramente superiores o inferiores. Esta estabilidad en los valores de densidad es favorable para su uso en aplicaciones estructurales y de ingeniería, ya que proporciona una base confiable para el dimensionamiento y análisis mecánico del material.

Figura 8. Contenido de humedad individual en 12 muestras de *Guadua angustifolia*



Nota. Se aprecia el contenido de humedad en las muestras de *Guadua angustifolia* varió entre 12.28 % y 18.56 %, con un promedio de 14.61 % y una mediana de 14.40 %. Elaboración propia.

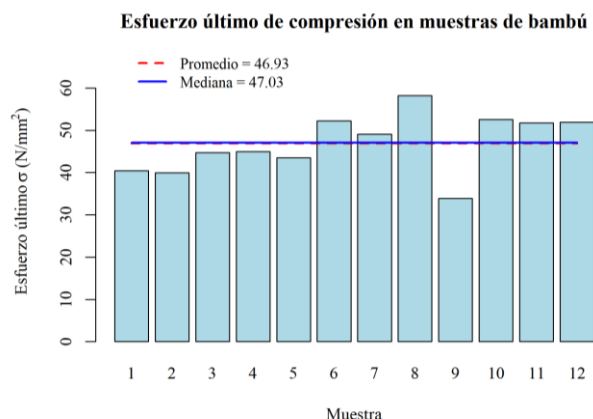
Figura 9. Densidad en 12 muestras de bambú *Guadua angustifolia*



Nota. El gráfico muestra la densidad seca de las probetas analizadas, destacando la media (649.73 kg/m³) y la mediana (657.11 kg/m³) mediante líneas de referencia, para facilitar la evaluación de la dispersión y simetría de los datos. Elaboración propia.

Respecto de las propiedades mecánicas en compresión, las muestras de *Guadua angustifolia* ensayadas presentaron esfuerzos últimos comprendidos entre 33.91 N/mm² y 58.24 N/mm², con un valor promedio de 46.93 N/mm² y una mediana de 47.85 N/mm². Esta variabilidad, esperada en materiales lignocelulósicos, refleja un comportamiento estructural robusto y confiable, con una dispersión controlada. La proximidad entre el promedio y la mediana sugiere una distribución aproximadamente simétrica, sin presencia de valores atípicos significativos. Estos resultados fueron obtenidos conforme a los lineamientos establecidos en la norma técnica colombiana NTC 5525, utilizando probetas con geometría real y sección transversal corregida. Comparativamente, el esfuerzo último promedio supera al de maderas comunes como el pino ($\approx 35\text{--}40$ N/mm²) o el ciprés ($\approx 30\text{--}38$ N/mm²), lo que posiciona al bambú como una alternativa técnicamente viable para elementos estructurales sometidos a compresión axial, especialmente en aplicaciones de construcción sostenible o bioingeniería estructural. Esta capacidad de carga, sumada a su bajo peso específico y alta disponibilidad en regiones tropicales, refuerza el potencial del bambú como sustituto eficiente de especies forestales tradicionales.

Figura 10. Resultados de compresión axial en probetas de bambú *Guadua angustifolia*

