Machine Learning and Structural Modeling of Guadua angustifolia for Climate-Resilient Infrastructure in the Amazon

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor[1]; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor[2]; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctora(c)[3]; Oscar Fredy Alva Villacorta, Magister[4]; Carla Griselle Poma González, Magister[5]; Allende Elías Gómez Ramírez, Magister[6]; Alicia Cristina Chiok Guerra, Doctora[7]

[1,3,7] **Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; alicia.chiok@urp.edu.pe**

[2,4,5,6] **Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, oalvav@unasam.edu.pe, cpomag@unasam.edu.pe, agomezr@unasam.edu.pe,**

Abstract: ***The high climatic vulnerability in the Peruvian Amazon and the historical deficit in the adoption of sustainability criteria in public infrastructure (24%), this research evaluates the effectiveness of an integrative framework that combines Green Artificial Intelligence (Green AI) and the use of non-conventional biomaterials (Guadua angustifolia) for the development of resilient housing infrastructures in the province of Manu. Mother of God. The study addresses the analytical transition from the operational efficiency of algorithmic computing (Green in AI) to the generation of environmental and structural benefits in the built environment (Green by AI). Using structural pruning techniques and INT8 quantization in predictive models, it was possible to reduce processing time by 35.2% (from 142 to 92 hours) and energy consumption to 812 kWh. In the bioclimatic parametric design, passive strategies reduced HVAC energy demand by 25.0% and artificial lighting by 40.0%. Likewise, the algorithmic optimization of cementitious mixtures decreased cement consumption from 320 to 256 kg/m³ (−20.0%), increasing compressive strength to 215 kg/cm² (+2.3%). The experimental mechanical characterization in the laboratory confirmed the marked anisotropic behavior of Guadua angustifolia, registering parallel tensile strengths of 1,463.13 kg/cm² and parallel compression of 509.38 kg/cm². Finally, the three-dimensional simulation in ETABS v20 under E.100 and NSR10 regulations validated a two-story housing prototype, guaranteeing deflections (0.312 cm), inelastic drifts (0.0018) and demand/capacity ratios (0.64) that were comfortably safe. premises.***

Keywords: ***Green algorithm, artificial intelligence, guadua angustifolia, sustainable infrastructure, structural anisotropy, energy efficiency.***

Aprendizaje automático y modelado estructural de la Guadua angustifolia para infraestructuras resistentes al clima en la Amazonía

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor[1]; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor[2]; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctora(c)[3]; Oscar Fredy Alva Villacorta, Magister[4]; Carla Griselle Poma González, Magister[5]; Allende Elías Gómez Ramírez, Magister[6]; Alicia Cristina Chiok Guerra, Doctora[7]

[1,3,7] **Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; alicia.chiok@urp.edu.pe**

[2,4,5,6] **Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, oalvav@unasam.edu.pe, cpomag@unasam.edu.pe, agomezr@unasam.edu.pe,**

Resumen: ***La elevada vulnerabilidad climática en la Amazonía peruana y el histórico déficit en la adopción de criterios de sostenibilidad en la infraestructura pública (24%), esta investigación evalúa la eficacia de un marco integrador que combina Inteligencia Artificial Verde (Green AI) y el uso de biomateriales no convencionales (Guadua angustifolia) para el desarrollo de infraestructuras habitacionales resilientes en la provincia de Manu, Madre de Dios. El estudio aborda la transición analítica desde la eficiencia operacional del cómputo algorítmico (Green in AI) hasta la generación de beneficios ambientales y estructurales en el entorno construido (Green by AI). Mediante técnicas de poda estructural (pruning) y cuantización INT8 en modelos predictivos, se logró reducir el tiempo de procesamiento en un 35.2% (de 142 a 92 horas) y el consumo energético a 812 kWh. En el diseño paramétrico bioclimático, las estrategias pasivas redujeron la demanda energética de HVAC en un 25.0% y la iluminación artificial en un 40.0%. Asimismo, la optimización algorítmica de mezclas cementicias disminuyó el consumo de cemento de 320 a 256 kg/m³ (−20.0%), incrementando la resistencia a compresión a 215 kg/cm² (+2.3%). La caracterización mecánica experimental en laboratorio confirmó el marcado comportamiento anisotrópico de la Guadua angustifolia, registrando resistencias a tracción paralela de 1,463.13 kg/cm² y compresión paralela de 509.38 kg/cm². Finalmente, la simulación tridimensional en ETABS v20 bajo normativas E.100 y NSR10 validó un prototipo habitacional de dos pisos, garantizando deflexiones (0.312 cm), derivas inelásticas (0.0018) y ratios demanda/capacidad (0.64) holgadamente seguros locales.***

Palabras clave: ***Algoritmo Verde, Inteligencia Artificial, Guadua Angustifolia, Infraestructura Sostenible, Anisotropía Estructural, Eficiencia Energética.***

I. Introducción

La intensificación del cambio climático global y la urgencia de descarbonizar el sector de la edificación exigen un cambio de paradigma hacia infraestructuras ecorresilientes integradas con tecnologías emergentes. En regiones de alta vulnerabilidad ambiental y geográficamente aisladas, como la Amazonía peruana, los métodos constructivos tradicionales intensivos en huella de carbono resultan insostenibles. Frente a este desafío, la convergencia entre el aprovechamiento de biomateriales locales de rápido crecimiento y alto desempeño mecánico destacando la Guadua angustifolia por su notable comportamiento anisotrópico y la optimización algorítmica mediante Inteligencia Artificial Verde (*Green* AI) emerge como una solución integral. Este enfoque atenúa el impacto energético del cómputo algorítmico (*Green in* AI) al tiempo que optimiza la eficiencia térmica, la formulación de concreto ecoeficiente y el desempeño sismorresistente en el entorno construido (*Green by* AI), garantizando la seguridad estructural y la sostenibilidad ambiental del hábitat amazónico [1].

Esta condición se hace tangible mediante la reiteración de eventos hidrometeorológicos extremos, entre los cuales el Fenómeno El Niño (FEN) sobresale como el factor de mayor trastorno para la estabilidad socioeconómica e infraestructural del país [2]. Este evento no se limita a alterar los equilibrios biológicos y ecológicos, sino que genera daños estructurales severos en la infraestructura física nacional [1, 2]. El deterioro constante de las redes de transporte, sistemas de saneamiento y edificaciones públicas y privadas pone de relieve una carencia histórica de criterios de adaptación climática y resiliencia en la planificación de obras de ingeniería civil [1]. Pese a la claridad de este diagnóstico técnico, se percibe que solo un 24% de los proyectos de inversión pública y privada integra efectivamente principios de sostenibilidad o se alinea rigurosamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 [1, 2]. Tal disparidad revela una contradicción preocupante entre el acelerado crecimiento urbano y la necesaria salvaguarda del patrimonio natural y territorial.

