

Artículo

**DURABILIDAD ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO EN GUADUA
ANGUSTIFOLIA KUNTH DEL CDITI EN DOSQUEBRADAS: CRITERIOS
NORMATIVOS Y CONSTRUCTIVOS INNOVADORES****Henry Colmenares^{1*}, Sandra M. Ríos² y Cindy J. Jurado³**¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Gran Colombia, Bogotá 110231, Colombia;² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá 110231, Colombia;³ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá 110231, Colombia;* Correspondence: henrycolmenares@usantotomas.edu.co**Resumen**

Según los estudios técnicos desarrollados por firmas de ingeniería. Consultoría y Construcciones SAS (2022) y Consorcio Edificar 2024, el problema identificado en el uso del material de guadua en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI), ubicado en Dosquebradas (Risaralda), presenta deterioro prematuro, pérdida progresiva de desempeño estructural y necesidad de intervención. Esta condición evidencia una discrepancia entre el potencial estructural atribuido a la *Guadua angustifolia Kunth* y el comportamiento observado en servicio, asociada no solo al material, sino también a factores de diseño, construcción, mantenimiento, regulación y gestión del ciclo de vida (Sharma et al., 2015) esta consideración se refuerza a través de la ISO 15686-1,2011.

El objetivo principal fue analizar la durabilidad estructural del edificio en *Guadua angustifolia Kunth* del CDITI en Dosquebradas (Risaralda), a partir de la revisión y análisis comparativo de los estudios técnicos desarrollados en los años 2022 y 2024/2025, evaluando su desempeño en servicio, el grado de cumplimiento de la NSR-10 y las deficiencias técnicas, normativas y de gestión del ciclo de vida que inciden en su comportamiento estructural, con el fin de formular criterios orientados a la mejora de su desempeño y la extensión de su vida útil.

El estudio se desarrolló mediante revisión documental y análisis comparativo de las consultorías técnicas previamente referidas, incluyendo los diagnósticos patológicos, análisis de vulnerabilidad, modelaciones estructurales y propuestas de reforzamiento reportadas en dichos estudios. Esta información fue contrastada con los criterios de la NSR-10 y con estándares internacionales aplicables, como ISO 22156, ISO 22157, ISO 19624 e ISO 15686.

Los principales resultados obtenidos evidencian deterioro temprano, funcionalidad reducida, derivas superiores a los límites normativos, sobreesfuerzos en elementos estructurales, baja rigidez global y necesidad de reforzamiento estructural, según la NSR-10 Título A-10. Asimismo, se identificaron brechas entre la NSR-10 y las normas internacionales relacionadas con

caracterización mecánica, clasificación del material, durabilidad, fiabilidad estructural y gestión del ciclo de vida (ISO 22156; ISO 19624).

En conclusión, la vulnerabilidad del edificio CDITI no puede atribuirse únicamente a las propiedades de la guadua, sino a la interacción entre condiciones de calidad de la guadua, diseño, ejecución, exposición, mantenimiento y limitaciones normativas (ISO 22156). En consecuencia, la durabilidad estructural de edificaciones en guadua debe abordarse mediante un enfoque sistémico que integre evaluación estructural, caracterización del material, criterios de intervención, mantenimiento y planificación del ciclo de vida (ISO 19624).

Palabras claves: Guadua angustifolia Kunth (GaK), durabilidad estructural, ciclo de vida, NSR-10, ISO 22156, ISO 22157, ISO 19624, ISO 15686, patología estructural, sostenibilidad.

Abstract:

The problem identified with the use of guadua material at the Center for Industrial Design and Technological Innovation (CDITI), located in Dosquebradas, involves premature deterioration, a progressive loss of structural performance, and the need for intervention, according to technical studies conducted by consulting firms in 2022 and 2024/2025. This condition highlights a discrepancy between the structural potential attributed to Guadua angustifolia Kunth and its observed performance in service, associated not only with the material itself but also with factors related to design, construction, maintenance, regulation, and life cycle management.

The main objective was to analyze the structural durability of the CDITI building in Dosquebradas constructed with Guadua angustifolia Kunth, based on a review and comparative analysis of the technical studies conducted in 2022 and 2024/2025, evaluating its in-service performance, the degree of compliance with NSR-10, and the technical, regulatory, and life-cycle management deficiencies that affect its structural behavior, with the aim of formulating criteria aimed at improving its performance and extending its service life.

The study was conducted through a review of the available technical reports and a comparative analysis of the technical consultancies, including pathological diagnoses, vulnerability analyses, structural modeling, and reinforcement proposals reported in those studies. This information was cross-checked against the criterion.

Key words: Guadua angustifolia Kunth (GaK), structural durability, life cycle, NSR-10, ISO 22156, ISO 22157, ISO 19624, ISO 15686, structural pathology, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

El edificio en guadua del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI), ubicado en Dosquebradas, (Risaralda), construido alrededor de los años 2010–2011, ha sido objeto de evaluaciones estructurales orientadas a analizar su comportamiento en servicio, conforme a los lineamientos establecidos para edificaciones existentes en la NSR-10 (NSR-10 Título A-10).

El presente estudio se enmarca en la evaluación estructural del edificio en guadua del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI), a partir del análisis comparativo de los estudios estructurales desarrollados en los años 2022 y 2024/2025. La evaluación se realiza conforme a lo establecido en la NSR-10, particularmente en el Capítulo A.10, aplicable a edificaciones existentes. Los resultados de dichos estudios evidencian que la edificación no satisface los criterios de desempeño estructural exigidos por la normativa, presentando deficiencias en términos de rigidez, capacidad resistente y comportamiento en servicio, lo que conduce a la necesidad de plantear un reforzamiento estructural.

Adicionalmente, al contrastar el enfoque de la NSR-10 con estándares internacionales recientes, tales como la ISO 22156 (2021), ISO 22157 (actualizada 2023) e ISO 19624 (2023), se identifican limitaciones en la normativa nacional, particularmente en lo relacionado con la caracterización mecánica del material, la clasificación estructural de la guadua y la incorporación de enfoques basados en fiabilidad estructural (NSR-10 Título A-10; ISO 22156; ISO 22157; ISO 19624). En este contexto, la integración de dichos estándares internacionales en la evaluación estructural y en el diseño de intervenciones permite mejorar la precisión en la determinación del comportamiento estructural, así como fortalecer los criterios de durabilidad y vida útil de este tipo de edificaciones (ISO 22156).

A partir de lo anterior, se evidencia una brecha entre los métodos de evaluación estructural establecidos en la NSR-10 y el comportamiento real observado en edificaciones en guadua en servicio, particularmente en lo relacionado con la variabilidad del material, su degradación en el tiempo y su incidencia en el desempeño estructural (ISO 22157). En este sentido, no se cuenta con un enfoque plenamente integrado que articule la evaluación estructural con criterios de caracterización mecánica avanzada, fiabilidad estructural y durabilidad en condiciones reales de servicio (ISO 22156).

El edificio CDITI constituye un caso representativo de estructuras en guadua que, aun habiendo sido evaluadas bajo normativa vigente, presentan deficiencias en su desempeño estructural en servicio. Su análisis permite identificar las causas asociadas a la pérdida de rigidez y capacidad estructural, así como evaluar la pertinencia de los enfoques normativos actuales frente a este tipo de edificaciones. Asimismo, permite establecer criterios técnicos para la evaluación y diseño de intervenciones orientadas a mejorar la seguridad estructural y la durabilidad en construcciones similares (ISO 22156).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño estructural del edificio en guadua del CDITI, identificar los factores que inciden en su comportamiento en servicio y plantear un sistema de reforzamiento estructural que permita mejorar sus condiciones de seguridad, rigidez y funcionamiento, conforme a los lineamientos de la NSR-10 (Título A-10).