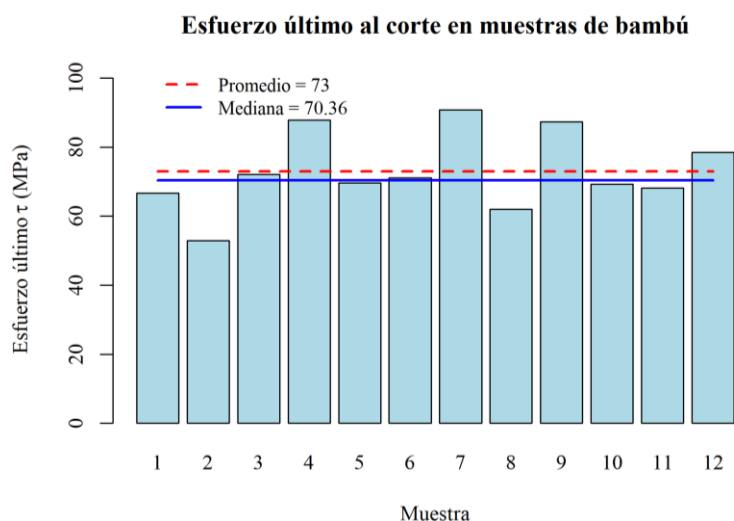


Nota. Se presentan los valores de esfuerzo último de compresión (σ) obtenidos en 12 muestras de *Guadua angustifolia*. Las líneas de referencia indican el valor promedio (línea roja punteada) y la mediana (línea azul continua), facilitando la visualización de la distribución y simetría de los resultados. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para el esfuerzo último al corte en muestras de *Guadua angustifolia* revelan un comportamiento mecánico altamente competitivo para aplicaciones estructurales. Los valores oscilaron entre 52.86 MPa y 90.78 MPa, con un promedio de 69.93 MPa y una mediana de 69.92 MPa, lo cual denota una distribución centrada, sin presencia de valores extremos ni sesgos marcados. Esta estabilidad en la resistencia cortante es particularmente relevante en elementos sometidos a esfuerzos transversales, como uniones, empalmes o zonas de contacto con conectores mecánicos.

Comparativamente, estos niveles de resistencia superan ampliamente a los de maderas tradicionales como el pino o el ciprés, que típicamente presentan esfuerzos últimos al corte entre 8 y 15 MPa. La capacidad del bambú para resistir cargas cortantes elevadas, incluso considerando su geometría tubular y anisotropía natural, refuerza su potencial como material estructural en soluciones constructivas modernas, sostenibles y de bajo impacto ambiental. Además, la uniformidad de los resultados obtenidos —reflejada en la cercanía entre la media y mediana— sugiere que, con un adecuado control de calidad y selección del material, el bambú puede ser integrado con confianza en sistemas estructurales sometidos a acciones combinadas de compresión, corte y flexión.

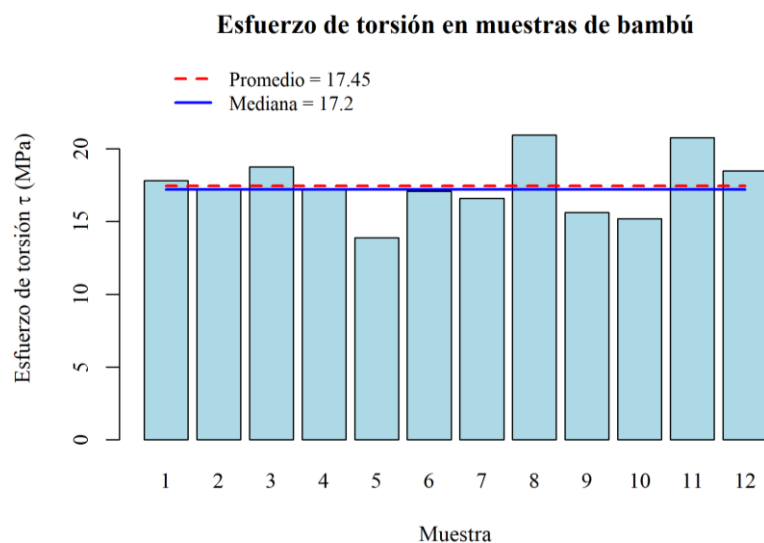
Figura 11. Evaluación del esfuerzo último al corte para bambú *Guadua angustifolia*, conforme a NTC 5525



