

Desempeño mecánico de una columna de Guadua bajo diferentes tratamientos

Mechanical performance of a Guadua column under different treatments

Jorge José Arroyo Orozco

Universidad de Guayaquil
jorge.arroyoo@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4785-368X>
Guayas - Ecuador

David Omar Stay Coello

Universidad de Guayaquil
david.stayc@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3471-9932>
Guayas – Ecuador

Sulay Jamileth Cordova Navarrete

Universidad de Guayaquil
sulay.cordovanav@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-8384-9220>
Guayas – Ecuador

Gerandy Andrei Cruz Calderón

Universidad de Guayaquil
gerandy.cruzcal@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-8211-5591>
Guayas - Ecuador

Formato de citación APA

Arroyo, J., Stay, D., Cordova, S. & Cruz, G. (2026).
Desempeño mecánico de una columna de Guadua bajo
diferentes tratamientos. Revista REG, Vol. 5 (Nº. 1), p.
372 – 394.

CIENCIA INTERACTIVA

Vol. 5 (Nº. 1). Enero – marzo 2026.

ISSN: 3073-1259

Fecha de recepción: 15-01-2026

Fecha de aceptación :26-01-2026

Fecha de publicación:30-03-2026



RESUMEN

La *Guadua angustifolia* es un recurso estructural renovable con alto potencial en sistemas portantes; sin embargo, su variabilidad y la influencia del tratamiento previo siguen siendo factores críticos para su especificación en diseño. Este estudio evaluó el desempeño mecánico de culmos de guadua sometidos a cuatro condiciones de tratamiento: inmersión en agua dulce, secado al aire libre, secado en horno e inmersión en cal, mediante ensayos de compresión y flexión en probetas seleccionadas. Se desarrolló un análisis estadístico (media, dispersión y percentiles) orientado a obtener parámetros representativos para uso estructural. En compresión, el secado al aire libre presentó la mayor resistencia media (366.6 kg/cm^2), seguido por el tratamiento con cal (323.7 kg/cm^2), horno (304.6 kg/cm^2) e inmersión en agua (293.2 kg/cm^2). En flexión, el secado en horno alcanzó el mayor esfuerzo medio (87.2 kg/cm^2), seguido por el secado al aire libre (81.4 kg/cm^2), el tratamiento con cal (79.0 kg/cm^2) y el tratamiento en agua (64.8 kg/cm^2). Para fines de diseño, se calcularon valores característicos (percentil 5%) en compresión, obteniéndose $f_{0.05}$ de 121.9 kg/cm^2 (agua), 174.4 kg/cm^2 (horno), 101.8 kg/cm^2 (aire) y 188.9 kg/cm^2 (cal), evidenciando mejoras en la confiabilidad resistente con tratamientos que estabilizan el material. En conjunto, los resultados confirman que el tratamiento previo modifica de forma significativa la respuesta mecánica de la guadua, por lo que su especificación debe considerar no solo resistencias medias, sino también valores característicos para un diseño estructural más seguro.

PALABRAS CLAVE: *Guadua angustifolia*, bambú estructural, compresión, flexión, tratamientos de preservación, resistencia

ABSTRACT

Guadua angustifolia is a renewable structural resource with high potential for load-bearing systems; however, its inherent variability and the influence of prior treatment remain critical factors for design specification. This study evaluated the mechanical performance of guadua culms subjected to four treatment conditions: fresh-water immersion, air drying, oven drying, and lime immersion, through compression and flexural tests on selected specimens. A statistical analysis (mean, dispersion, and percentiles) was conducted to obtain representative parameters for structural applications. In compression, air drying exhibited the highest mean strength (366.6 kg/cm²), followed by lime treatment (323.7 kg/cm²), oven drying (304.6 kg/cm²), and water immersion (293.2 kg/cm²). In flexure, oven drying achieved the highest mean stress (87.2 kg/cm²), followed by air drying (81.4 kg/cm²), lime treatment (79.0 kg/cm²), and water treatment (64.8 kg/cm²). For design purposes, characteristic compressive values (5th percentile) were calculated, obtaining $f_{0.05}$ values of 121.9 kg/cm² (water), 174.4 kg/cm² (oven), 101.8 kg/cm² (air), and 188.9 kg/cm² (lime), demonstrating improved strength reliability with treatments that stabilize the material. Overall, the results confirm that prior treatment significantly modifies the mechanical response of guadua; therefore, its specification should consider not only mean strengths but also characteristic values to ensure safer structural design.

KEYWORDS: *Guadua angustifolia*, structural bamboo, compression, flexure, preservation treatments, strength.

INTRODUCCIÓN

El uso de materiales estructurales renovables se consolida como una alternativa técnica y ambientalmente viable frente a los sistemas constructivos convencionales. El bambú, particularmente la *Guadua angustifolia*, se reconoce como un material de alto desempeño mecánico, rápido crecimiento y baja huella ambiental, lo que ha motivado su incorporación progresiva en soluciones estructurales, en países tropicales y subtropicales (Ghavami, 2005; Janssen, 2000).