En consecuencia, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo influyen las deficiencias en la configuración estructural, las condiciones de servicio y las limitaciones del enfoque normativo en el comportamiento estructural del edificio en guadua del CDITI, y en qué medida un sistema de reforzamiento puede mejorar su desempeño frente a las exigencias de la NSR-10?

El comportamiento estructural deficiente del edificio en guadua del CDITI está asociado a la pérdida de rigidez global, el deterioro del material y limitaciones en el enfoque de evaluación estructural, condiciones que pueden ser corregidas mediante un sistema de reforzamiento orientado a mejorar la distribución de cargas y el desempeño en servicio (NSR-10 Título A-10).

Contexto del problema y estudio de caso

El presente estudio se enmarca en el análisis del edificio en guadua del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI), ubicado en Dosquebradas, Risaralda, a partir de la revisión y análisis comparativo de los estudios estructurales desarrollados en los años 2022 y 2025. La evaluación del caso se fundamenta en los lineamientos establecidos en la NSR-10, particularmente en el Capítulo A.10, aplicable a edificaciones existentes (NSR-10 Título A-10).

El caso de estudio corresponde a una edificación en servicio que ha sido objeto de evaluaciones técnicas orientadas a analizar su comportamiento estructural, su condición de servicio y la necesidad de intervención. En este contexto, el análisis del edificio se desarrolla a partir de la información contenida en dichos estudios, los cuales constituyen la base para la comprensión del problema estructural (NSR-10 Título A-10).

Adicionalmente, el enfoque de evaluación se complementa mediante la revisión de estándares internacionales recientes, tales como la ISO 22156 (2021), ISO 22157 (2023) e ISO 19624 (2023), con el propósito de establecer un marco de referencia para el análisis del comportamiento estructural y la durabilidad de edificaciones en guadua (ISO 22156; ISO 22157; ISO 19624).

Identificación del paciente

El Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI) es una edificación en guadua ubicada en el municipio de Dosquebradas, Risaralda, construida alrededor de los años 2010–2011. De acuerdo con los estudios de patología realizados en 2022 y su actualización en 2025, el edificio ha sido objeto de levantamientos arquitectónicos, evaluación de daños y análisis de vulnerabilidad estructural bajo los lineamientos de la NSR-10. El paciente comprende dos módulos estructurales independientes, se precisa que, para el presente análisis se evaluó el módulo 1, correspondiente a la zona inferior del predio, el cual presenta mayores niveles de deterioro y vulnerabilidad estructural.



Figura 1. Modelo estructural del edificio CDITI en REVIT - Fotografía de referencia – Levantamiento topográfico. Fuente: Estudio 2022 – Visita de campo - Nube de puntos lev. topografía

2. MARCO TEORICO

Sistemas de producción, transformación y gestión de la guadua

2.1 Silvicultura y manejo de guaduales

La silvicultura de la guadua corresponde al conjunto de prácticas técnicas orientadas al establecimiento, manejo, aprovechamiento y conservación sostenible de los rodales de *Guadua angustifolia Kunth*, con el fin de garantizar su productividad, calidad estructural y sostenibilidad en el tiempo. Estas prácticas incluyen la selección del sitio, propagación, manejo de densidad, control fitosanitario, cosecha técnica por edades y tratamiento postcosecha, asegurando que los culmos utilizados en construcción presenten condiciones adecuadas de madurez, durabilidad y comportamiento mecánico. En el contexto estructural, la silvicultura es un componente crítico, ya que incide directamente en la variabilidad del material, su resistencia y su desempeño en servicio, siendo un factor determinante en la calidad del recurso utilizado en edificaciones y en su vida útil, en concordancia con los lineamientos de manejo forestal y aprovechamiento sostenible establecidos en normas técnicas como la NTC 5726 y la NTC 5300.

Según lo expuesto en el Seminario Internacional de la Guadua 2025, dictado por el doctor Germán Hugo Gutierrez, sintetiza la relación entre el manejo silvicultural y la calidad estructural de la guadua, evidenciando que prácticas adecuadas de establecimiento, mantenimiento y cosecha reducen la variabilidad mecánica del material y mejoran su confiabilidad estructural, favoreciendo su clasificación conforme a la ISO 19624.

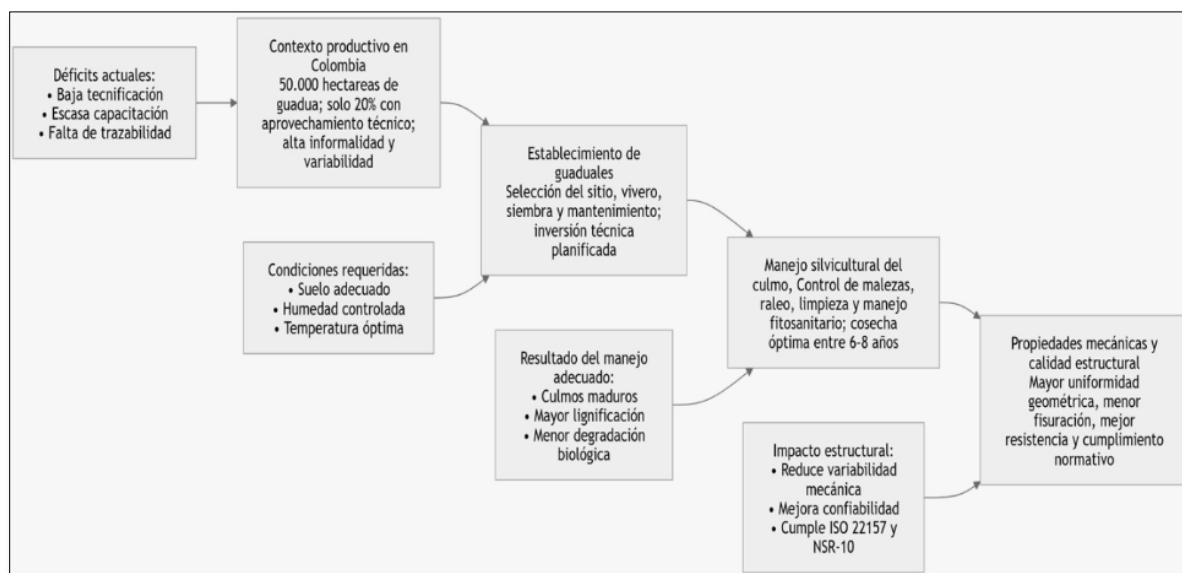


Figura 2. Relación entre el manejo silvicultural y la calidad estructural de la guadua.

Fuente: Seminario Internacional de la Guadua 2025 - Germán Hugo Gutierrez

El manejo silvicultural de la guadua influye directamente en su calidad estructural, dado que las condiciones de establecimiento, mantenimiento y cosecha determinan sus propiedades mecánicas y su comportamiento en servicio. En el contexto colombiano, la baja tecnificación y la falta de trazabilidad generan alta variabilidad en el material, afectando su desempeño estructural.

La implementación de prácticas técnicas adecuadas permite obtener culmos con mayor uniformidad, menor degradación y mejores propiedades mecánicas, lo que reduce la variabilidad estructural y mejora la confiabilidad del material, favoreciendo su clasificación estructural conforme a la ISO 19624 y el cumplimiento de criterios normativos.