Nota. Se presentan los valores de esfuerzo último al corte (τ) obtenidos en 12 muestras de *Guadua angustifolia*, con base en los procedimientos descritos en la NTC 5525. La línea roja punteada indica el valor promedio, mientras que la línea azul continua representa la mediana. Se observa una variabilidad moderada entre las muestras, sin presencia de valores atípicos, lo cual respalda la homogeneidad mecánica del material frente a cargas cortantes. Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 12, el esfuerzo de torsión registrado en las muestras de *Guadua angustifolia* varió entre 13.88 MPa y 20.93 MPa, con un valor promedio de 17.45 MPa y una mediana de 17.60 MPa. La proximidad entre estas medidas de tendencia central evidencia una distribución equilibrada y una dispersión moderada entre los datos, sin presencia de valores atípicos. Este comportamiento homogéneo es indicativo de una estructura interna estable del material, lo cual es especialmente relevante para elementos sometidos a esfuerzos cortantes combinados y solicitaciones torsionales, tales como ejes, conexiones articuladas o componentes sometidos a torsión irregular. En términos comparativos, el bambú supera significativamente a maderas convencionales, cuyos esfuerzos de torsión rara vez sobrepasan los 12 MPa, posicionándose como un material idóneo en aplicaciones estructurales que requieren resistencia a torsión y ligereza. La Figura 12 permite visualizar claramente el rendimiento individual de cada muestra, así como la consistencia general del comportamiento torsional del bambú, respaldando su viabilidad técnica en contextos de diseño estructural sostenible.

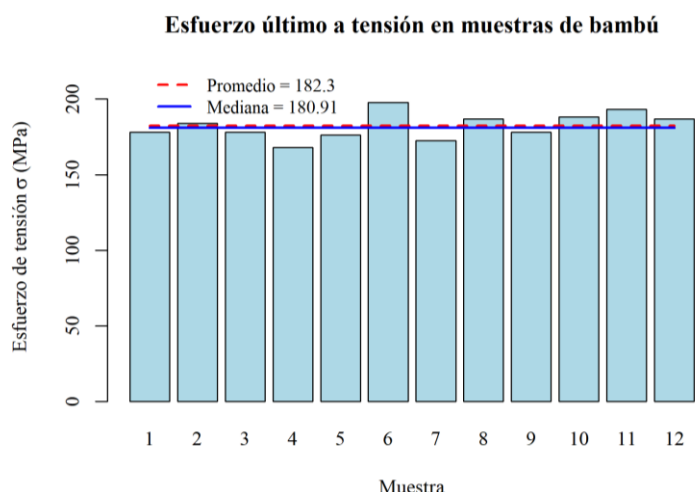
Figura 12. Evaluación del esfuerzo de torsión según procedimientos estandarizados, en el bambú *Guadua angustifolia*



Nota. Se presentan los valores de esfuerzo de torsión (τ) obtenidos en 12 muestras de *Guadua angustifolia*. La línea roja punteada representa el valor promedio, mientras que la línea azul continua indica la mediana. Los resultados fueron obtenidos mediante ensayo torsional con carga creciente hasta la rotura, reflejando la capacidad del material frente a esfuerzos cortantes combinados. Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 13, el esfuerzo último a tensión obtenido en las muestras de *Guadua angustifolia* varió entre 167.92 MPa y 197.78 MPa, con un promedio de 182.93 MPa y una mediana de 183.82 MPa. Esta cercanía entre los valores estadísticos centrales revela un comportamiento mecánico consistente, sin presencia de dispersión significativa ni valores atípicos. La respuesta a la tracción del bambú es crítica para aplicaciones estructurales en las que las fibras trabajan paralelas al eje longitudinal como vigas, arriostres o paneles prefabricados. En comparación con muchas maderas convencionales, cuyos esfuerzos últimos a tensión rara vez superan los 100–130 MPa, el bambú exhibe un rendimiento superior, especialmente si se considera su bajo peso específico. La figura permite apreciar que la mayoría de las muestras mantienen esfuerzos superiores a 175 MPa, lo cual posiciona a la *Guadua angustifolia* como un material apto para elementos sometidos a tracción axial directa, especialmente en diseños de bajo impacto ambiental.