La guadua presenta una elevada relación resistencia–peso, comportamiento eficiente en elementos sometidos a compresión y flexión, y una respuesta dúctil frente a cargas dinámicas, lo que la posiciona como un material competitivo para sistemas portantes ligeros (Adier et al., 2023; Londoño, 2007; Padilla et al., 2024). No obstante, su naturaleza biológica introduce una variabilidad inherente, asociada a factores como edad del culmo, contenido de humedad, método de secado y tratamiento previo, los cuales influyen de manera directa en su desempeño mecánico y durabilidad (Janssen, 2000; Wang et al., 2013).

En el ámbito del diseño estructural, uno de los principales desafíos radica en la estandarización de parámetros resistentes confiables para la guadua, especialmente bajo estados de carga combinados. Estudios previos evidencian que los tratamientos de preservación y secado pueden modificar significativamente la resistencia a compresión y flexión, afectando tanto los valores medios como los característicos necesarios para un diseño seguro (Adier et al., 2023; ISO, 2019).

En los últimos cinco años, la investigación sobre bambú estructural ha experimentado un crecimiento significativo, con énfasis en la caracterización mecánica, la confiabilidad estructural y la estandarización de parámetros para diseño. Estudios recientes han analizado el comportamiento del bambú bajo distintos estados de carga, destacando la influencia del tratamiento, el contenido de humedad y la variabilidad natural del material en su desempeño estructural (Sharma et al., 2015; Van der Lugt et al., 2020). Asimismo, investigaciones experimentales recientes han confirmado que el uso de valores característicos y enfoques probabilistas resulta más adecuado para materiales naturales como la *Guadua angustifolia*, al permitir una mejor gestión de la incertidumbre en aplicaciones estructurales (Zheng et al., 2023; Zhong et al., 2014). De manera complementaria, trabajos actuales han explorado el potencial del bambú en sistemas estructurales innovadores y compuestos, reforzando su viabilidad como material sostenible para la ingeniería civil contemporánea (Kelkar et al., 2023).

La presente investigación se desarrolla en el marco de un proyecto de investigación institucional (FCI) de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, de la Universidad de Guayaquil, orientado al diseño de una columna estructural compuesta de bambú y policarbonato, concebida como una solución innovadora y sostenible para aplicaciones estructurales ligeras. Por lo que, el estudio de las propiedades mecánicas de la *Guadua angustifolia* constituye la fase inicial y fundamental del proyecto, ya que la caracterización confiable del material base es indispensable para la evaluación del desempeño estructural del sistema compuesto.

A pesar de los avances experimentales, persiste una brecha en la comparación sistemática del desempeño mecánico de la guadua sometida a distintos tratamientos, evaluada bajo criterios estadísticos orientados al diseño estructural. Esta limitación restringe su aplicación normativa y su integración en sistemas estructurales compuestos, constituyendo el problema científico general que fundamenta el presente trabajo.

En este marco, el objetivo principal de este estudio es evaluar el desempeño mecánico de columnas de *Guadua angustifolia* sometidas a diferentes tratamientos, mediante ensayos de compresión y flexión, y determinar parámetros resistentes representativos que sirvan de base para el desarrollo y diseño de columnas estructurales compuestas.

MÉTODOS MATERIALES

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo experimental, con un diseño no probabilístico y controlado, orientado a la evaluación del desempeño mecánico de columnas de *Guadua angustifolia* sometidas a diferentes tratamientos. El estudio respondió a un paradigma positivista, dado que se basó en la medición directa de variables mecánicas mediante ensayos normalizados y en el análisis estadístico de los resultados obtenidos.

El diseño experimental se estructuró para permitir la comparación sistemática entre grupos de especímenes sometidos a distintos tratamientos, manteniendo constantes las condiciones geométricas, el procedimiento de ensayo y los criterios de medición. Este enfoque permitió identificar la influencia del tratamiento previo sobre el comportamiento mecánico de la guadua bajo estados de compresión y flexión, en concordancia con metodologías reportadas en la literatura especializada (Adier et al., 2023; Janssen, 2000).

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de suelos y materiales “Dr. Ing. Arnaldo Ruffilli”, de la Universidad de Guayaquil, equipado con máquinas de ensayo universal, dispositivos de medición de carga y deformación, y herramientas auxiliares para el acondicionamiento de

probetas. Los ensayos experimentales se realizaron durante el período comprendido entre octubre de 2024 y marzo de 2025, incluyendo las fases de selección del material, aplicación de tratamientos, acondicionamiento, ejecución de ensayos y procesamiento de datos. Las condiciones ambientales del laboratorio se mantuvieron controladas durante la etapa de ensayo, con el fin de reducir la influencia de variables externas como temperatura y humedad relativa, siguiendo recomendaciones para ensayos de materiales lignocelulósicos (ISO, 2019).

El material objeto de estudio correspondió a culmos de *Guadua angustifolia* Kunth, seleccionados por su uso extendido en aplicaciones estructurales en la región y por su disponibilidad como recurso local renovable. Los culmos se obtuvieron de plantaciones con características homogéneas, seleccionándose ejemplares maduros, con edades comprendidas entre 2 y 3 años, en concordancia con estudios que señalan que la madurez influye significativamente en las propiedades mecánicas del bambú (Wang et al., 2013). Los culmos fueron inspeccionados visualmente para descartar defectos evidentes, tales como fisuras longitudinales severas, ataques biológicos avanzados o deformaciones excesivas. Posteriormente, se cortaron segmentos rectos para la fabricación de las probetas, cuidando que los nudos se distribuyeran de forma representativa y consistente entre los grupos experimentales.