2.2 Aprovechamiento y manejo forestal

El manejo forestal de la guadua en Colombia, conforme a lo expuesto en el Seminario Internacional de la Guadua 2025, dictado por el doctor Ramón Arango ha evolucionado hacia un marco normativo estructurado que integra criterios técnicos, legales y estadísticos para regular su aprovechamiento. Este proceso ha permitido establecer metodologías de inventario, control de extracción y planificación del recurso, condicionando directamente la calidad estructural del material. En este contexto, la trazabilidad del culmo, su origen y las condiciones de manejo forestal se constituyen en variables determinantes para garantizar la uniformidad mecánica y la confiabilidad estructural de la guadua en aplicaciones constructivas.

Etapa	Periodo	Instrumento / Referente	Características principales	Implicación estructural
Pre-normativa	Antes de 2001	Sin lineamientos estandarizados	Aprovechamiento sin control técnico ni criterios uniformes	Alta variabilidad del material y baja confiabilidad estructural
Implementación inicial	2001–2008	Metodologías GTZ + CAR	Introducción de inventarios forestales con criterios estadísticos (error 10 %, 95 % confiabilidad)	Mejora en la estimación del recurso y control inicial de calidad
Unificación regional	2008	Norma técnica regional	Estandarización de procedimientos de manejo forestal	Mayor uniformidad en el aprovechamiento del material
Consolidación normativa	2016	Resolución 1740 (MinAmbiente)	Regulación nacional del aprovechamiento, tipos de permiso (Tipo 1, Tipo 2, cambio de uso) y requisitos técnicos	Control formal del recurso y trazabilidad del material
Marco legal complementario	2022	Ley 2206 (Ley de la Guadua)	Reconocimiento legal del recurso, en proceso de reglamentación	Fortalecimiento institucional y potencial mejora en control estructural
Aplicación técnica actual	Vigente	Plan de manejo forestal	Verificación jurídica, levantamiento geoespacial, inventario de culmos, límite de extracción $\leq 35\%$	Control de oferta comercial y sostenibilidad, impactando la calidad estructural

Tabla 1. Criterios normativos para el aprovechamiento forestal
Fuente: Seminario Internacional de la Guadua 2025 – Ramón Arango

2.3 Preservación y secado y transformaciones industriales

La preservación, secado y transformación industrial de la guadua, conforme a lo expuesto en el Seminario Internacional de la Guadua 2025 por el experto Jorge Augusto Montoya Arango, constituyen procesos determinantes en su durabilidad y desempeño estructural, debido a su alta vulnerabilidad biológica asociada a su contenido de azúcares y carbohidratos, lo que exige tratamientos obligatorios desde una perspectiva técnica.

En términos generales, la preservación se realiza mediante tratamientos químicos, destacándose la inmersión en sales de boro (ácido bórico + bórax) con concentraciones cercanas al 4 %, considerada una de las alternativas más confiables frente a métodos tradicionales o industriales con limitaciones operativas. Estos procesos deben complementarse con un secado controlado, dado que el material presenta un punto crítico asociado al punto de saturación de fibra ($\approx 30\%$ – 32% de humedad), a partir del cual su comportamiento mecánico y estabilidad dimensional se ven directamente afectados.

El control del contenido de humedad, así como de variables como temperatura, humedad relativa y ventilación, resulta fundamental para evitar defectos como fisuración, proliferación de hongos y pérdida de calidad estructural. En este contexto, la transformación industrial depende de la adecuada integración entre preservación y secado, ya que ambos procesos condicionan la calidad final del material.

En consecuencia, la guadua no puede considerarse apta para uso estructural sin un tratamiento integral adecuado, dado que la deficiencia en estos procesos incrementa la variabilidad del material, reduce sus propiedades mecánicas y compromete su confiabilidad estructural, en concordancia con los criterios establecidos en normas como la ISO 22157 y la NSR-10 (Título G).

2.4 Ingeniería estructural y diseño de conexiones

Conforme a lo expuesto en el Seminario Internacional de la Guadua 2025 por los expertos Verónica María Correa y doctor David Trujillo, señalan que, la ingeniería estructural en guadua se fundamenta en la integración entre el conocimiento del material y el diseño técnico para garantizar estructuras seguras, eficientes y sostenibles. Su aplicación exige considerar la variabilidad del material, la calidad del culmo y la adecuada transmisión de cargas, bajo marcos normativos como la ISO 22156 y la NSR-10.

Desde el punto de vista estructural, el comportamiento de la guadua está gobernado por el control de deformaciones más que por la resistencia, dado que las estructuras suelen cumplir en capacidad pero fallan en condiciones de servicio. Por ello, el diseño debe priorizar la rigidez mediante estrategias como la optimización geométrica, la reducción de luces y la incorporación de sistemas estructurales más eficientes.

En este contexto, la ingeniería en guadua evoluciona hacia enfoques racionales basados en control del estado de servicio, calidad del material y criterios de durabilidad, como condiciones determinantes para garantizar su confiabilidad estructural.

3. ESTUDIO DE CASO

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, con enfoque evaluativo y comparativo, de carácter no experimental y con metodología mixta. Se orienta a la evaluación del desempeño estructural de una edificación existente en guadua, mediante el análisis de información técnica disponible, la verificación normativa conforme a la NSR-10 y la comparación con estándares internacionales, con el fin de diagnosticar su condición estructural y formular alternativas de intervención.

3.1 Levantamiento de información de la estructura existente

El levantamiento de información de la estructura existente se fundamenta en la recopilación y análisis de información técnica correspondiente al edificio del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI), proveniente de los estudios realizados en los años 2022 y 2025.

La base de información incluye datos topográficos, arquitectónicos y estructurales, los cuales permiten definir las condiciones geométricas, la configuración espacial y la implantación de la edificación. Asimismo, se dispone del levantamiento arquitectónico actualizado, que integra plantas, cortes y fachadas con dimensiones reales, facilitando la comprensión del estado actual del inmueble.

En el ámbito estructural, la información comprende la identificación, localización y dimensionamiento de los elementos resistentes, así como la caracterización del sistema estructural, incluyendo su configuración y direcciones principales de resistencia. De igual forma, se consideran los materiales presentes, guadua, madera, acero y concreto y sus condiciones de conservación.

Adicionalmente, se incorpora la revisión de la documentación técnica existente y la inspección visual de daños, orientada a la identificación de patologías como fisuración, deformaciones, deterioro por humedad y afectaciones en conexiones, constituyendo una base fundamental para el análisis del comportamiento estructural en servicio.

3.2. Inspección visual de daños

Se realizó una inspección técnica detallada orientada a la identificación, registro y caracterización de patologías estructurales visibles en la edificación, tales como fisuración, deformaciones, deterioro por humedad, fotodegradación, afectaciones en conexiones y discontinuidades en la transmisión de cargas. Esta evaluación se soporta en registro fotográfico sistemático.