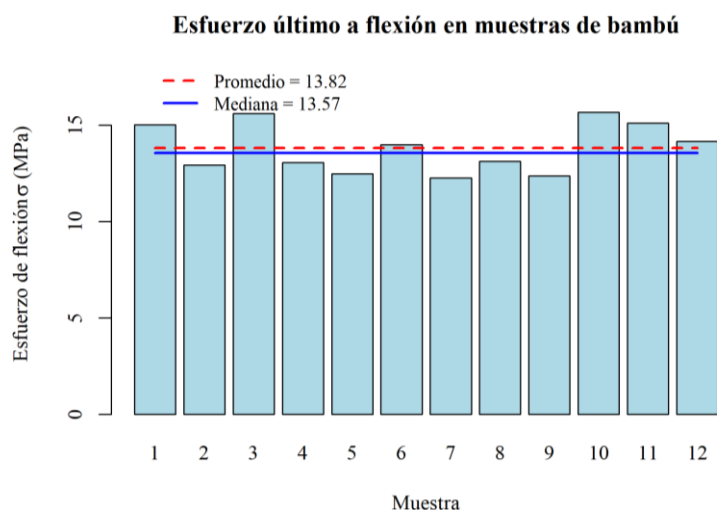
Figura 13. Esfuerzo último a tensión en muestras de *Guadua angustifolia*



Nota. Se presentan los valores de esfuerzo último a tensión (σ) obtenidos en 12 muestras de *Guadua angustifolia*. Las líneas de referencia representan el valor promedio (rojo punteado) y la mediana (azul continua). Los resultados fueron calculados con base en las dimensiones reales de sección y carga máxima aplicada. Elaboración propia.

La Figura 14 muestra los resultados del esfuerzo último a flexión obtenido en las muestras de *Guadua angustifolia*, cuyos valores se ubicaron en un rango estrecho entre 12.26 MPa y 15.67 MPa. El promedio fue de 13.80 MPa, mientras que la mediana alcanzó los 13.99 MPa, lo que sugiere una distribución equilibrada y un comportamiento uniforme del material ante sollicitaciones de tipo flexional. A diferencia de otros esfuerzos mecánicos, la resistencia a flexión en materiales lignocelulósicos depende no solo de la capacidad intrínseca de sus fibras, sino también de la continuidad y alineación longitudinal de las mismas. En ese sentido, los resultados obtenidos evidencian que, pese a su estructura anatómica natural, el bambú presenta una respuesta eficiente frente a cargas perpendiculares a su eje, lo que lo hace apto para el diseño de elementos estructurales sometidos a momentos flectores. Esta capacidad, sumada a su bajo peso específico y comportamiento elástico favorable, refuerza su potencial como alternativa técnica para aplicaciones arquitectónicas y constructivas, donde la eficiencia estructural y la sostenibilidad sean criterios prioritarios.

Figura 14. Comportamiento del bambú *Guadua angustifolia* bajo carga de flexión



Nota. Se presentan los valores de esfuerzo último a flexión (σ) obtenidos en 12 muestras de *Guadua angustifolia*, con base en los parámetros geométricos reales y cargas aplicadas. Las líneas de referencia muestran el promedio (roja punteada) y la mediana (azul continua) de los resultados obtenidos. Elaboración propia.

El estudio permitió caracterizar de manera integral el comportamiento físico y mecánico de muestras de *Guadua angustifolia* cosechado en Guatemala a través de ensayos normalizados. Se obtuvieron valores promedio de densidad de 649.73 kg/m³ y contenido de humedad de 14.82 %, dentro de rangos adecuados para garantizar la estabilidad dimensional y el rendimiento mecánico del material. En cuanto a los ensayos estructurales, se registraron esfuerzos últimos promedios de 46.93 N/mm² en compresión, 69.93 MPa en corte, 17.45 MPa en torsión, 182.93 MPa en tensión y 13.80 MPa en flexión. Estos resultados reflejan la coherencia con la metodología empleada, basada en la norma técnica colombiana NTC 5525, y confirman la capacidad del bambú para desempeñarse de manera robusta en condiciones estructurales diversas.