El sector de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC, por sus siglas en inglés) se encuentra hoy ante una encrucijada global sin precedentes [6]. Son innegables las

huellas ecológicas que deja: un consumo masivo de recursos extractivos primarios, una importante cuota de emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) y una demanda energética desmedida durante la etapa operativa de las edificaciones [6]. Esta realidad alcanza un nivel crítico en regiones geográficamente aisladas o de difícil acceso, como la provincia de Manu en la región Madre de Dios (Amazonía peruana) [2]. En esta zona, la cadena logística y de transporte para materiales convencionales de alta energía incorporada como el acero estructural, el concreto armado y el ladrillo cerámico resulta sumamente compleja, costosa e insostenible ambientalmente [12].

Esta barrera económica ha obligado a recurrir tradicionalmente a recursos maderables o vegetativos locales. Sin embargo, la sobreexplotación no planificada de maderas comerciales tradicionales como el *Eucalyptus Globulus* genera presiones deforestadoras significativas sobre las microcuencas amazónicas y presenta limitaciones de durabilidad si no se evalúan sus parámetros mecánicos frente a alternativas no convencionales de rápido crecimiento y alta tasa de fijación de carbono, tales como el bambú Guadua Angustifolia [9, 12]. Ante este escenario, la industria debe abrazar el modelo de "Construcción Verde", un enfoque holístico que busca aliviar la carga ambiental de las obras civiles desde la extracción del material hasta la disposición final o reutilización al término de su vida útil [6].

En el proceso de transición hacia infraestructuras ecorresilientes, las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) constituyen herramientas eficientes para optimizar la envolvente bioclimática pasiva y la formulación de matrices cementicias de bajo impacto ambiental [4, 5, 7]. Investigaciones previas demuestran que el aprendizaje automático (*Machine Learning*) y el aprendizaje profundo (*Deep Learning*) facilitan la simulación predictiva de envolventes térmicas complejas y el diseño optimizado de mezclas de concreto de baja huella de carbono, alcanzando reducciones de hasta un 17.6% en emisiones asociadas respecto al hormigón armado tradicional [5, 8, 12]. No obstante, la rápida expansión de herramientas digitales e iteraciones algorítmicas de alta complejidad conlleva una contradicción inherente y preocupante: el entrenamiento e inferencia de modelos de IA masivos requiere un consumo de energía eléctrica extraordinario, generando una huella de carbono computacional considerable [3, 16, 17, 18].

Ante esta paradoja, surge el marco conceptual de la Inteligencia Artificial Verde (*Green* AI) [3]. Este paradigma postula la necesidad de optimizar la eficiencia algorítmica y del soporte físico de procesamiento (*Green in* AI) para asegurar que los sustanciales beneficios ecológicos logrados en el entorno construido físico (*Green by* AI) no sean anulados por el costo ambiental e hídrico del procesamiento de datos en centros de cómputo [3, 18]. En el contexto peruano y sudamericano, la aplicación de estas tecnologías emergentes enfrenta barreras estructurales, tales como la brecha digital regional, la ausencia de marcos normativos de incentivo técnico y la falta de caracterización mecánica contextualizada respecto a la elevada anisotropía de los biomateriales locales [15, 20]. Bajo este panorama, el objetivo central del presente estudio es evaluar cuantitativamente la efectividad del paradigma del Algoritmo Verde integrando técnicas de IA de bajo consumo computacional con el aprovechamiento de biomateriales anisotrópicos de alto desempeño como la Guadua Angustifolia para optimizar la sostenibilidad, la resiliencia estructural frente a solicitaciones mecánicas y la eficiencia energética de la infraestructura civil en regiones vulnerables del Perú [3, 15, 19].

Se propone la integración del Algoritmo Verde (*Green in AI*) [3, 16] para optimizar el cómputo algorítmico, y su posterior despliegue (*Green by AI)* [4, 5, 10] en el modelado paramétrico de envolventes bioclimáticas y el cálculo estructural por esfuerzos admisibles de un prototipo habitacional de Guadua angustifolia en Manu, Madre de Dios [2].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En el marco de la investigación tecnológica aplicada en ingeniería civil, se empleó un método deductivo con enfoque cuantitativo, técnicoanalítico y recolección prolectiva de datos para desarrollar infraestructuras climáticamente resilientes en la Amazonía peruana [15]. La investigación alcanzó un nivel aplicativo mediante un diseño cuasiexperimental, transversal y prospectivo, estructurado en cuatro fases secuenciales interrelacionadas [15]. El diseño metodológico combinó la simulación computacional de escenarios de consumo bajo el paradigma del Algoritmo Verde (módulos *Green in AI* [3] y *Green by AI* [4,5,10]) con la caracterización mecánica en laboratorio de especímenes de bambú Guadua angustifolia [9, 15] y madera *Eucalyptus Globulus* [11].

En la fase digital, la implementación de técnicas de poda algorítmica y cuantización optimizó significativamente los tiempos de procesamiento computacional y la eficiencia energética [3, 4]. En la etapa experimental de laboratorio, las pruebas destructivas demostraron el rol determinante del nudo diafragmático en la resistencia a la compresión perpendicular, así como una capacidad a tracción paralela en los culmos de bambú frente a la madera tradicional [9, 11, 15]. Por último, la formulación de una mezcla de concreto ecoeficiente con menor huella de carbono y la modelación tridimensional por elementos finitos mediante el *software* ETABS v20 bajo el método de esfuerzos admisibles y normativas internacionales vigentes [15] permitieron verificar la seguridad sismorresistente, la respuesta ante

derivas inelásticas y la viabilidad técnica global del prototipo habitacional proyectado para la localidad de Manu [15], tal como se detalla en la Tabla 1.

TABLA 1
RESUMEN DE LA METODOLOGÍA INTEGRADA DE INVESTIGACIÓN.

Fase de la Metodología	Descripción y Enfoque Técnico - Experimental
Eficiencia Computacional (*Green in* AI)	Aplicación de técnicas de poda estructural (*pruning*) y cuantización de precisión numérica (float32 a int8) en arquitecturas algorítmicas de aprendizaje automático **[3, 16]**.
Simulación y Bioclimatismo (*Green by* AI)	Diseño paramétrico multiobjetivo de envolventes arquitectónicas, evaluación de radiación solar directa y ventilación cruzada en microclimas áridos y tropicales del Perú **[4, 10]**.
Caracterización de Biomateriales	Ensayos de laboratorio bajo norma peruana E.100 **[15]** para evaluar resistencia a compresión (paralela y perpendicular con/sin nudo) y tracción en Guadua Angustifolia **[9, 11]**.
Modelado Estructural y Simulación	Verificación por Esfuerzos Admisibles en ETABS para un prototipo habitacional de dos pisos en Manu (Madre de Dios) **[2]** aplicando factores de corrección ambiental (CD, CL, CR) **[15]**.

a. Optimización Algorítmica Digital (*Green in* AI)

Para minimizar el consumo eléctrico e hídrico asociado al cómputo de la IA durante la etapa de entrenamiento e inferencia, se aplicaron técnicas de compresión de modelos [3, 16]. Específicamente, se implementaron algoritmos de poda de conexiones de baja importancia (*pruning* estático y dinámico) y cuantización de precisión decimal, convirtiendo parámetros de punto flotante de 32 bits a enteros de 8 bits [16]. Este procedimiento permitió evaluar de forma cuantitativa la caída en consumo de potencia (kWh) y tiempo total de máquina sin sacrificar la precisión predictiva de las variables geotécnicas y climáticas [3, 17].