MATRIZ DE PATOLOGÍAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE GUADUA ANGUSTIFOLIA				
#	Evidencia Fotográfica	Patología	Descripción Técnica / Causa	Diagnóstico NSR-10 G.12
1		Fisuración longitudinal	Rajadura vertical medida con calibrador Vernier. Decoloración gris por intemperismo. Causa: Secado diferencial rápido. El exterior se contrae más que el interior generando tracción.	G.12.11.2: Si ancho >10mm o >15% del perímetro, zunchar o descartar el elemento. Riesgo Medio-Alto.
2		Aplastamiento en conexión pernada	Múltiples fisuras nacen desde los pernos pasantes. Apoyo directo en concreto sin platina de transición ni mortero de relleno.	No cumple G.12.11.3: Todo canuto con conector debe inyectarse con mortero 1:3. Falla frágil = Riesgo Alto.
3		Fisuración severa en nudo	Rajadura crítica que atraviesa el nudo, zona de máxima resistencia. Medición con calibrador muestra abertura significativa.	Crítico: Los nudos no deben presentar fisuras pasantes. Requiere zuncho metálico inmediato o reemplazo del elemento.
4		Intemperismo en columnas compuestas	Decoloración gris generalizada por foto-degradación. Exposición directa a sol y lluvia sin recubrimiento protector.	Durabilidad G.12.2: Reduce vida útil de 25 a 5-8 años. Exige protección con lasur/laca con filtro UV.
5		Falla combinada: Perno + Fisura + Oxidación	Fisura vertical desde perno con corrosión avanzada. Suciedad y humedad en base por capilaridad.	Riesgo Alto: Pérdida de sección del perno + fisura = falla inminente de la unión viga-columna.
6		Fisuración longitudinal por secado	Rajadura en culmo que aún conserva color natural. Atraviesa al menos 2 entrenudos.	G.12.2.2: La guadua estructural debe tener CH ≤ 19% al instalar. Monitorear si la fisura sigue abriendo.
7		Patología en base de apoyo	Medición de fisura en base de columna. Apoyo directo sobre concreto sin elemento metálico separador.	No cumple G.12.2.3: La guadua debe separarse mínimo 5cm del suelo con dispositivo metálico anticorrosivo. Riesgo de pudrición.

Tabla 2. Matriz de patologías en elementos estructurales de Guadua angustifolia. Fuente: Propia

IDENTIFICACIÓN DE MANCHAS HÚMEDAS Y MICROORGANISMOS EN GUADUA ANGUSTIFOLIA				
#	Evidencia Fotográfica	Patología	Descripción Técnica / Causa Probable	Diagnóstico NSR-10 G.12
8		Hongos cromógenos en columna compuesta	Manchas negras irregulares en culmos de columna bajo cubierta. Se observa caja eléctrica adosada. Ambiente interior con poca ventilación. Causa: Humedad relativa >20% + condensación en elementos metálicos. Hongos de mancha azul/negra.	G.12.2.2: La guadua debe tener CH ≤ 19%. Manchas indican CH elevado. Requiere tratamiento fungicida. Las perforaciones para instalaciones deben sellarse.
9		Manchas por humedad superficial	Decoloración oscura en tercio medio de culmos almacenados. Manchas difusas, no puntuales. Causa: Alta humedad ambiental en zona de almacenamiento. Ventilación deficiente.	G.12.2.4: Almacenamiento debe ser en sitio cubierto, ventilado y aislado del suelo. Riesgo: Reduce durabilidad si CH >19% persiste.
10		Colonización por hongos de mancha	Manchas negras concentradas en culmos, similar a Foto 9 pero con mayor intensidad. Ambiente interior. Causa: Exposición prolongada a humedad >18% sin tratamiento preventivo.	G.12.2.2: Elementos con manchas superficiales deben lijarse y tratarse con preservante fungicida antes de instalar.
11		Manchas mixtas: humedad + intemperismo	Imagen izquierda: manchas negras por hongos. Imagen derecha: culmos con decoloración general por UV + suciedad. Causa: Combinación de foto-degradación + ciclos de humedad-secado en obra.	Durabilidad G.12.2: Requiere lijado superficial + lasur con filtro UV y fungicida. Verificar que no haya pudrición blanda.
12		Manchas por instalaciones eléctricas	Manchas oscuras alrededor de tubería conduit metálica y caja eléctrica. El ducto genera puente térmico. Causa: Condensación en tubería + microfisuras por perforación del culmo para sujetar abrazadera.	Riesgo Alto: Las perforaciones deben sellarse con silicona. La humedad acelera corrosión del conduit y ataque biológico. G.12.11
13		Decoloración por intemperismo en estructura	Culmos en zona de escalera con decoloración gris-verdosa. Exposición a intemperie indirecta. Causa: Foto-degradación UV + salpicadura de lluvia + falta de mantenimiento con lasur.	G.12.2: Vida útil reducida. Requiere limpieza, lijado y re-aplicación de recubrimiento con filtro UV cada 2-3 años.
14		Hongos cromógenos severos en pórtico	Manchas negras extensas en culmos de pórtico. Zona semi-exterior con cubierta. Alta concentración en entrenudos. Causa: Humedad >25% sostenida + acumulación de polvo orgánico. Hongos xilófagos en etapa inicial.	Riesgo Alto: Si la zona manchada está blanda al tacto, hay pudrición. G.12.2.2 exige rechazo del elemento. Si es superficial, tratar con fungicida sistémico.

*Todas las patologías identificadas son de origen biótico/abiótico por humedad. Correlacionar con mediciones de CH% in-situ.

Tabla 3. Identificación de manchas, humedades y microorganismos en la guadua Angustifolia.

ANÁLISIS DE FOTODEGRADACIÓN Y PATOLOGÍAS EN CONEXIONES DE GUADUA				
<i>Texto base: Se pudo constatar que la estructura del edificio está compuesta en su totalidad por guadua. Este material presenta altos grados de fotodegradación, lo que se refleja en la pérdida de sus propiedades mecánicas debido a la exposición continua a la radiación solar. Como resultado, algunas secciones de la guadua han experimentado un debilitamiento considerable.</i>				
#	Evidencia Fotográfica	Patología	Descripción Técnica / Causa Probable	Diagnóstico NSR-10 G.12
15		Fotodegradación severa + Fisuración longitudinal	Culmos con decoloración gris-blancuecina por exposición solar directa. Fisura vertical pasante en culmo central. Pernos pasantes sin arandela visible. Causa: Foto-degradación de lignina por UV + secado diferencial + ausencia de relleno de mortero en canuto.	G.12.11.2: Fisura requiere zunchado. G.12.2: Pérdida de color indica degradación superficial. NSR-10 exige protección con lasur con filtro UV. Riesgo Medio-Alto.
16		Apoyo deficiente + Intemperismo	Columna compuesta apoyada en pedestal de concreto pintado de verde. Culmos con decoloración gris y fisuras. Base sin separador metálico. Causa: Humedad por capilaridad desde pedestal + exposición a intemperie + falta de protección.	No cumple G.12.2.3: Separar mínimo 5cm del suelo con dispositivo anticorrosivo. La pintura no reemplaza el separador. Riesgo Alto de pudrición en base.
17		Fotodegradación en interior + Conexiones múltiples	Culmos en interior con decoloración gris por luz indirecta. Múltiples pernos pasantes. Pedestal de concreto sin acabado. Causa: Foto-degradación por UV indirecto + luz artificial. Concentración de esfuerzos en pernos sin mortero.	G.12.11.3: Todo canuto con conector debe inyectarse con mortero 1:3. La decoloración indica que incluso en interior hay degradación UV. Monitorear.
18		Intemperismo + Acopio de materiales	Columna compuesta con decoloración gris avanzada. Culmos cortados sin uso. Acopio de bultos en base genera humedad. Causa: Exposición a intemperie sin mantenimiento + humedad por materiales almacenados contra la base.	G.12.2: Vida útil reducida a <8 años. G.12.2.4: Prohibido almacenar materiales contra la guadua. Requiere limpieza y re-tratamiento urgente.
19		Fotodegradación en barandas exteriores	Baranda y columna con decoloración gris uniforme por exposición solar directa. Culmos sin recubrimiento visible. Causa: Radiación UV directa. Ausencia de mantenimiento con lasur/laca con filtro UV cada 2-3 años.	Durabilidad comprometida G.12.2: La pérdida de color indica degradación de lignina. Propiedades mecánicas reducidas hasta 30%. Requiere intervención.
20		Fisuración + Fotodegradación en pedestal	Columna única sobre pedestal de concreto. Fisuras verticales múltiples + decoloración gris. Perno en tercio inferior. Causa: Secado diferencial + foto-degradación + concentración de esfuerzos en perno sin mortero de relleno.	G.12.11.2 y G.12.11.3: Fisuras requieren zuncho metálico. Canuto con perno debe ir relleno. Riesgo Alto: combinación de 3 patologías.