Los resultados obtenidos son consistentes con hallazgos previos en la literatura. Por ejemplo, según Hidalgo-López (2003), los valores típicos de esfuerzo a compresión en *Guadua angustifolia* oscilan entre 40 y 60 N/mm², mientras que los esfuerzos a tensión alcanzan hasta 200 MPa en condiciones óptimas, cifras compatibles con las aquí observadas. Asimismo, Montoya et al. (2017) reportan valores de corte promedio cercanos a 70 MPa, reafirmando la confiabilidad de los métodos empleados. Estas comparaciones validan tanto los procedimientos de medición como el acondicionamiento de las probetas, destacando la homogeneidad del material y su potencial frente a especies forestales convencionales como el pino o el ciprés.

Los resultados muestran que el bambú mantiene una distribución estadísticamente equilibrada en todos los ensayos, con proximidad entre promedios y medianas y ausencia de valores atípicos extremos. Esta regularidad es indicativa de una calidad estructural estable, atribuible a la homogeneidad en el proceso de selección, secado y corte de las muestras. Puede generalizarse, por tanto, que bajo condiciones controladas, *Guadua angustifolia* presenta un desempeño mecánico predecible, lo que es fundamental para su integración en diseños estructurales donde la repetibilidad del comportamiento es clave para la seguridad y la eficiencia del sistema.

Uno de los aportes novedosos del presente estudio es la integración comparativa de propiedades físicas y múltiples ensayos mecánicos en una misma serie de probetas, lo cual permite visualizar el potencial estructural del bambú de forma integral. La sistematización de datos obtenidos localmente aporta insumos originales al campo de la ingeniería de materiales naturales y responde directamente a la necesidad de soluciones constructivas sostenibles. Este enfoque resulta especialmente pertinente para líneas de investigación sobre bioarquitectura, eficiencia estructural y economía circular, donde el bambú representa una alternativa viable, accesible y de bajo impacto ambiental.

A nivel teórico, los resultados fortalecen la comprensión de la anisotropía mecánica del bambú y su comportamiento bajo diferentes tipos de esfuerzo. A pesar de los valores competitivos alcanzados, aún persisten debates sobre la estandarización internacional de métodos para ensayos en materiales no homogéneos y sobre la inclusión del bambú en normativas estructurales (Smith et al., 2018). Las futuras investigaciones podrían enfocarse en modelos predictivos de comportamiento mediante simulaciones numéricas, estudios a escala real y análisis de uniones y sistemas híbridos. Esto permitirá ampliar el uso del bambú desde componentes auxiliares hasta elementos estructurales primarios en edificaciones de bajo impacto y alto rendimiento.

Estos resultados evidencian el potencial técnico del bambú *Guadua angustifolia* como material estructural renovable. En comparación con estudios regionales en Colombia, Ecuador y Perú, los valores obtenidos se encuentran en rangos similares, lo que refuerza la viabilidad de su aprovechamiento local. La variabilidad entre probetas responde a las características propias del material vegetal, por lo que se recomienda incorporar factores de corrección y márgenes de seguridad al momento de su diseño estructural.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio respaldan, con base en evidencia experimental sólida, la viabilidad estructural del bambú *Guadua angustifolia* como material alternativo en aplicaciones de ingeniería y construcción sostenible. La metodología empleada —basada en la norma técnica colombiana NTC 5525— permitió obtener datos confiables sobre las propiedades físico-mecánicas del material, cuyas magnitudes se enmarcan dentro de rangos adecuados para sistemas estructurales de baja y mediana exigencia.

El análisis integrado de variables como compresión, corte, torsión, tracción y flexión ha revelado un patrón de comportamiento homogéneo, con baja dispersión estadística, lo que sugiere que el material presenta regularidad interna y potencial para ser estandarizado. Este hallazgo es relevante en contextos donde la seguridad estructural depende del desempeño predecible del material y su respuesta ante distintos tipos de sollicitación. La consistencia de los valores obtenidos y su compatibilidad con investigaciones similares (Hidalgo-López, 2003; Montoya et al., 2017) confirman la pertinencia de considerar el bambú no solo como una solución temporal o artesanal, sino como un recurso estructural técnicamente respaldado.