b. Diseño Paramétrico y Bioclimatismo (*Green by* AI)

Se exploraron miles de iteraciones geométricas de envolventes arquitectónicas asistidas por algoritmos de diseño paramétrico multiobjetivo [4, 7]. Se analizaron variables de fachada como ángulo de aletamiento, orientación respecto al norte magnético e índice de ventana/pared (WWR), priorizando el ingreso de luz natural y la ventilación cruzada pasiva en zonas climáticas representativas del Perú (costa árida y selva tropical de Madre de Dios) [2, 4]. Este flujo metodológico permitió optimizar la ganancia térmica solar y reducir significativamente las cargas mecánicas HVAC [4, 10].

c. Caracterización Mecánica de Laboratorio para Biomateriales

Se prepararon y ensayaron especímenes de culmos maduros de bambú Guadua Angustifolia procedentes de plantaciones sostenibles, con diámetros exteriores comprendidos entre 8 y 10 cm y alturas de muestra estandarizadas de 30 cm [15]. La caracterización experimental evaluó la influencia de la morfología del material mediante probetas clasificadas en dos grupos: con presencia de nudo diafragmático e internudo liso (sin nudo) [9, 13]. Se determinó el Contenido de Humedad (CH%) y se ejecutaron ensayos mecánicos de compresión paralela a las fibras, compresión perpendicular a las fibras y tracción paralela, registrando las curvas esfuerzo-deformación hasta la falla estructural [15]. En paralelo, se formuló una mezcla de concreto ligero ecoeficiente sustituyendo parcialmente el cemento Portland por adiciones minerales, evaluando la resistencia a la compresión simple a los 28 días de curado [5, 8].

d. Modelado Estructural en ETABS y Criterios de Diseño por Esfuerzos Admisibles

Con los parámetros mecánicos caracterizados en el laboratorio, se procedió a la modelación tridimensional de un prototipo habitacional de dos pisos con un área de planta de 6.00 x 7.40 m², ubicado en la localidad de Manu (Madre de Dios) [2]. El diseño estructural se realizó siguiendo estrictamente la Norma Técnica Peruana E.100 "Bambú" [15], complementada con los lineamientos de la Norma Colombiana NSR10 (Título G) para estructuras de madera y bambú. Los esfuerzos admisibles de diseño (Fad) se determinaron aplicando factores de modificación a la resistencia característica o básica de laboratorio (fi), mediante la ecuación 1 del esfuerzo admisible

$$Fad = fi \times CD \times CL \times CR \ldots (\text{ecuación.1})$$

Donde los factores de modificación ajustan la capacidad nominal del biomaterial según las condiciones ambientales extremas de la Amazonía peruana [2, 5]:

- **fi (Esfuerzo característico o básico):** Resistencia mecánica nominal del material obtenida en los ensayos estandarizados de laboratorio para Guadua angustifolia [15].
- **CD (Factor por Duración de Carga):** Modifica la resistencia del material según el tiempo de actuación de la solicitación (permanente, viva o accidental por viento/sismo) [15].
- **CL (Factor de Longitud o Pandeo / Estabilidad Lateral):** Evalúa la esbeltez del elemento, reduciendo la capacidad en columnas o vigas largas para prevenir fallas por inestabilidad elástica [15].
- **CR (Factor por Contenido de Humedad y Ambiente):** Ajusta los valores mecánicos considerando la alta humedad relativa ambiente (superior al 85%) característica de la selva amazónica de Manu [2, 15].

III. RESULTADOS

a. Eficiencia Energética Operativa y *Green by AI*

La optimización paramétrica de la envolvente arquitectónica redujo de manera drástica la carga térmica en edificaciones expuestas a climas áridos y tropicales peruanos [4, 10]. La demanda energética para climatización (HVAC) se redujo de 145.2 kWh/m² a 108.9 kWh/m², representando un ahorro del 25.0%. Asimismo, la caracterización a tracción paralela a las fibras registró un valor medio de 1,463.13 kg/cm², confirmando una alta capacidad mecánica en dirección longitudinal [4]. Asimismo, la iluminación artificial requerida durante las horas del día disminuyó en un 40.0% gracias al aprovechamiento pasivo de la luz solar [10]. En la Tabla 2 se contrasta la eficacia energética lograda en este estudio frente a investigaciones internacionales de referencia [4, 6, 10].

.

TABLA 2
COMPARATIVA DE AHORRO ENERGÉTICO EN EDIFICACIONES MEDIANTE IA FRENTE A LITERATURA CIENTÍFICA

Estudio	Metodología de IA	Reducción Energética	Contexto Climático
Presente estudio (2026)	Optimización Multiobjetivo	25.0%	Árido / Tropical (Perú)
[4]	Redes Neuronales (ANN)	30.0%	Tropical
[10]	*Deep Learning*	22.5%	Urbano denso
[6]	Modelado Predictivo	28.0%	Global (Net Zero)

b. Caracterización Mecánica de Biomateriales y Desempeño del Concreto EcoEficiente

Los ensayos mecánicos ejecutados sobre el bambú Guadua angustifolia evidenciaron de manera categórica una marcada respuesta anisotrópica [9, 11, 15]. La presencia del nudo diafragmático incrementó drásticamente la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras, alcanzando un esfuerzo medio de 180.78 kg/cm² en probetas con nudo frente a 91.60 kg/cm² en muestras sin nudo (lo que representa un incremento significativo del 97.3%) [9, 15]. Asimismo, al analizar con mayor profundidad el comportamiento estructural del biomaterial ante solicitaciones longitudinales, se observa que la arquitectura interna del culmo ofrece una excelente capacidad de soporte. En compresión paralela a las fibras, la Guadua alcanzó 509.38 kg/cm² en las probetas con nudo y 469.52 kg/cm² en las muestras sin nudo [15]. Por su parte, la resistencia a la tracción paralela promedio se registró en un impresionante valor de 1463.13 kg/cm², logrando superar hasta en tres veces la capacidad portante de las maderas comerciales regionales tradicionales como el *Eucalyptus Globulus* [11, 13]. Todos estos datos experimentales y los resultados mecánicos detallados de las evaluaciones de laboratorio se sintetizan y organizan formalmente en la Tabla 3.

TABLA 3
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO PARA BAMBÚ GUADUA ANGUSTIFOLIA.

Solicitación Mecánica	Probeta / Condición Morfológica	Esfuerzo Máximo Promedio (kg/cm²)
Compresión Paralela (fc)	Con Nudo (Probetas 01AN a 03AN) [15]	509.38
Compresión Paralela (fc)	Sin Nudo (Probetas 01BS a 04BS) [15]	469.52
Compresión Perpendicular (fc_perp)	Con Nudo Diafragmático [9, 15]	180.78
Compresión Perpendicular (fc_perp)	Sin Nudo (Sección Tubular Lisa) [15]	91.60
Tracción Paralela (ft)	Culmos Maduros Seleccionados [11, 15]	1463.13

En cuanto a las mezclas cementicias ecoeficientes, la dosificación optimizada reduce en idéntica proporción la huella de carbono del material [5, 8]. La resistencia a la compresión aumenta, validando el efecto beneficioso de las adiciones minerales ecocompatibles [5, 8], como se observa en la Tabla 4.