Figura 1. Proceso de corte de muestras



Fuente: Autores (2025)

Figura 2. Caracterización de muestras de guadua



Fuente: Autores (2025)

El muestreo se realizó mediante un criterio intencional, seleccionando especímenes que cumplieran condiciones geométricas y visuales similares, con el objetivo de reducir la dispersión atribuible a factores no controlados. La serie estudiada se conformó por un total de 240 probetas, distribuidas en cuatro grupos según el tratamiento aplicado:

1. Inmersión en agua dulce (60 probetas)
2. Secado al aire libre (60 probetas)
3. Secado en horno (60 probetas)
4. Inmersión en cal (60 probetas)

Cada grupo incluyó un número equivalente de especímenes, lo que permitió realizar comparaciones estadísticas directas entre tratamientos. Las dimensiones geométricas de las probetas se midieron antes de los ensayos, registrándose el diámetro externo, el espesor de pared y la longitud efectiva, parámetros necesarios para el cálculo de esfuerzos.

Figura 3. Selección de probetas



Fuente: Autores (2025)

Tratamientos aplicados a la guadua

Inmersión en agua dulce

Las probetas correspondientes a este tratamiento se sumergieron completamente en agua dulce durante un período de 4 semanas, con el objetivo de evaluar el efecto del incremento de humedad y la lixiviación de azúcares solubles sobre el comportamiento mecánico. Finalizado el período de inmersión, las probetas se dejaron escurrir y se ensayaron en condición húmeda controlada, siguiendo procedimientos similares a los descritos por Janssen (2000).

Figura 4. Tratamiento en agua dulce



Fuente: Autores (2025)

Secado al aire libre

El secado al aire libre se realizó colocando las probetas en un ambiente ventilado, protegidas de la radiación solar directa y de la lluvia, durante un período de 6 semanas. Este método representó una práctica tradicional ampliamente utilizada en el acondicionamiento de guadua para aplicaciones estructurales. Durante el proceso se controló visualmente la aparición de fisuras y deformaciones.

Figura 5. Tratamiento secado al aire libre



Fuente: Autores (2025)

Secado en horno

Las probetas asignadas a este tratamiento se introdujeron en un horno de secado, donde se mantuvieron a una temperatura controlada de 150 °C durante 20 minutos, hasta alcanzar un contenido de humedad estable. Este procedimiento permitió evaluar el efecto de un secado acelerado y controlado sobre la resistencia mecánica, tal como se ha analizado en estudios previos sobre bambú estructural (Adier et al., 2023).

Figura 6. Secado al horno



Fuente: Autores (2025)

Inmersión en cal

El tratamiento con cal consistió en la inmersión de las probetas en una solución de cal durante un período de 5 días, con el propósito de mejorar la durabilidad y evaluar su influencia en la respuesta mecánica. Este método ha sido reportado como una alternativa de preservación tradicional que puede modificar la rigidez y resistencia del material (Wang et al., 2013).

Figura 7. Inmersión en cal



Fuente: Autores (2025)

Figura 8. Muestras post tratamiento de inmersión en cal



Fuente: Autores (2025)

Variables estudiadas

Las variables independientes del estudio correspondieron al **tipo de tratamiento aplicado** a la guadua. Las variables dependientes incluyeron:

- Esfuerzo máximo a compresión
- Esfuerzo máximo a flexión
- Comportamiento de falla observado

Como variables de control se consideraron las dimensiones geométricas de las probetas, el procedimiento de ensayo y las condiciones ambientales durante la ejecución de los ensayos.

Ensayo de compresión

Los ensayos de compresión se realizaron aplicando carga axial creciente hasta la falla del espécimen, utilizando una máquina de ensayo universal. La carga se aplicó de forma monotónica y controlada, registrándose la carga máxima alcanzada. El esfuerzo de compresión se calculó como la relación entre la carga máxima y el área transversal efectiva del culmo, siguiendo criterios empleados en normas internacionales para bambú estructural (ISO, 2019).

Figura 9. Ensayo a la compresión



Fuente: Autores (2025)

Ensayo a la flexión

El comportamiento a la flexión se evaluó mediante un esquema de viga soportada en dos puntos de apoyo y aplicando una carga puntual en la mitad del vano entre apoyos, que generó esfuerzos por momento flector. Este tipo de ensayo permitió representar condiciones más cercanas a las solicitaciones reales de columnas estructurales. Se registraron los valores de carga máxima y se analizaron los esfuerzos generados en el material a la falla por flexión. Se consideró el momento de

Inercia de cada culmo y los modelos de falla observados en cada espécimen para seleccionar datos válidos para el análisis de resultados.

Figura 10. Ensayo a la flexión



Fuente: Autores (2025)

Recolección y procesamiento de datos

Los datos experimentales se registraron en fichas de laboratorio y posteriormente se sistematizaron en hojas de cálculo para su análisis. Para cada grupo experimental se determinaron valores medios, desviación estándar y coeficientes de variación. Adicionalmente, se calcularon valores característicos correspondientes al percentil 5%, con el fin de obtener parámetros representativos para diseño estructural, siguiendo recomendaciones de diseño basadas en resistencia característica (ISO, 2019).