* Todas las imágenes evidencian fotodegradación grado 3-4 (escala CEN). Confirma el texto base: pérdida de propiedades mecánicas por UV.

Tabla 3. Identificación de manchas, humedades y microorganismos en la guadua *Angustifolia*.

A diferencia de una descripción general, la inspección se estructuró mediante fichas técnicas de lesiones, en las cuales se documenta para cada caso: tipo de lesión, localización, descripción, posibles causas y evidencia fotográfica, permitiendo una trazabilidad técnica de los daños identificados.

3.3 Diseño Reforzamiento estructural

Definición del sistema de reforzamiento: Con base en el análisis de vulnerabilidad sísmica y los resultados obtenidos del modelo estructural desarrollado en SAP2000 (archivo.sdb) correspondiente al módulo evaluado), se identificaron deficiencias en términos de rigidez lateral, control de derivas y capacidad resistente en varios elementos estructurales.

3.3.1 Criterios de selección del sistema de reforzamiento

La definición del sistema de reforzamiento se fundamenta en la evaluación integral del comportamiento estructural de la edificación, considerando como criterios principales:

- Incremento de la rigidez lateral global
- Reducción de derivas y deformaciones excesivas
- Mejora en la trayectoria y distribución de cargas
- Corrección de deficiencias en conexiones estructurales
- Compatibilidad con el sistema estructural existente
- Viabilidad constructiva y mínima intervención sobre la estructura original

3.3.2 Escenarios de reforzamiento evaluados

A partir de las deficiencias identificadas, se analizaron diferentes alternativas de intervención estructural, entre las cuales se consideran:

- Incorporación de sistemas de arriostramiento
- Refuerzo localizado de elementos estructurales
- Mejora de conexiones estructurales
- Modificación de la configuración estructural existente
- Soluciones combinadas de reforzamiento global

Estas alternativas fueron evaluadas en función de su capacidad para mejorar el comportamiento estructural en términos de rigidez, estabilidad, control de desplazamientos y desempeño sísmico.

3.3.3 Justificación de la solución adoptada

La solución de reforzamiento seleccionada corresponde a la alternativa que presenta el mejor desempeño frente a los criterios establecidos, al permitir:

- Reducción significativa de la esbeltez global
- Mejora en la distribución de cargas
- Incremento de la rigidez estructural
- Disminución de concentraciones de esfuerzo en elementos críticos
- Compatibilidad con el sistema existente sin requerir intervención invasiva

En conclusión, el reforzamiento estructural propuesto demuestra ser una solución efectiva desde el punto de vista mecánico y normativo, al corregir simultáneamente las deficiencias de rigidez y resistencia identificadas en la estructura original. La reducción de derivas, el ajuste del índice de flexibilidad a valores admisibles y la eliminación de sobreesfuerzos evidencian el cumplimiento de los requisitos de desempeño establecidos en la NSR-10. En consecuencia, la estructura reforzada alcanza un nivel de seguridad estructural aceptable, garantizando estabilidad global, control de deformaciones y capacidad resistente adecuada, lo que valida la intervención como técnicamente viable y consistente con los principios de diseño sismorresistente aplicables a estructuras en guadua.

4. RESULTADOS

4.1 Diagnóstico del material y variabilidad mecánica

Mediante la caracterización mecánica del material, se evidenció que la guadua presenta propiedades resistentes significativas, pero con una alta variabilidad, particularmente en el módulo de elasticidad y en la resistencia a la flexión y compresión.

Se observó que los valores medios ($E_{0.50}$), en comparación con los valores característicos ($E_{0.05}$), generan una sobrestimación del comportamiento estructural, lo cual influye directamente en la determinación de derivas y en la respuesta sísmica conforme a la ISO 22157.

4.2 Desempeño estructural inicial

A partir del análisis estructural desarrollado en SAP2000, se identificó que el sistema presenta niveles de deformación lateral (derivas) superiores a los límites permisibles establecidos en la NSR-10.

Este comportamiento se asocia a una disminución de la rigidez del material en condiciones reales de servicio, así como a deficiencias en el diseño estructural y en las conexiones, lo que afecta la respuesta global del sistema frente a acciones sísmicas.

4.3 Influencia de conexiones y condiciones de servicio

Los resultados evidencian que el desempeño sísmico no depende únicamente de la resistencia del material, sino también de la rigidez global del sistema y de la calidad de las conexiones. Se identificaron como factores críticos:

- Exposición a humedad
- Baja ductilidad en elementos estructurales
- Concentraciones de esfuerzo en conexiones

Estos aspectos inciden directamente en la generación de mecanismos de falla temprana bajo condiciones de servicio exigentes.

4.4 Durabilidad y degradación del material

Los resultados muestran que factores ambientales como la humedad, la acción de agentes biológicos y la falta de mantenimiento influyen significativamente en el deterioro del material. Se evidencia que la pérdida de sección efectiva y la reducción de propiedades mecánicas afectan el desempeño estructural y reducen la vida útil de la edificación.

4.5 Evaluación bajo condiciones de incendio

La evaluación del comportamiento frente a incendio indica que la guadua presenta una reducción progresiva de su capacidad resistente debido al proceso de carbonización, lo cual genera una disminución de la sección efectiva. Se identifica además la ausencia de criterios específicos en la NSR-10 para el diseño contra incendio en estructuras de guadua, en contraste con metodologías internacionales como la ISO 834-11:2014.

Control de derivas		
Variable	Vulnerabilidad	Reforzamiento
Deriva máxima X	1.89 %	0.97 %
Deriva máxima Y	1.09 %	0.97 %
Cumplimiento deriva	No cumple	Cumple
La vulnerabilidad reporta derivas de 1.89 % en X y 1.09 % en Y .		
El reforzamiento reporta valores máximos de 0.97 % para el índice de flexibilidad/deriva, dentro del límite de 1.00 % .		

Tabla 4. Comparativo de control de derivas en condición de vulnerabilidad vs reforzamiento

Umbral de daño		
Variable	Vulnerabilidad	Reforzamiento
Deriva umbral de daño máxima X	No cumple según conclusión del estudio	0.36 %
Deriva umbral de daño máxima Y	No cumple según conclusión del estudio	0.36 %
Límite	0.40 %	0.40 %
Cumplimiento	No cumple	Cumple
El estudio de vulnerabilidad concluye que tampoco cumple el umbral de daño.		
En el reforzamiento, la tabla reporta máximos de 0.36 % , menores que el límite de 0.40 % .		