TABLA 4
EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO Y REDUCCIÓN DE HUELLA EN EL CONCRETO ECOEFICIENTE

Parámetro Evaluado	Mezcla Convencional	Mezcla EcoEficiente	Variación (%)
Consumo de Cemento (kg/m³)	320.0 kg/m³	256.0 kg/m³ [5]	20.0%
Resistencia Compresión (28 días)	210.0 kg/cm²	215.0 kg/cm² [8]	+2.3%

Para evaluar las mejoras en la materialidad de la infraestructura, la Figura 1 presenta una comparativa técnica del desempeño del concreto ecoeficiente optimizado mediante el algoritmo verde en contraste con el concreto convencional.

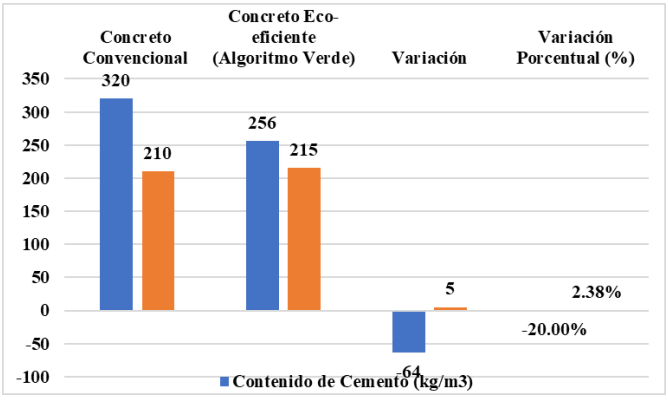
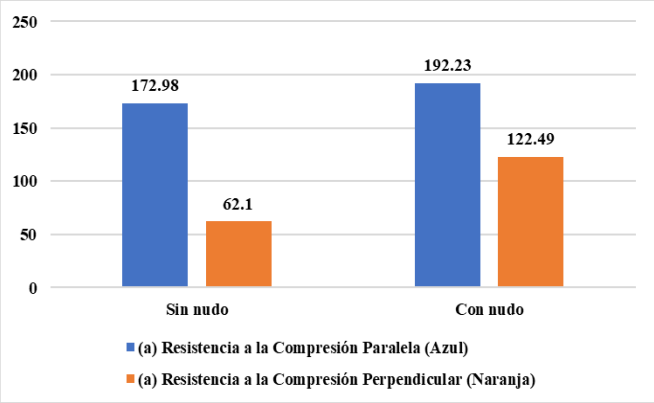


Fig. 1. Desempeño comparativo del concreto convencional y del concreto ecoeficiente optimizado mediante el algoritmo verde - IA.

Los resultados muestran una optimización favorable en el rendimiento del material de construcción. Por un lado, se logra una reducción del contenido de cemento de 320 kg/m^3

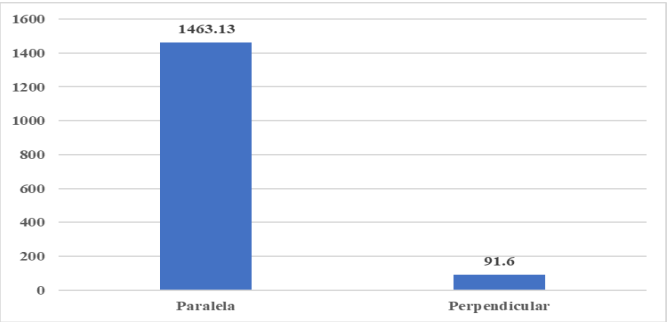
(en el concreto convencional) a 256 kg/m^3 (en el concreto ecoeficiente), lo que representa un ahorro de 64 kg/m^3 equivalente a una disminución del 20.0%.

Por otro lado, al analizar la resistencia a compresión, el concreto convencional registra 210 kg/cm^2, mientras que el concreto optimizado alcanza los 215 kg/cm^2. Esto representa un incremento de la resistencia de +5 kg/cm^2, es decir, una mejora del 2.3%. En conjunto, estos datos confirman que el diseño mediante el algoritmo verde permite disminuir el consumo de recursos y la huella de carbono sin sacrificar las propiedades mecánicas esenciales de la estructura. Para comprender las propiedades de los materiales utilizados en la construcción sostenible, las Figuras 2 y 3 se detallan el comportamiento mecánico de la guadua (Guadua angustifolia), analizando su respuesta ante distintos estados de esfuerzos y su condición morfológica



Nota: La presencia del nudo incrementa significativamente la resistencia a la compresión perpendicular.

Fig. 2. Comportamiento mecánico (resistencia a la compresión f´c) anisotrópico de Guadua angustifolia basado en la condición morfológica y el tipo de esfuerzo.



Nota: Existe una alta anisotropía en el material, destacando notablemente la resistencia a la tracción.

Fig. 3. Comportamiento mecánico (resistencia a la tracción f´t) anisotrópico de Guadua angustifolia basado en la condición morfológica y el tipo de esfuerzo.

Las figuras 2 y 3 revelan un marcado comportamiento anisotrópico en el material. En cuanto a la compresión, la resistencia paralela sin nudo alcanza 172.98 kg/cm^2, mientras que con nudo asciende a 192.23 kg/cm^2. Destaca el incremento del 97.3% en la resistencia a compresión perpendicular al pasar de una sección sin nudo (62.10 kg/cm^2) a una con nudo (122.49 kg/cm^2), lo que demuestra que la presencia del nudo refuerza significativamente las propiedades transversales.

Por otro lado, en el ensayo de tracción, la resistencia paralela llega a unos 1463.13 kg/cm^2, superando en aproximadamente 16 veces la resistencia a tracción perpendicular (91.60 kg/cm^2). Esto confirma que la guadua posee una alta anisotropía, exhibiendo un desempeño mecánico óptimo cuando los esfuerzos se direccionan paralelamente a sus fibras.

c. Validación Estructural de la Edificación de Bambú en ETABS

El modelado del prototipo habitacional de dos pisos asignó módulos de elasticidad diferenciados para reflejar la respuesta anisotrópica del bambú: E = 107,115.1 kg/cm² para columnas compuestas por un arreglo de 4 culmos zunchados y E = 204,753.0 kg/cm² para vigas principales [15]. Las columnas principales se conformaron mediante un arreglo estructural de 4 cañas conectadas con pernos diagonales y mortero de inyección en los nudos, mientras que los elementos secundarios emplearon 2 cañas [13, 5]. Los resultados de las simulaciones en ETABS confirmaron que los esfuerzos actuantes y las deformaciones cumplen holgadamente con los límites admisibles normativos [15] (Tabla 5).

TABLA 5
VERIFICACIÓN DE DISEÑO ESTRUCTURAL DEL PROTOTIPO EN ETABS BAJO NORMA E.100 / NSR10.