Control del contenido de humedad y acondicionamiento previo

Previo a la ejecución de los ensayos mecánicos, se realizó el control del contenido de humedad de las probetas, dado que este parámetro influye de manera directa en el comportamiento mecánico del bambú. Diversos estudios han demostrado que, variaciones en la humedad afectan significativamente la rigidez, la resistencia y los mecanismos de falla del material (Salinas et al., 2025).

Las probetas fueron acondicionadas en laboratorio hasta alcanzar un estado de equilibrio higroscópico con el ambiente, registrándose la masa antes y después del acondicionamiento. Este procedimiento permitió reducir la dispersión asociada a diferencias extremas de humedad entre

especímenes y asegurar condiciones comparables entre los distintos tratamientos, en concordancia con las recomendaciones establecidas en la norma ISO 22157:2019 (2019)

Caracterización geométrica detallada de las probetas

La caracterización geométrica de las probetas incluyó la medición del diámetro externo, el diámetro interno y el espesor promedio de pared, considerando la geometría irregular típica de los culmos de *Guadua angustifolia*. Estas mediciones se realizaron en tres secciones a lo largo de cada probeta, obteniéndose valores promedio utilizados para el cálculo del área resistente efectiva.

La variabilidad geométrica del bambú constituye una de las principales fuentes de dispersión en los resultados experimentales, por lo que la medición sistemática de estas variables resulta esencial para la reproducibilidad de los ensayos (Padilla et al., 2024).

Justificación de la edad y selección del material

La selección de culmos con edades comprendidas entre 2 y 3 años respondió a evidencia experimental que indica que, en este rango, la *Guadua angustifolia* presenta un balance adecuado entre resistencia mecánica y estabilidad dimensional. Investigaciones actuales han confirmado que culmos demasiado jóvenes presentan menor densidad y resistencia, mientras que culmos envejecidos tienden a desarrollar defectos internos que afectan negativamente su desempeño estructural (Adier et al., 2023; Padilla et al., 2024).

Configuración del ensayo de compresión

El ensayo de compresión se configuró de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ISO 22157:2019, adaptando el procedimiento a la geometría tubular de la guadua. Las probetas se colocaron centradas en la máquina de ensayo universal, garantizando la alineación axial para minimizar efectos de excentricidad no deseados.

La carga se aplicó de forma continua y controlada hasta la falla, registrándose la carga máxima soportada. Este procedimiento permitió evaluar la capacidad portante bajo compresión pura, condición fundamental para el análisis de columnas estructurales. Estudios recientes han utilizado configuraciones similares para caracterizar la resistencia a compresión del bambú, destacando la importancia del alineamiento y la velocidad de carga en la obtención de resultados confiables.

Configuración del ensayo de flexión

El ensayo de flexión se diseñó para reproducir condiciones de solicitación representativas de elementos estructurales sometidos a momentos flectores. La carga se aplicó de manera controlada,

registrándose la fuerza máxima alcanzada antes de la falla. Este tipo de ensayo permitió analizar la respuesta del material frente a solicitaciones más complejas que las de compresión pura.

El comportamiento a flexión del bambú es altamente sensible al tratamiento previo y al contenido de humedad, lo que justifica su inclusión como ensayo complementario en estudios de caracterización estructural.

Registro de modos de falla

Durante la ejecución de los ensayos, se documentaron los modos de falla observados en cada probeta, mediante registros fotográficos y notas descriptivas. La identificación de mecanismos de falla, tales como fisuración longitudinal, aplastamiento local o inestabilidad por pandeo, permitió complementar los resultados cuantitativos con información cualitativa relevante.

El análisis de los modos de falla constituye una herramienta clave para comprender la interacción entre la microestructura del bambú y las solicitaciones mecánicas aplicadas (Adier et al., 2023).

Análisis estadístico y confiabilidad estructural

El procesamiento de los datos experimentales incluyó el cálculo de estadísticos descriptivos (media, desviación estándar y coeficiente de variación) y la determinación de valores característicos de resistencia correspondientes al percentil 5%. Este enfoque se alineó con los principios de diseño estructural basados en confiabilidad, ampliamente recomendados para materiales naturales con alta variabilidad, como el bambú (ISO, 2019).

Estudios recientes han señalado que el uso de valores característicos permite una mejor gestión de la incertidumbre inherente al material, favoreciendo diseños más seguros y consistentes en aplicaciones estructurales (Zheng et al., 2023).

Adicionalmente, el enfoque estadístico adoptado se alineó con investigaciones recientes que recomiendan la utilización de parámetros característicos y métodos probabilísticos para materiales con comportamiento mecánico variable. En particular, la aplicación de modelos estadísticos orientados a confiabilidad permite reducir la incertidumbre asociada a materiales naturales y mejorar la toma de decisiones en el diseño estructural. En este contexto, el uso de percentiles bajos como base para la definición de valores resistentes resulta coherente con enfoques modernos de seguridad estructural, especialmente en elementos sometidos a compresión y flexión. Este criterio metodológico ha sido respaldado por investigaciones que destacan la necesidad de vincular resultados experimentales con parámetros de diseño confiables, garantizando una aplicación estructural más segura y consistente del material (Salinas et al., 2025).