Tabla 5. Comparativo de umbral de daño en condición de vulnerabilidad vs reforzamiento

Rigidez global		
Variable	Vulnerabilidad	Reforzamiento
Índice de flexibilidad IF	1.99	0.97
$VRI = 1 / IF$	0.50	1.03
Evaluación	Rigidez baja	Rigidez adecuada
En vulnerabilidad se reporta $VRI = 1/1.99 = 0.50$, indicando rigidez baja.		
En reforzamiento se reporta $IF = 0.97$ y $VRI = 1.03$, indicando rigidez adecuada.		

Tabla 6. Comparativo de rigidez global en condición de vulnerabilidad vs reforzamiento

Síntesis comparativa		
Criterio	Vulnerabilidad	Reforzamiento
Derivas	No cumple	Cumple
Umbral de daño	No cumple	Cumple
Rigidez	Baja	Adecuada
Sobreesfuerzos	Presentes	Controlados / eliminados según verificación
Condición estructural	Vulnerable	Intervenida y conforme

Tabla 7. Resumen de criterios en condición de vulnerabilidad vs reforzamiento

El análisis comparativo evidencia que el modelo de vulnerabilidad presenta incumplimientos en derivas, umbral de daño, rigidez y sobreesfuerzos, con derivas máximas de 1.89 % en X y 1.09 % en Y, índice de flexibilidad de 1.99 y vulnerabilidad por rigidez $VRI = 0.50$. En contraste, la propuesta de reforzamiento reduce las derivas máximas a 0.97 %, cumple el umbral de daño con valores máximos de 0.36 %, ajusta el índice de flexibilidad a 0.97 y eleva la vulnerabilidad por rigidez a $VRI = 1.03$, lo cual permite clasificar la estructura reforzada con rigidez adecuada y comportamiento conforme frente a los criterios evaluados de la NSR-10.

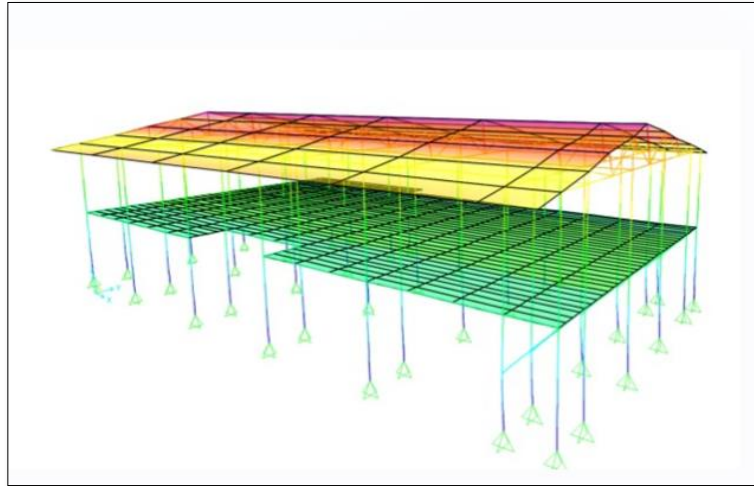


Figura 4. Resultado del modelo SAP2000, Periodo fundamental en el modo 01 sentido X $T=0.44$ S.
Fuente: Elaboración propia con base en estudio de patología (2022).

5. DISCUSIÓN: VIDA ÚTIL, COSTOS Y CRITERIOS NORMATIVOS

El análisis de los resultados evidencia que el comportamiento estructural del edificio no puede explicarse únicamente a partir de las propiedades mecánicas del material, sino como el resultado de la interacción entre diseño, condiciones de servicio, deterioro y criterios normativos aplicados (ISO 15686).

Desde el enfoque de ciclo de vida, los resultados obtenidos muestran una discrepancia entre el desempeño esperado y el observado en servicio, lo cual se relaciona con la ausencia de integración entre diseño estructural, condiciones de exposición y estrategias de mantenimiento. En este sentido, los principios establecidos en la ISO 15686 permiten interpretar que la durabilidad estructural no depende exclusivamente del material, sino de factores como la calidad constructiva, el control de humedad, la protección frente a agentes ambientales y la gestión del mantenimiento (ISO 15686).

La evolución normativa en el diseño de estructuras en guadua ha experimentado una evolución fundamental desde enfoques de diseño simples basados en reglas promedio, como los establecidos por la NSR-10, hasta otros más complejos desarrollados por estándares internacionales recientes como ISO 22156, ISO 22157 e ISO 19624, los cuales introducen metodologías basadas en caracterización estadística, clasificación estructural y evaluación del comportamiento dependiente del tiempo. Esta evolución normativa permite evidenciar una brecha entre los enfoques tradicionales y los criterios actuales de diseño, particularmente en lo relacionado con la variabilidad del material, la durabilidad y la fiabilidad estructural.

Código o norma de diseño	Año	País	Específico por especie	Propiedades mecánicas	Determinación de valores de diseño	Vigas	Columnas	Conexiones estructurales (uniones)	Muros estructurales de corte
NSR-98	1998	Colombia	Y (Guadua)	X	X	X	✓ (simple)	X (Details)	✓
ACI-162	2000	Calif., USA	N	X	✓	X	X	X	X
ISO 22156:2004	2004	International	N	X	✓	X	X	X (Test)	X
NBC	2004	India	Y (20 & 16 species)	✓ (few)	X	X	X	X (Details)	X
ISO 22157: 2004 1 y 2	2004	International	N	✓	✓ (few)	X	X	X	X
NSR-10	2010	Colombia	Y (Guadua)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
E.100	2012	Peru	Y (Guadua)	✓	X	✓	✓	X (Details)	X (Details)
Andean Standard	2015	International	Y (Guadua)	X	X	✓ (simple)	✓ (simple)	X (Details)	✓
NEC-SE-GUADUA	2016	Ecuador	Y (Guadua)	✓	X	✓	✓	X (Details)	X (Details)
Reglamento DF	2017	México	Y (3 species)	✓	X	✓	✓	X (Details)	X (Details)
ISO 22156:2019	2019	International	Y (Guadua)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ISO 22157: 2019	2019	International	Y (Guadua)	✓	✓	X	X	X	X
ISO 22156:2021	2021	International	Y (Guadua)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ISO 22157: 2021	2021	International	Y (Guadua)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ISO 19624: 2023	2023	International	Y (Bambú)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fuente: Trujillo 2020 Actualizada: Propia

Tabla 8. Evolución de las normas aplicables al diseño de bambú y madera - normas nacionales e internacionales

Es de resaltar que la norma Colombia de sismorresistencia NRS – 10 fue la primera que desarrollo los componentes de uniones y conexiones, las cuales deben primar en el diseño de edificaciones en guadua.

Las normas técnicas colombianas NTC de las que se dispone para el diseño de edificaciones en guadua son:

Norma	Año	Descripción
NTC 5300	2020 R	Cosecha y postcosecha de culmos de guadua
NTC 5301	2018 R	Establece los métodos para el secado, preservación y tratamiento de la guadua, con el fin de mejorar su durabilidad frente a agentes biológicos.
NTC 5407	2018 R	Establece criterios para uniones y conexiones en estructuras de guadua, principalmente desde el punto de vista constructivo.
NTC 6317	2019 R	Establece el ensayo de muros de corte en guadua, evaluando su comportamiento estructural.
NTC 6672	2023	Estructuras de bambú. Productos de bambú de ingeniería. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas

Fuente: Recopilación propia

Tabla 9. Normas técnicas colombianas vigentes

Al contrastar los resultados con estándares internacionales como ISO 22156, ISO 22157 e ISO 19624, se evidencia que el enfoque de la NSR-10 presenta limitaciones al basarse principalmente en parámetros promedio y no incorporar de manera explícita la variabilidad del material, la degradación en el tiempo ni el comportamiento dependiente de condiciones

ambientales (NSR-10 Título A-10; ISO 22156; ISO 22157; ISO 19624). Esta situación explica por qué, aun cuando la estructura puede cumplir parcialmente algunos criterios normativos, presenta un desempeño deficiente en condiciones reales de servicio.