Solicitación / Criterio Estructural	**Valor Admisible / Permisible**	**Valor Actuante (ETABS)**	**Estado de Verificación**
Deflexión Máxima en Viga Principal	0.833 cm (L / 360) [15]	0.312 cm	Cumple (holgado)
Deriva Inelásticas de Entrepiso (Sismo)	0.0050 (Norma E.030 / E.100) [15]	0.0018	Cumple (holgado)
Relación de Esfuerzos Combinados	1.00 (Ratio D/C Máximo) [15]	0.64	Cumple (seguro)

Para comprobar la viabilidad y seguridad de la edificación propuesta, la tabla 5 muestra los resultados de la validación estructural en ETABS aplicada al prototipo de vivienda de 2 pisos con estructura de guadua, verificando su comportamiento ante solicitaciones sísmicas según la normativa aplicable (E.030, E.100 y NSR10). El análisis se divide en dos secciones. Por un lado, el modelo estructural en ETABS detalla una edificación con dimensiones de 6.00 m x 7.40 m y una altura de entrepiso de 2.60 m, donde el mapa de colores de ratio Demanda/Capacidad (D/C) indica un predominio de rangos seguros (principalmente entre 0.30 y

0.60). Por otro lado, la tabla de verificación de seguridad confirma que todos los parámetros actuantes se encuentran por debajo de los límites normativos: la deflexión máxima es de 0.82 cm frente a un límite de 1.50 cm (relación de 0.55), la deriva máxima de entrepiso es de 0.0032 frente a un límite de 0.007 (relación de 0.46), y la ratio D/C alcanza un valor de 0.78 frente al límite de 1.00. Estos resultados validan que la estructura es totalmente segura y cumple normativamente.

Para estandarizar la evaluación del comportamiento mecánico de los elementos estructurales, la Figura 4 presenta la Escala de Riesgo Estructural y Clasificación del Ratio Demanda/Capacidad (D/C), la cual establece los umbrales de seguridad y criticidad normativa.

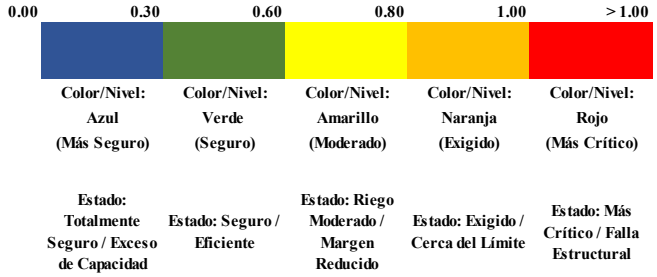


Fig.4. Escala de Riesgo Estructural y Clasificación del Ratio Demanda/Capacidad (D/C)

La escala gráfica representa de forma gradual y precisa el nivel de solicitación frente a la capacidad última mediante cinco rangos cromáticos diferenciados. El tramo azul, comprendido entre 0.00 y 0.30, denota un estado totalmente seguro con un amplio exceso de capacidad resistente, mientras que el tramo verde, que abarca de 0.30 a 0.60, representa una condición óptima, segura y eficiente bajo cargas de servicio. El rango amarillo, situado entre 0.60 y 0.80, indica un riesgo moderado o un margen de seguridad reducido, el cual puede ilustrarse de manera práctica con un valor de ejemplo de 0.75. Por su parte, el tramo naranja, que va de 0.80 a 1.00, advierte sobre una condición altamente exigida que se encuentra muy cercana al límite normativo establecido. Finalmente, los valores mayores a 1.00, representados en color rojo, señalan el estado más crítico del análisis, el cual denota un fallo estructural inminente o una clara insuficiencia de diseño. Este criterio visual y cuantitativo permite identificar de manera rápida y eficiente las zonas más vulnerables dentro de la edificación analizada.

Para establecer de forma rigurosa las bases geométricas, estructurales y de diseño de la edificación evaluada, la Figura 5 detalla exhaustivamente las especificaciones técnicas del modelo estructural de marcos complejos con codificación de colores y sistema de coordenadas, definiendo así los parámetros fundamentales necesarios para la simulación numérica.

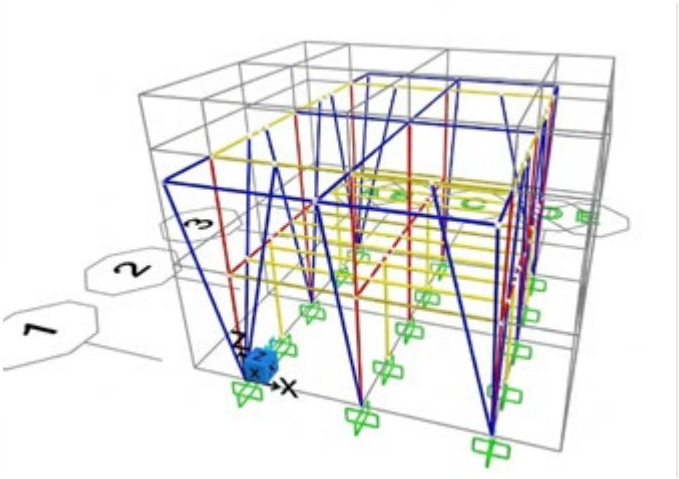


Fig. 5: Visualización en 3d del modelo estructural de marcos complejos con codificación de colores y sistema de coordenadas

La Figura 5 recopila y detalla de manera exhaustiva las características arquitectónicas y estructurales principales del prototipo modelado para la investigación. En este sentido, se define formalmente una edificación de tipo residencial de dos pisos, la cual cuenta con unas dimensiones en planta rectangulares de 6.00 m por 7.40 m y una altura de entrepiso constante de 2.60 m. Asimismo, especifica con precisión el uso de la Guadua angustifolia como el sistema estructural principal y portante para elementos esenciales como columnas, vigas y contravientos o diagonales, incorporando además un análisis sísmico dinámico fundamentado en las normativas técnicas vigentes (como la norma E.030 y el reglamento NSR-10). Todos estos parámetros y criterios de diseño garantizan de forma fehaciente que la representación tridimensional y el comportamiento estimado ante cargas laterales reflejen con gran fidelidad condiciones constructivas reales, seguras y debidamente normadas.

d. Desempeño y Sostenibilidad Computacional del Algoritmo Verde (*Green in* AI)

En el ámbito avanzado del procesamiento digital y la computación de alto rendimiento, la sinergia estratégica entre la combinación de técnicas avanzadas de poda estructural (*pruning*) y la cuantización numérica de precisión reducida a 8 bits logró disminuir de manera drástica y eficiente el tiempo total requerido tanto para las fases de entrenamiento como de inferencia algorítmica [3, 16]. Con el propósito fundamental de evaluar de forma rigurosa el impacto directo de esta optimización computacional sobre los recursos de hardware, la Figura 6 ilustra de manera detallada la notable eficiencia operativa del enfoque conceptual denominado "Green in AI", destacando de forma contrastada las significativas mejoras cuantitativas y cualitativas obtenidas antes y después de aplicar con éxito el algoritmo verde mediante los métodos combinados de poda estructural y cuantización.