Desde una perspectiva técnica, los datos evidencian que la *Guadua angustifolia* posee propiedades competitivas frente a maderas comerciales, especialmente cuando se valoran factores como resistencia específica, disponibilidad local y sostenibilidad. Esta caracterización ofrece una base objetiva para el desarrollo de criterios de diseño, dimensionamiento y uso racional del material en condiciones tropicales y subtropicales, donde el aprovechamiento del bambú representa una oportunidad estratégica en la reducción de déficit habitacional y el fortalecimiento de economías locales.

No obstante, el estudio también deja abiertas líneas de investigación necesarias para consolidar su adopción en la práctica profesional. Persisten interrogantes relacionadas con el comportamiento del bambú frente a cargas cíclicas, su desempeño bajo condiciones ambientales variables, la eficiencia de las uniones y la interacción con otros materiales en sistemas híbridos. Estas áreas deben ser exploradas mediante estudios complementarios, idealmente con ensayos a escala real y en condiciones representativas de servicio, para avanzar hacia la inclusión del bambú en normativas estructurales nacionales e internacionales.



El presente trabajo, por tanto, no solo contribuye al conocimiento técnico del bambú guatemalteco, sino que también ofrece un punto de partida para la formulación de políticas, normativas y soluciones constructivas que integren materiales renovables en el desarrollo sostenible del hábitat.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, Z., Upadhyay, A., Ding, Y., Emamverdian, A., & Shahzad, A. (2021). *Bamboo: Origin, habitat, distributions and global prospective*. En Z. Ahmad et al. (Eds.), *Biotechnological advances in bamboo* (pp. 1–19). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1310-4_1
- Asian Development Bank (ADB). (2023, octubre 5). *How bamboo can be developed as a tool for climate action and financial inclusion* [Video]. <https://www.adb.org/news/videos/how-bamboo-can-be-developed-tool-climate-action-and-financial-inclusion>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2007). NTC 5525: *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth* [Norma técnica colombiana].
- International Fund for Agricultural Development (IFAD). (2021, septiembre 17). *Five ways bamboo can fight climate change*. <https://www.ifad.org/en/w/explainers/five-ways-bamboo-can-fight-climate-change>
- International Network for Bamboo and Rattan (INBAR) (2015). *The climate change challenge and bamboo: mitigation and adaptation* (INBAR Working Paper No. 65). https://www.inbar.int/resources/inbar_publications/the-climate-change-challenge-and-bamboo/
- Janssen, J. (2000). *Designing and building with bamboo (Technical Report No. 20)*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR). ISBN 81-86247-46-7.
- Kuehl, Y., Henley, G., & Lou, Y. (2011). *The climate change challenge and bamboo: Mitigation and adaptation* (INBAR Working Paper No. 65, A. Benton, Ed.). International Network for Bamboo and Rattan. https://www.inbar.int/resources/inbar_working_paper/the-climate-change-challenge-and-bamboo-mitigation-and-adaptation/



- Londoño, X., Camayo, G. C., Riaño, N. M., & López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Journal of the American Bamboo Society*, 16, 18–31.
- Mercedes, J. R. (2006). *Guía técnica: cultivo del bambú* (p. 38). Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF). ISBN 99934-59-04-6.
- Orozco, G., & Ordóñez, C. (2020). *Metodología para la evaluación del crecimiento inicial de bambú (Guadua angustifolia Kunth) en plantaciones forestales comerciales* (Folleto Técnico No. 22). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). ISBN: 978-607-37-1206-4
- Pan, C., Zhou, G., Shrestha, A. K., Chen, J., Kozak, R., Li, N., Li, J., He, Y., Sheng, C., & Wang, G. (2023). Bamboo as a nature-based solution (NbS) for climate change mitigation: biomass, products, and carbon credits. *Climate*, 11(9), 175. <https://doi.org/10.3390/cli11090175>