En particular, los resultados obtenidos en derivas, rigidez y deterioro estructural confirman que el problema no es únicamente de resistencia, sino de configuración estructural, calidad de las conexiones y pérdida progresiva de propiedades mecánicas asociadas a la exposición ambiental. Este comportamiento es consistente con estudios internacionales sobre estructuras en bambú, los cuales señalan que la durabilidad y el desempeño sísmico están fuertemente condicionados por la variabilidad del material y las condiciones de servicio (ISO 22156; ISO 22157).

Adicionalmente, los resultados permiten interpretar que las derivas excesivas y la baja rigidez identificadas en el estado de vulnerabilidad, así como su mejora posterior mediante el reforzamiento, evidencian que el comportamiento estructural está gobernado principalmente por la configuración del sistema resistente y la eficiencia en la transmisión de cargas, más que por la resistencia individual del material. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en literatura internacional reciente, donde se establece que el desempeño de estructuras en bambú depende en gran medida de la rigidez global, la calidad de las conexiones y la clasificación mecánica del material, aspectos considerados en normas como la ISO 22156, ISO 22157 e ISO 19624. En este sentido, los resultados del presente estudio se alinean con dichos enfoques, al evidenciar que la falta de integración entre estos factores conduce a discrepancias entre el comportamiento teórico esperado y el desempeño real en servicio.

Costos y eficiencia económica

El análisis técnico-económico del caso del edificio CDITI evidencia una baja eficiencia en términos de ciclo de vida, al observarse una relación desfavorable entre la inversión inicial, el desempeño en servicio y los costos de intervención requeridos.

La edificación, construida alrededor del año 2010 con una inversión aproximada de \$5 mil millones, presentó hacia el año 2020 condiciones de deterioro y riesgo estructural, lo que implica una reducción significativa de su vida útil esperada. Posteriormente, la necesidad de reforzamiento estructural, estimada nuevamente en valores cercanos a \$5 mil millones para el año 2025, evidencia una duplicación del costo inicial asociada a deficiencias en diseño, construcción y mantenimiento.

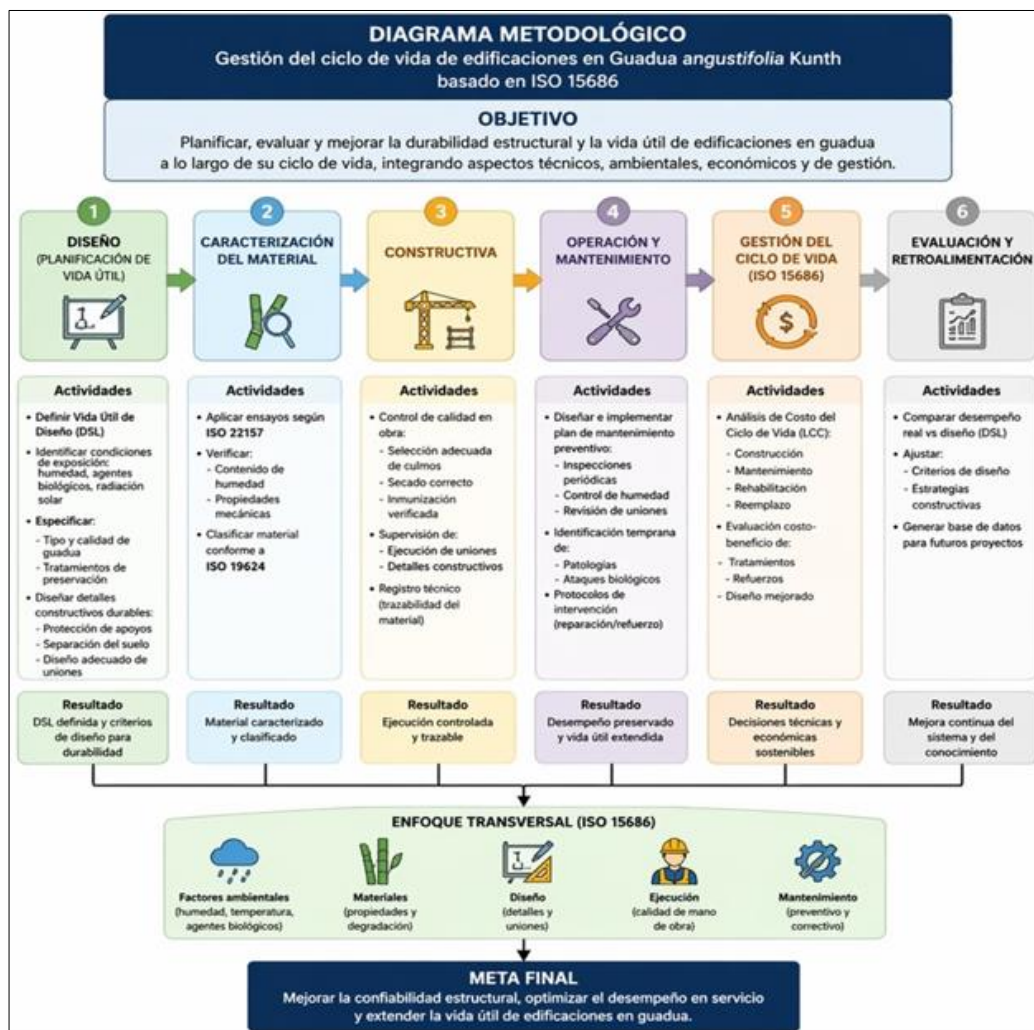


Figura 5. Ciclo de vida

Supuestos del análisis económico

El análisis se fundamenta en los siguientes supuestos:

- La inversión inicial corresponde al costo de construcción reportado del proyecto.
- El costo de reforzamiento se basa en estimaciones técnicas derivadas de los estudios estructurales.
- No se incorporan costos indirectos como interrupción del servicio, costos sociales o pérdida de funcionalidad.
- Se asume ausencia de mantenimiento preventivo durante el periodo de servicio.

Fuentes de información

Los valores económicos utilizados provienen de estimaciones técnicas asociadas a la intervención propuesta a través de Findeter-2024.

PRESUPUESTO OFICIAL			
ETAPA I: REVISIÓN, AJUSTE Y COMPLEMENTACIÓN DE ESTUDIOS TÉCNICOS Y DISEÑOS ENTREGADOS POR EL SENA, OBTENCIÓN DE LICENCIAS Y PERMISOS REQUERIDOS			
DESCRIPCIÓN			VALOR TOTAL
REVISIÓN, AJUSTE Y COMPLEMENTACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS, OBTENCIÓN DE LICENCIAS Y PERMISOS REQUERIDOS.			\$216.260.303
VALOR TOTAL IVA 19%ETAPA I			\$41.089.458
VALOR TOTAL ETAPA			\$257.349.761
2. ETAPA II. REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL Y REHABILITACION DE EDIFICACIONES (Acorde a lo priorizado por el SENA)			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UND	VALOR TOTAL
A	VALOR DIRECTO OBRA		\$3.157.814.218
	Administración	31,47%	\$993.764.134
	Imprevistos	1%	\$31.578.142
	Utilidad	5%	\$157.890.711
	Valor IVA sobre la utilidad	19,00%	\$29.999.235
B	VALOR COSTOS INDIRECTOS		\$1.213.232.222
COSTO TOTAL OBRA (A+B)			\$4.371.046.440 *
3. VALOR TOTAL OFERTA (1+2)			\$4.628.396.201 **

Figura 6. Extractos de estudio previo de Contrato interadministrativo No.COI.PCCNTR.1482420/2020, Findeter -SENA. Fuente: Secop II

Limitaciones del análisis

El análisis presenta las siguientes limitaciones:

- No se desarrolla un análisis detallado de costos del ciclo de vida (LCC) con flujo de caja.
- No se consideran escenarios de mantenimiento preventivo alternativo.
- No se incluye análisis probabilístico de costos ni incertidumbre.
- No se cuantifican los efectos económicos de la degradación progresiva.