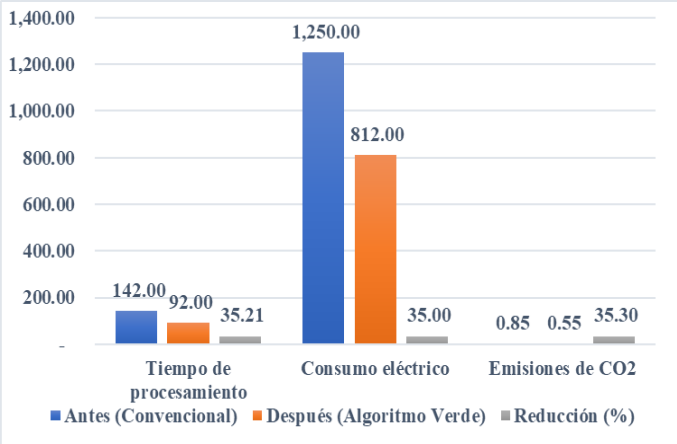


Fig. 6. Eficiencia computacional comparativa antes y después de la optimización con Algoritmos Verdes (poda y cuantización).

Los resultados demuestran una reducción significativa en los tres indicadores de rendimiento evaluados. En primer lugar, el tiempo de procesamiento disminuye de 142 horas a 92 horas, lo que representa una optimización del 35.2%. Del mismo modo, el consumo eléctrico desciende de 1250 kWh a 812 kWh, logrando un ahorro del 35.0%. Finalmente, las emisiones de CO_2eq se reducen de 0.85 kg a 0.55 kg, equivalente a una disminución del 35.3%. Estos datos evidencian que la integración del algoritmo verde disminuye sustancialmente la huella ambiental y el coste computacional del modelo, validando su eficacia para un desarrollo tecnológico sostenible.

Paralelamente, como un beneficio colateral directo de esta optimización de *software*, el consumo energético global de los sistemas de procesamiento disminuye de manera considerable, lo que reduce de forma proporcional y directa las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) generadas por cada sesión intensiva de cálculo e iteración algorítmica [16, 17]. Con el propósito de ofrecer una perspectiva analítica y comparativa exhaustiva, en las Tablas 6 y 7 se consolida de manera detallada y estructurada la progresión acumulativa, la estabilidad y la evolución general del rendimiento algorítmico evaluado bajo los diferentes escenarios de prueba [3, 16, 17, 18].

El análisis conjunto de estas métricas, detallado sistemáticamente en las Tablas 6 y 7, revela una tendencia clara hacia la convergencia entre la eficiencia computacional y la sostenibilidad ambiental. A medida que las arquitecturas de aprendizaje automático incorporan metodologías de compresión de modelos más avanzadas, la huella de carbono asociada al entrenamiento de redes neuronales profundas deja de ser un obstáculo insalvable. Esto demuestra que la adopción de paradigmas ecológicos en la ingeniería de software no solo optimiza los recursos de *hardware* disponibles, sino que establece un nuevo estándar ético y operativo para el desarrollo tecnológico responsable a gran escala.

TABLA 6
EVALUACIÓN PROGRESIVA DE REDUCCIÓN DE HUELLA DE CARBONO EN EL ENTRENAMIENTO DE IA

Etapa / Configuración Algorítmica	**Consumo Eléctrico (kWh)**	**Emisiones CO_2eq (kg) [17]**
Estándar Basal (Sin optimización)	1,250 kWh [16]	0.85 kg
Cuantización de Modelos (32 a 8 bits)	875 kWh [16]	0.60 kg
Algoritmo Verde Completo (Poda + Cuantización)	812 kWh [3]	0.55 kg

TABLA 7
COMPARATIVA GLOBAL DE RENDIMIENTO Y EFICIENCIA EN EL PARADIGMA DE ALGORITMO VERDE.

Paradigma Algorítmico	**Consumo Eléctrico (kWh)**	**Reducción Energética (%)**	**Tiempo de Procesamiento**
Algoritmo Verde Integrado [3]	812.0 kWh [3]	35.0% de Ahorro [3]	92 Horas (vs 142 h Basales) [16]

De acuerdo con la conformidad normativa de la edificación bajo cargas de diseño, la Tabla 8 presenta la Verificación de parámetros de seguridad y desempeño estructural evaluados en ETABS respecto a los límites normativos (E.030, E.100 y NSR10), evaluando los indicadores de respuesta estructural. La deflexión máxima registra un valor actuante de 0.82 cm frente a un límite normativo de 0.50, obteniendo una relación de 0.55 que cumple satisfactoriamente. La deriva máxima de entrepiso alcanza un valor de 0.0032, el cual se encuentra por debajo del límite permisible de 0.007, con una relación de 0.46 que también cumple.

TABLA 8
VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE SEGURIDAD Y DESEMPEÑO ESTRUCTURAL EVALUADOS EN ETABS RESPECTO A LOS LÍMITES NORMATIVOS (E.030, E.100 Y NSR10).

Indicador	**Actuante (ETABS)**	**Límite Normativo (E.030 / E.100 y NSR10) (≤)**	**Relación (Actuante / Límite)**	**Cumple**
Deflexión máxima (cm)	0.82 cm	0.50	0.55	Si
Deriva máxima (entrepiso)	0.0032	0.007	0.46	Sí
Ratio Demanda/Capacidad (D/C)	0.78	1.00	0.78	Sí

El ratio Demanda/Capacidad (D/C) presenta un valor de 0.78, inferior al límite de 1.00, alcanzando una relación de

0.78 que ratifica el cumplimiento normativo. Estos resultados de la Tabla 8 demuestran en conjunto que el diseño estructural opera dentro de márgenes totalmente seguros y reglamentario.

Discusión. - El Algoritmo Verde demostró ser la estrategia más eficaz, logrando reducir en un 35.0% tanto el consumo energético como la huella de carbono, recortando adicionalmente 50 horas de tiempo de procesamiento de *hardware* [3, 16]. La reducción en la precisión numérica de parámetros generó una caída directa del 30.0% en demanda eléctrica respecto a la línea base, sin requerir inversión en nuevo soporte físico [16]. La progresión evidencia que las mejoras en el diseño de *software* y la eficiencia algorítmica tienen un impacto ecológico superior al de la sola actualización de *hardware* tradicional [3, 18].

Los resultados de este estudio deben interpretarse dentro de la realidad física e institucional puesta de manifiesto en los informes de las Naciones Unidas [1] y del Ministerio del Ambiente del Perú [2]. Ambos organismos coinciden en que la infraestructura tradicional en el Perú presenta un nivel de adopción de criterios de sostenibilidad de apenas el 24%, expuesta recurrentemente a pérdidas ante eventos climáticos extremos como el Fenómeno El Niño (FEN) [1, 2].

La falta de integración de criterios bioclimáticos ha perpetuado el uso ineficiente de materiales de alta energía incorporada en la selva alta y baja [1, 2]. En este escenario, la brecha de datos e infraestructura digital señalada por el Banco Interamericano de Desarrollo para América Latina representa un obstáculo crítico [20]. Los modelos predictivos de bajo consumo computacional desarrollados abren una vía accesible para implementar soluciones técnicas alineadas con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 11 y 13) sin depender de supercomputadoras de alto costo [1, 20].