Relevancia metodológica para sistemas estructurales compuestos

La metodología adoptada en esta investigación se concibió como una fase preparatoria para el desarrollo de sistemas estructurales compuestos de bambú y policarbonato. La caracterización mecánica detallada de la *Guadua angustifolia* permitió establecer parámetros base confiables, indispensables para la evaluación de la interacción mecánica entre materiales en etapas posteriores del proyecto.

Investigaciones recientes sobre bambú estructural y materiales compuestos han destacado la necesidad de contar con propiedades mecánicas bien caracterizadas del material base antes de su integración en sistemas híbridos (Adier et al., 2023; Kelkar et al., 2023).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados de los ensayos de compresión

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión paralela a las fibras que conforman los culmos de caña guadua ensayados, se organizaron según el tipo de tratamiento aplicado a las probetas de *Guadua angustifolia*. En la Tabla 1 se presentan los valores individuales y estadísticos de resistencia máxima a compresión para cada grupo experimental, incluyendo el valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 1. Resultado del ensayo de compresión según tratamiento

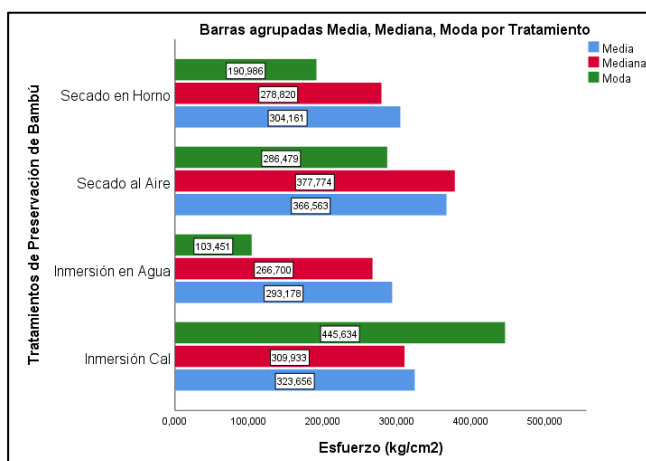
Tratamiento aplicado	Resistencia media a compresión (kg/cm ²)	Desviación Estándar a Resistencia compresión (kg/cm ²)	Percentil 5%, P _{0,05} Resistencia a compresión (kg/cm ²)
Inmersión en agua	293.2	125.9	121.9
Secado al aire libre	366.6	186.6	101.8
Secado en horno	304.6	127.8	174.4
Inmersión en cal	323.7	109.2	188.9

Fuente: Autores (2025)

Las probetas sometidas a secado al aire libre registraron los valores más altos de resistencia promedio a compresión, alcanzando un valor medio de 366.6 kg/cm². El grupo tratado mediante inmersión en cal presentó un valor medio de 323.7 kg/cm², seguido por las probetas secadas en horno, con 304.6 kg/cm². Los valores más bajos correspondieron al grupo sometido a inmersión en agua dulce, con una resistencia media de 293.2 kg/cm².

La dispersión de los resultados mostró diferencias entre tratamientos. El coeficiente de variación fue mayor en las probetas tratadas con secado al aire libre (CV=50.9%), mientras que el tratamiento con cal presentó una menor variabilidad relativa (CV=33.7%), evidenciando un comportamiento más uniforme dentro de cada grupo de 30 datos.

Figura 11. Gráfico comparativo de resistencia media a compresión por tratamiento



Fuente: Autores (2025)

En la Figura 11 se representó gráficamente la comparación de los valores medios de resistencia a compresión para los cuatro tratamientos evaluados, permitiendo visualizar de manera directa las diferencias entre los grupos experimentales.

Resultados de los ensayos a la flexión

Los resultados correspondientes a los ensayos a la flexión se resumieron en la Tabla 2, donde se reportaron los esfuerzos máximos alcanzados por las probetas bajo carga axial excéntrica, así como los parámetros estadísticos asociados.

Tabla 2. Resultado del ensayo a la flexión según tratamiento

Tratamiento aplicado	Resistencia media En flexión (kg/cm²)	Desviación Resistencia (kg/cm²)	Estándar a flexión	Percentil 5%, P _{0,05} Resistencia a flexión (kg/cm²)
Inmersión en agua	64.8	16.8		44.2
Secado al aire libre	81.4	21.6		53.3
Secado en horno	87.2	54.1		38.3
Inmersión en cal	79.0	30.1		45.4

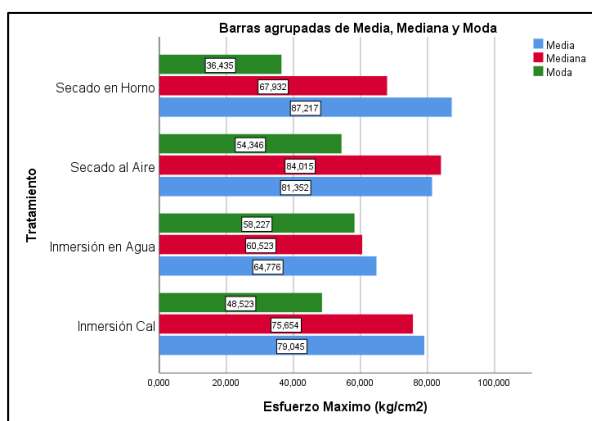
Fuente: Autores (2025)