Interpretación económica de resultados

Los resultados muestran que la falta de incorporación de criterios de durabilidad y mantenimiento desde la etapa de diseño genera un incremento significativo en los costos a lo largo del ciclo de vida.

En este caso, la ausencia de estrategias de mantenimiento preventivo y control de condiciones de exposición ha llevado a una necesidad de intervención estructural temprana, reduciendo la eficiencia económica del proyecto y generando una alta probabilidad de recurrencia de patologías.

Adicionalmente, el reforzamiento propuesto, aunque cumple con los requisitos de la NSR-10, no incorpora de manera integral criterios de durabilidad asociados a humedad, degradación biológica y mantenimiento, lo cual implica que el cumplimiento normativo no garantiza necesariamente la sostenibilidad técnica y económica a largo plazo.

Implicaciones para la práctica profesional

Los resultados evidencian que:

- El diseño estructural no debe basarse únicamente en el cumplimiento normativo mínimo
- La durabilidad debe incorporarse como variable de diseño desde la etapa inicial
- La ausencia de gestión del ciclo de vida puede generar duplicación de costos
- El análisis económico debe considerar mantenimiento, deterioro y escenarios de intervención

Implicaciones para investigación futura

Se requiere desarrollar:

- Modelos integrados de durabilidad estructural en guadua
- Metodologías de análisis de costos del ciclo de vida (LCC) aplicadas a estructuras naturales
- Estudios probabilísticos que integren variabilidad del material, degradación y desempeño estructural
- Actualización normativa que incorpore criterios de durabilidad y eficiencia económica.

6. CONCLUSIONES

La caracterización mecánica de la guadua requiere un enfoque basado en variabilidad y no en valores promedio. El uso de parámetros únicos definidos en la NSR-10 conduce a una representación inadecuada del comportamiento estructural, al desconocer la variabilidad natural del material (NSR-10; ISO 22157). En este sentido, se confirma la necesidad de adoptar criterios de caracterización y clasificación estructural conforme a la ISO 19624, que permitan incorporar diferencias por procedencia, condiciones ambientales y propiedades mecánicas reales (ISO 19624).

La cadena productiva de la guadua presenta debilidades que afectan directamente su desempeño estructural. La ausencia de caracterización física y mecánica del material comercializado limita su uso técnico, reduce su confiabilidad y afecta su valor agregado. Esta condición evidencia la necesidad de tecnificar la cadena de producción, garantizando trazabilidad, control de calidad y estandarización, en contraste con materiales industrializados como el acero (ISO 19624).

El comportamiento estructural de la guadua está condicionado por su naturaleza anisotrópica, higroscópica y altamente variable. Factores como contenido de humedad, edad de corte, condiciones edafoclimáticas y geometría del culmo influyen significativamente en sus

propiedades mecánicas (ISO 22157). Esta variabilidad explica las discrepancias entre valores normativos y resultados experimentales, así como la necesidad de promover investigación regionalizada y actualización de parámetros de diseño (ISO 22157).

Las simplificaciones en la modelación estructural generan errores significativos en la evaluación del desempeño. La idealización de uniones como completamente rígidas o articuladas conduce a estimaciones inadecuadas de deformaciones y vulnerabilidad. Se concluye que el uso de modelos de uniones semirrígidas es fundamental para representar correctamente la transmisión de esfuerzos, la rotación nodal y la progresión del daño, especialmente en enfoques de diseño basado en desempeño (ISO 22156).

El enfoque normativo actual presenta limitaciones que inciden en la confiabilidad del diseño estructural. La NSR-10 evidencia rezagos frente a normas internacionales como ISO 22156 e ISO 22157, particularmente en aspectos de caracterización, clasificación del material y diseño estructural (NSR-10 Título A-10; ISO 22156; ISO 22157). Adicionalmente, el uso de modelos como el de secciones compuestas puede sobreestimar la capacidad resistente, generando riesgos en la evaluación estructural.

El desarrollo futuro de la construcción con guadua debe orientarse hacia un enfoque integral basado en desempeño y ciclo de vida. Los resultados del estudio demuestran que es necesario avanzar hacia la tecnificación de la cadena productiva, la actualización normativa y la incorporación de criterios de durabilidad, mantenimiento y diseño basado en desempeño (ISO 15686; ISO 22156). Este enfoque permitirá maximizar el potencial estructural de la guadua, garantizando simultáneamente seguridad, confiabilidad y sostenibilidad a lo largo de su vida útil.

Referencias

1. Clark, L. G., Londoño, X., & Ruiz-Sánchez, E. (2015). Bamboo taxonomy and habitat. En W. Liese & M. Köhl (Eds.), *Bamboo: The plant and its uses*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
2. De la Rosa Cubillos, W. J., & Vargas-Rincón, W. X. (2019). *Identificación y análisis de patologías en la Guadua angustifolia Kunth utilizada en la construcción* (Trabajo de grado). Universidad Católica de Colombia.
3. Espitia, M., Sjogreen, C., Rodríguez, N., Calderón, J., Benavides, A., Peraza, R., Espitia, G., & Nemocón, R. (2018). Caracterización física y mecánica de fibras de *Guadua angustifolia Kunth* provenientes de Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 33–40. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018003>
4. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 22156:2019 – Bamboo structures — Bamboo structural design*. ISO.
5. International Organization for Standardization. (2019). *ISO 22157:2019 – Bamboo structures — Determination of physical and mechanical properties of bamboo*. ISO.
6. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19624:2018 – Bamboo structures — Grading of bamboo culms — Basic principles and procedures*. ISO.

7. International Organization for Standardization. (2011). *ISO 15686-1:2011 – Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework*. ISO.
8. Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and building with bamboo* (Technical Report No. 20). INBAR.
9. Liese, W. (1998). *The anatomy of bamboo culms* (INBAR Technical Report No. 18). BRILL.
10. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10: Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
11. Montoya Arango, J. A. (2008). Evaluación de métodos para la preservación de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, 14, 38.
12. Posada Giraldo, R. E. (2015). *Desarrollo de métodos alternativos de valoración de la calidad de la preservación en Guadua angustifolia Kunth* (Tesis de maestría). Universidad Tecnológica de Pereira.
13. Reyna, M., & Moreno, F. (2022). *Caracterización de la cadena de construcción con bambú e identificación de plantaciones y manchas naturales a través de teledetección satelital en tres cantones de la provincia de Manabí, Ecuador*. INBAR.
14. Sánchez-Medrano, M. T., Izquierdo-Kulich, E. F., Aranda-Jiménez, Y. G., & Suárez-Domínguez, E. J. (2018). Estudio mecánico del desplazamiento de fluidos en bambú para su preservación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 19(3), 321–327. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2018.19n3.027>
15. Sharma, B., Gatóo, 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>