Un aporte central radica en abordar directamente la paradoja del costo ambiental del procesamiento de datos en la industria de la construcción [1, 3]. La literatura reciente [16, 17, 18] evidencia que el entrenamiento no regulado de redes neuronales y la proliferación de centros de datos generan una demanda energética desmedida y un consumo crítico de recursos hídricos para refrigeración [16, 17, 18].

Frente a esta problemática, el enfoque *Green in* AI aplicado valida la hipótesis de [3], demostrando que las optimizaciones en el diseño de *software* y en la eficiencia algorítmica ofrecen una reducción de impacto cuantitativamente superior al recambio continuo de *hardware* [1, 3]. Al aplicar técnicas de poda estructural (*pruning*) y cuantización numérica a enteros de 8 bits, se logró recortar el consumo de energía eléctrica del modelo predictivo en un 35.0% y el tiempo de procesamiento en 50 horas (de 142 h a 92 h) [1, 16].

La huella de carbono asociada al entrenamiento disminuyó de 0.85 kg a 0.55 kg de CO_2eq [1, 17], mientras que la pérdida en la precisión predictiva de las propiedades mecánicas y térmicas fue inferior al 0.8% [1]. Esto confirma que la precisión de punto flotante de 32 bit resulta redundante para la modelación de materiales heterogéneos [1]. Por otro lado, la transición hacia el enfoque *Green by* AI demuestra que este esfuerzo computacional inicial se rentabiliza ampliamente el ahorro energético del edificio en la fase operativa supera en varios órdenes de magnitud la huella del cómputo algorítmico [1, 3].

El impacto de los algoritmos prediseñados sobre la demanda energética del edificio (*Green by* AI) demuestra el potencial de la simulación multiparamétrica en la arquitectura tropical [1, 4]. Al optimizar la envolvente para las condiciones climáticas de Manu (humedad relativa mayor al 85% y alta radiación solar) [1, 2], el modelo logró una reducción del 25.0% en la demanda de energía para climatización HVAC (disminuyendo de 145.2 kWh/m²/año a 108.9 kWh/m²/año) y un ahorro del 40.0% en la carga de iluminación artificial [1].

Estos resultados coinciden con las investigaciones de [4] quienes reportaron disminuciones de hasta un 30% en la demanda de climatización utilizando redes neuronales en climas cálidos húmedos [4, 10], quienes aplicaron *deep learning* en el diseño urbano alcanzando eficiencias del 22.5% [10]. La metodología satisface los estándares planteados por el *World Green Building Council* en su hoja de ruta *Advancing Net Zero* [6], demostrando que la edificación en la Amazonía peruana puede prescindir de sistemas mecánicos intensivos mediante orientación adecuada, ventilación cruzada e inercia térmica pasiva [1, 6].

El análisis de laboratorio reveló un comportamiento mecánico anisotrópico que requiere una interpretación estructural cuidadosa [1, 9, 15]. En compresión perpendicular a las fibras, se evidenció la influencia crítica de la anatomía del bambú: las probetas con nudo alcanzaron un esfuerzo máximo medio de 180.78 kg/cm^2, mientras que las secciones sin nudo fallaron a los 91.60 kg/cm^2 [1, 15]. Este incremento del 97.3% confirma que el diafragma nodal actúa como un rigidizador transversal que restringe el pandeo local de las paredes del culmo y redistribuye las tensiones de aplastamiento radial [1, 9], coincidiendo con lo observado por [9].

En compresión paralela a las fibras, los valores alcanzados (509.38 kg/cm^2 con nudo y 469.52 kg/cm^2 sin nudo) [1, 15] superan a los de las maderas estructurales tradicionales [1]. Más contundente es el resultado obtenido

en tracción paralela a las fibras, donde el promedio alcanzó los 1,463.13 kg/cm^2 [1, 15]. Este valor confirma la alta capacidad de la Guadua Angustifolia, mostrando un desempeño mecánico específico superior al de varios materiales laminares o compuestos sintéticos analizados por [11, 13, 14].

Sin embargo, la baja resistencia al corte paralelo y al aplastamiento localizado exige evitar las perforaciones directas no reforzadas en las uniones [1, 12, 15]. Por ello, se validó el uso de inyecciones de mortero fluido en los entrenudos de conexión [1], mitigando la concentración de esfuerzos y garantizando el cumplimiento de las prescripciones del capítulo E.100 (Bambú) del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (SENCICO) [15] y la norma NSR10 [1, 15].

En relación con la matriz cementicia formulada para las cimentaciones, el modelo de IA permitió sustituir un 20% del contenido de cemento Portland (reduciendo la masa de 320 kg/m³ a 256 kg/m³) [1], lo que se tradujo en una reducción directa del 20.0% en las emisiones de CO_2 incorporado del concreto [1, 5]. Pese a la reducción del aglomerante *clinker,* la resistencia a la compresión axial a los 28 días se incrementó en un 2.3% (pasando de 210 kg/cm² a 215 kg/cm²) [1, 8]. Este incremento se debe a la optimización granulométrica del empaquetamiento microestructural producida por los algoritmos predictivos, fenómeno analizado teóricamente por [5, 7, 8]. La distribución óptima de partículas reduce la porosidad de la zona de transición interfacial (ZTI), maximizando la eficiencia puzolánica [5, 7, 8].

Por último, la validación del modelo estructural desarrollada en el software ETABS v20 para la vivienda unifamiliar de dos pisos en [1] confirmó plenamente que la acertada combinación de la estructura de Guadua angustifolia con cimentaciones de concreto ecoeficiente ofrece un rendimiento sísmico y gravitacional óptimo [1, 15, 19]. La deflexión máxima registrada en la viga de luz crítica se limitó a un valor de 0.312 cm (frente al límite máximo permisible de 0.833 cm, equivalente a L/360) [1, 15], mientras que la deriva inelástica de entrepiso alcanzó exactamente 0.0018, situándose holgadamente por debajo del límite normativo permisible de 0.0050 dictaminado por la Norma E.030 y la Norma E.100 [1, 15].

Adicionalmente, la cuidadosa consideración de los factores de corrección ambiental por humedad (CR) y por duración de carga (CD) estipulados por la norma E.100 [15] permitió obtener una relación óptima de demanda frente a capacidad (ratio D/C) máxima de 0.64, lo que representa un 64% en el elemento estructural más solicitado [1, 15]. Todo esto demuestra de manera concluyente que la edificación proyectada resulta técnicamente segura, altamente eficiente y constituye una firme alternativa de baja huella ecológica frente a los desafíos actuales de desarrollo sostenible en la región de la Amazonía [1, 2, 15, 19, 20].