El tratamiento de secado en horno presentó la mayor resistencia media a flexión, con un valor de 87.2 kg/cm². El grupo secado al aire libre alcanzó un valor medio de 81.4 kg/cm², mientras que las probetas tratadas con cal mostraron valores intermedios. El tratamiento mediante inmersión en agua

registró los valores más bajos, con un esfuerzo medio de 64.8 kg/cm². La dispersión de los resultados mostró diferencias entre tratamientos. El coeficiente de variación fue mayor en las probetas tratadas con secado en horno (CV=62.0%), mientras que el tratamiento con inmersión en agua presentó una menor variabilidad relativa (CV=25.9%), evidenciando un comportamiento más uniforme dentro de cada grupo de 30 datos.

La Figura 12 presentó la comparación gráfica de los esfuerzos medios obtenidos en los ensayos de flexión, facilitando la identificación de tendencias entre los distintos tratamientos.

Figura 12. Gráfico comparativo de resistencia media a flexión por tratamiento



Fuente: Autores (2025)

Valores característicos para diseño estructural

Con el propósito de obtener parámetros representativos para aplicaciones estructurales, se calcularon los valores característicos de resistencia a compresión correspondientes al percentil 5% ($f_{0.05}$) para cada tratamiento. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores característicos de resistencia a compresión (percentil 5%) para Guadua angustifolia

Tratamiento aplicado	Valor característico $f_{0.05}$ Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Valor característico $f_{0.05}$ Resistencia a flexión (kg/cm ²)	Relación Compresión/flexión (adim.)
Inmersión en agua	121.9	44.2	2.8
Secado al aire libre	101.8	53.3	1.9
Secado en horno	174.4	38.3	4.6
Inmersión en cal	188.9	45.4	4.2

Fuente: Autores (2025)

Nota: Los valores característicos se calcularon a partir de la distribución estadística de los resultados experimentales, empleando el percentil 5% como parámetro representativo para diseño estructural.

Estos valores reflejaron diferencias relevantes entre los tratamientos en términos de confiabilidad resistente. El cálculo de los valores característicos permitió complementar la información proporcionada por los valores medios, ofreciendo una base cuantitativa orientada al uso estructural de la guadua bajo criterios de seguridad.

Modos de falla observados

Durante la ejecución de los ensayos se registraron los modos de falla predominantes para cada tipo de sollicitación. En los ensayos de compresión, las fallas se manifestaron principalmente mediante aplastamiento localizado y fisuración longitudinal, no se observa inestabilidad por pandeo en probetas de mayor esbeltez; principalmente por que se controló la relación diámetro/longitud = 2.

En los ensayos de flexión, las fallas se caracterizaron por la combinación de fisuración longitudinal en la zona traccionada y aplastamiento en la zona comprimida, observándose diferencias en la secuencia de aparición de las fallas según el tratamiento aplicado. Estos modos de falla se documentaron mediante registros fotográficos.

Análisis comparativo de la dispersión y consistencia de los resultados

Además de los valores medios de resistencia obtenidos en los ensayos de compresión y flexión, el análisis de la dispersión de los resultados permitió evaluar la consistencia mecánica de la *Guadua angustifolia* bajo los distintos tratamientos aplicados. La desviación estándar y el coeficiente de variación evidenciaron diferencias relevantes entre los grupos experimentales, reflejando el efecto del acondicionamiento previo sobre la homogeneidad de resultados de los ensayos.

En los ensayos de compresión, las probetas sometidas a secado al horno y el tratamiento con cal presentaron una menor dispersión relativa en comparación con aquellas tratadas mediante secado al aire. Esta menor variabilidad se manifestó en coeficientes de variación más reducidos, lo que indicó un comportamiento mecánico más uniforme dentro de cada grupo.

En los ensayos de flexión, una tendencia similar fue observada. Los tratamientos de secado, particularmente el secado en horno, mostraron una presentaron una mayor dispersión de los valores de resistencia, mientras que los tratamientos húmedos presentaron una menor variabilidad. Esta diferencia en la dispersión se reflejó gráficamente en la Figura 12, donde la separación entre los valores extremos fue más pronunciada en el grupo sometido a inmersión en agua.

Relación entre valores medios y valores característicos

El contraste entre los valores medios de resistencia y los valores característicos correspondientes al percentil 5% permitió evidenciar la influencia de la variabilidad en la confiabilidad estructural del material. En todos los tratamientos analizados, los valores característicos resultaron

significativamente inferiores a los valores medios, reflejando la dispersión inherente de los resultados experimentales.

No obstante, las diferencias relativas entre valores medios y característicos variaron según el tratamiento aplicado. En el caso del tratamiento con cal, la reducción entre el valor medio y el valor característico fue menor en comparación con los tratamientos húmedos, lo que indicó una mayor confiabilidad resistente. Por el contrario, el tratamiento con inmersión en agua presentó la mayor diferencia relativa, evidenciando un comportamiento menos predecible desde el punto de vista estructural. Esta relación fue particularmente relevante para el análisis orientado al diseño, ya que puso de manifiesto que tratamientos con valores medios elevados no necesariamente garantizan valores característicos igualmente favorables, reforzando la necesidad de considerar ambos parámetros de manera conjunta.