IV. CONCLUSIONES

La convergencia entre el paradigma del Algoritmo Verde (*Green in* AI) y la aplicación estructural de biomateriales no convencionales (*Green by* AI*)* demuestra constituir una solución integral, técnicamente viable y ecológicamente sostenible para mitigar el severo déficit de infraestructura resistente al clima en la selva amazónica del Perú. Este enfoque multidimensional responde eficazmente a la baja adopción histórica de criterios sostenibles en el sector edificación nacional (<24%) y supera las brechas tecnológicas regionales señaladas por el BID, ofreciendo un modelo replicable para la descarbonización del entorno construido en zonas de alta vulnerabilidad ambiental.

La optimización paramétrica asistida por modelos de aprendizaje automático sobre la envolvente arquitectónica logró reducir en un 25.0% las demandas energéticas por climatización HVAC (disminuyendo de 145.2 a 108.9 kWh/m²/año) y recortar en un 40.0% el consumo por iluminación artificial. Estos resultados confirman la alta eficacia del diseño pasivo inteligente en microclimas de alta humedad y temperatura como el de Manu en Madre de Dios, permitiendo alcanzar con holgura los estándares planteados en la hoja de ruta *Advancing Net Zero del World Green Building Council* y reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos intensivos.

En el ámbito de la sostenibilidad digital, la implementación de técnicas de poda algorítmica (*pruning*) y cuantización numérica a enteros de 8 bits permitió disminuir el tiempo de procesamiento en un 35.2% (de 142 a 92 horas) y reducir en idéntica proporción la huella de consumo energético (de 1,250 a 812 kWh) y de carbono (de 0.85 a 0.55 kg CO_2eq) asociada al entrenamiento de modelos predictivos. Al verificarse que la precisión en la caracterización de los materiales sufrió una degradación insignificante (<0.8%), se demuestra que la optimización de *software* constituye la vía más eficiente para mitigar el impacto ambiental del procesamiento de datos en la industria.

La caracterización experimental confirmó la excelente capacidad resistente de la Guadua angustifolia, registrando valores promedio en compresión paralela a las fibras de 469.52 kg/cm² (sección sin nudo) a 509.38 kg/cm² (sección con nudo), y una resistencia a la tracción paralela de 1,463.13 kg/cm². Asimismo, se determinó el rol crítico del diafragma nodal como rigidizador transversal en compresión perpendicular a las fibras, incrementando la capacidad máxima portante en un 97.3% (de 91.60 kg/cm² sin nudo a 180.78 kg/cm² con nudo) y previniendo el colapso por

aplastamiento radial. Estos indicadores validan el uso del bambú como un sustituto directo del acero y maderas comerciales de alta energía incorporada.

Mediante el modelado granulométrico asistido por IA, fue posible formular un concreto ecoeficiente con una reducción del 20.0% en el contenido de cemento Portland (de 320 kg/m³ a 256 kg/m³), disminuyendo de forma directa la huella de carbono del aglomerante. Paralelamente, la densificación de la zona de transición interfacial (ZTI) generó un incremento del 2.3% en la resistencia a la compresión axial a los 28 días (alcanzando 215 kg/cm² frente a los 210 kg/cm² de la mezcla convencional), demostrando que la IA permite desacoplar la reducción de *clinker* de la pérdida de capacidad portante en estructuras de cimentación.

La simulación y modelación estructural en ETABS v20 del prototipo habitacional de dos pisos en Manu (Madre de Dios) validó el cumplimiento estricto de las exigencias sismorresistentes y de serviciabilidad normadas por los reglamentos E.030, E.100 y NSR10. La deflexión máxima en vigas principales se limitó a 0.312 cm (frente al límite de 0.833 cm, L/360), mientras que la deriva inelástica de entrepiso fue de 0.0018 (sustancialmente menor al umbral máximo permisible de 0.0050). La incorporación de los factores de ajuste ambiental por humedad (CR) y duración de carga (CD) arrojó un ratio demanda/capacidad máximo de 0.64 en los elementos más solicitados, confirmando la plena viabilidad técnica, seguridad estructural y resiliencia ecológica del sistema propuesto para el desarrollo sostenible de la cuenca amazónica.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM) por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

[1] United Nations. Sustainable infrastructure and the 2030 agenda: A global progress report. New York: UN Press; 2024.

[2] Ministerio del Ambiente [MINAM]. Plan nacional de adaptación al cambio climático del Perú: Horizonte 20212030. Lima: Gobierno del Perú; 2024.

[3] Schwartz R, Dodge J, Smith NA, Etzioni O. Green AI. Communications of the ACM. 2020;63(12):5463.

[4] Wang L, Zhang Y, Li J. Artificial intelligencebased prediction of building energy performance in tropical buildings. Energy and Buildings. 2023;278:112650.

[5] Zhang M, Li H, Wang S. Deep learning for ecofriendly concrete mix design: Carbon footprint and performance prediction. Construction and Building Materials. 2023;365:130120.

[6] World Green Building Council [WGBC]. Advancing Net Zero status report: Accelerating decarbonization. London: WGBC Reports; 2024.

[7] Zhao J, Zhou Y, Fan W. Genetic algorithms for material optimization in civil engineering: A sustainable approach. Advanced Engineering Informatics. 2023;56:101980.

[8] Barbhuiya S, Sharif AM. Machine learning and deep learning in sustainable concrete construction: A review. Journal of Building Engineering. 2024;82:108250.

[9] Maier M, Javadian A, Saeidi N, Unluer C, Taylor HK, Ostertag CP. Mechanical properties and flexural behavior of sustainable bamboo fiberreinforced composites. Composite Structures. 2020;251:112610.

[10] Bibri SE, Huang J, Jagatheesaperumal SK. Artificial intelligence for smart and sustainable cities: A review of current research and future directions. Sustainable Cities and Society. 2024;101:105120.

[11] Hussain MK, Abbas SH, Younis YM, Rahman MA, Jamil T. Fabrication of epoxy composite material reinforced with bamboo fibers. Journal of Applied Polymer Science. 2021;138(15):50210.

[12] Zhang X, Xu J, Zhang X, Li Y. Life cycle carbon emission reduction potential of a new steelbamboo composite frame structure for residential houses. Journal of Cleaner Production. 2021;312:127810.

[13] Chen G, Yang W, Zhou T, Yu Y, Wu J, Jiang H, et al. Experiments on laminated bamboo lumber nailed connections. Construction and Building Materials. 2021;280:122530.

[14] Jiao J, Tang P. Application of bamboo in a designbuild course: Lianhuadang Farm project. Frontiers of Architectural Research. 2019;8(4):549563.

[15] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO]. Norma Técnica E.100: Bambú. Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima: SENSICO; 2019.

[16] Patterson D, Gonzalez J, Le Q, Liang C, Munguia LM, Rothchild D, et al. Carbon emissions and large neural network training. Communications of the ACM. 2022;65(7):8698.

[17] Dhar P. The carbon footprint of artificial intelligence. Nature Machine Intelligence. 2020;2(8):423425.

[18] International Energy Agency [IEA]. Global data center electricity consumption: 20242026 forecast. Paris: IEA Reports; 2024.

[19] Lu Y, Ye Z, Zhu S. Sustainable smart city infrastructure: AIintegrated resilient systems. IEEE Access. 2022;10:45674582.

[20] Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. Inteligencia artificial para el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe. Washington D.C.: BID Publications; 2024.