Comparación del desempeño relativo entre tratamientos

El análisis conjunto de los resultados permitió establecer una jerarquía clara del desempeño mecánico de la *Guadua angustifolia* en función del tratamiento aplicado. En términos de resistencia media a compresión, el secado al aire libre mostró el desempeño más elevado, seguido por el tratamiento con cal, el secado en horno y la inmersión en agua. En los ensayos de flexión, el secado en horno presentó los valores más altos, seguido por el secado al aire libre, la inmersión en cal y, finalmente, la inmersión en agua. Estas diferencias fueron consistentes tanto en los valores medios como en los valores característicos, lo que permitió identificar tratamientos que no solo mejoraron la capacidad resistente, sino también la confiabilidad del material. La comparación gráfica presentada en las Figuras 11 y 12 facilitó la visualización de estas tendencias y permitió una lectura integral del comportamiento mecánico de la guadua bajo los distintos escenarios evaluados.

Síntesis cuantitativa de los resultados

En conjunto, el análisis detallado de los resultados experimentales evidenció que el tratamiento previo influyó no solo en los valores absolutos de resistencia, sino también en la dispersión y estabilidad de la respuesta mecánica de la *Guadua angustifolia*. La combinación de valores medios, parámetros estadísticos de dispersión y valores característicos proporcionó una base cuantitativa sólida para la comparación objetiva entre tratamientos, estableciendo un marco de referencia adecuado para su aplicación en estudios posteriores y en procesos de diseño estructural.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidenciaron que el tratamiento previo aplicado a la Guadua angustifolia influyó de manera significativa en su desempeño mecánico bajo estados de compresión y flexión, confirmando la sensibilidad del bambú a condiciones de humedad y preservación reportada en estudios previos (Janssen, 2000; Wang et al., 2013). En compresión, el secado al aire libre alcanzó el mayor valor medio (366.6 kg/cm^2), seguido por inmersión en cal (323.7 kg/cm^2), secado en horno (304.6 kg/cm^2) e inmersión en agua (293.2 kg/cm^2), lo cual evidenció una diferencia clara en el desempeño promedio entre tratamientos.

Este resultado fue coherente con lo indicado por Adier et al. (2023), quienes señalaron que el secado gradual reduce el contenido de humedad de forma más uniforme, disminuyendo la aparición de tensiones internas y daños por microfisuración en la pared del culmo. Sin embargo, al evaluar el comportamiento orientado al diseño mediante valores característicos (percentil 5%), se observaron variaciones relevantes en la confiabilidad resistente. En particular, el tratamiento por inmersión en cal presentó el mayor valor característico en compresión ($f_{0.05} = 188.9 \text{ kg/cm}^2$), superando al secado en horno (174.4 kg/cm^2), a la inmersión en agua (121.9 kg/cm^2) y al secado al aire libre (101.8 kg/cm^2).

Estos resultados evidenciaron que un tratamiento no necesariamente optimiza simultáneamente el valor medio y el valor característico, aspecto determinante para la especificación estructural. En los ensayos de flexión, el secado en horno presentó el mayor esfuerzo medio (87.2 kg/cm^2), seguido por secado al aire libre (81.4 kg/cm^2), inmersión en cal (79.0 kg/cm^2) e inmersión en agua (64.8 kg/cm^2).

No obstante, el mismo tratamiento en horno mostró el percentil 5% más bajo en flexión (38.3 kg/cm^2), asociado a una dispersión elevada dentro del grupo experimental, lo cual se reflejó en un comportamiento menos confiable para diseño en comparación con el secado al aire libre (53.3 kg/cm^2) y la inmersión en cal (45.4 kg/cm^2). La comparación entre valores medios y valores característicos reforzó la importancia de no basar la especificación estructural de la guadua únicamente en resistencias promedio. En concordancia con enfoques normativos como ISO 22156, el uso de valores característicos permite incorporar de forma explícita la variabilidad inherente del material, mejorando la seguridad estructural en aplicaciones portantes. En relación con los modos de falla, los mecanismos observados fueron consistentes con antecedentes técnicos reportados para guadua, donde la fisuración longitudinal y el aplastamiento localizado constituyen fallas típicas bajo compresión y flexión.

Esto resulta coherente con lo indicado por Londoño (2007) respecto a la anisotropía del material y la influencia de su morfología, así como con caracterizaciones experimentales recientes realizadas para guadua bajo criterios normalizados. En lo que respecta al marco del proyecto institucional FCI orientado al desarrollo de una columna compuesta bambú–policarbonato, los resultados obtenidos constituyeron una base experimental para seleccionar condiciones de tratamiento que no solo presenten resistencias medias elevadas, sino también valores característicos favorables para garantizar confiabilidad estructural en el elemento compuesto.

CONCLUSIONES

El estudio confirma que el tratamiento previo de la *Guadua angustifolia* es un factor determinante en su desempeño mecánico, influyendo tanto en la capacidad resistente como en la confiabilidad estructural del material bajo solicitaciones de compresión y flexión. Este hallazgo refuerza la necesidad de considerar el acondicionamiento del bambú como una variable esencial en su especificación estructural. En términos de diseño estructural basado en confiabilidad (percentil 5%), el tratamiento por inmersión en cal presentó el valor característico más favorable en compresión, mientras que el secado al aire libre, aunque mostró la mayor resistencia media, evidenció un valor característico inferior, confirmando que la selección del tratamiento debe considerar simultáneamente resistencia promedio y resistencia característica.

Los resultados evidenciaron que ciertos tratamientos mejoraron no solo los valores medios de resistencia, sino también los valores característicos (percentil 5%), incrementando la confiabilidad estructural del material. En este sentido, la investigación aporta criterios técnicos que contribuyen a la selección de tratamientos más adecuados para aplicaciones portantes. La incorporación de valores característicos de resistencia como parámetro de referencia para el análisis estructural demuestra ser un enfoque más consistente con la naturaleza variable de la guadua que el uso exclusivo de valores medios. Esta aproximación fortalece la seguridad estructural y se alinea con los principios de diseño establecidos en normativas internacionales para materiales naturales. Desde una perspectiva aplicada, la caracterización mecánica desarrollada constituye una base experimental fundamental para el diseño de columnas estructurales, particularmente en el contexto de sistemas innovadores y sostenibles. En el marco del proyecto de investigación FCI, los resultados obtenidos permiten sustentar técnicamente la fase posterior de desarrollo de una columna compuesta de bambú y policarbonato, al definir parámetros confiables del material base.

El estudio pone de manifiesto la relevancia de la Guadua angustifolia como material estructural viable para soluciones constructivas ligeras y sostenibles, contribuyendo al fortalecimiento del conocimiento técnico necesario para su integración en la ingeniería estructural contemporánea.

A partir de los resultados alcanzados, se abren líneas de investigación futura orientadas a: (i) evaluar el comportamiento a largo plazo de la guadua tratada frente a efectos de fluencia, fatiga y exposición ambiental; (ii) analizar la interacción mecánica entre la guadua y materiales complementarios, como el policarbonato, en elementos estructurales compuestos; y (iii) desarrollar modelos analíticos y numéricos que permitan predecir el comportamiento de columnas de guadua bajo estados de carga complejos. En conjunto, las conclusiones alcanzadas confirman la pertinencia científica y técnica del estudio, y destacan su aporte al avance del uso estructural del bambú como material renovable, confiable y alineado con los principios de sostenibilidad en la ingeniería civil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adier, M., Sevilla, M., Valerio, D., & Ongpeng, J. (2023). Bamboo as Sustainable Building Materials: A Systematic Review of Properties, Treatment Methods, and Standards. *MDPI Buildings*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/buildings13102449>
- Ghavami, K. (2005). Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 637–649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>
- ISO. (2019). Bamboo structures — Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms — Test methods. <https://www.iso.org/standard/65950.html>
- Janssen, J. (2000). Designing and building with bamboo. Eindhoven, Netherlands: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR). https://www.engineeringforchange.org/wp-content/uploads/2019/05/inbar_technical_report_no20.pdf
- Kelkar, B., Shukla, S., Nagraik, P., & Paul, B. (2023). Structural bamboo composites: A review of processing, factors affecting properties and recent advances. *Advances in Bamboo Scienca*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100026>
- Londoño, X. (2007). *Guadua angustifolia* Kunth: Taxonomy, morphology, anatomy and distribution. <https://doi.org/285724>
- Padilla, J., Guachamin-Acero, W., Guerrero, V., Monar, W., Ponton, P., & Guaman, M. (2024). Dataset on the mechanical and physical characterization of the Ecuadorian *Guadua angustifolia* kunth bamboo culms belonging to “Caña Mansa” biotype. *Data in Brief*, 52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109969>
- Salinas, F., Lopes, P., & Belmonte, G. (2025). Behavior under compression and bending of bamboo filled with sisal fiber reinforced cementitious composites. *RGSA –Revista de Gestão Social e Ambiental*, 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n7-081>
- Sharma, B., Gato, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.077>
- Van der Lugt, P., Vogtländer, J., & Brezet, H. (2020). Bamboo, a sustainable solution for Western Europe—Design cases, LCAs and land-use. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121702>

- Wang, H., Wang, H., Li, W., Ren, D., & Yu, Y. (2013). Effects of moisture content on the mechanical properties of moso bamboo at the macroscopic and cellular levels. *BioResources*, 8(4), 5475–5484. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_08_4_5475_Wang_WLRY_Effects_Moisture_Mech_Prop_Moso_Bamboo_4514.pdf
- Zheng, Y., Zhou, C., Wang, Y., & Zhang, P. (2023). Strength design values of high-performance bamboo-based composite materials based on reliability requirements. *Construction and Building Materials*, 368(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130454>
- Zhong, Y., Jiang, Z., Shangguan, W.-W., & Ren, H.-Q. (2014). Design value of the compressive strength for bamboo fiber-reinforced composite based on a reliability analysis. *BioResources*, 9(4), 7737–7748. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_09_4_7737_Zhong_SR_Design_Value_Compressive_Stren_gth_Bamboo_Fiber_6310.pdf

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

